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

Σχεδίαση Ηλεκτρικού Κινητήρα για Χρήση σε Όχημα Εξοικονόμησης Ενέργειας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Φ. Βαμβακάς

Ηλίας – Δημήτριος Χ. Αντωνακάκης

Επιβλέπων : Αντώνιος Γ. Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2019

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

Σχεδίαση Ηλεκτρικού Κινητήρα για Χρήση σε Όχημα Εξοικονόμησης Ενέργειας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Φ. Βαμβακάς

Ηλίας – Δημήτριος Χ. Αντωνακάκης

Επιβλέπων : Αντώνιος Γ. Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 5η Ιουλίου 2019.

.....	.....	.....
Αντώνιος Κλαδάς	Σταύρος Παπαθανασίου	Αντώνιος Αντωνόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2019

.....
Γεώργιος Φ. Βαμβακάς

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

.....
Ηλίας – Δημήτριος Χ. Αντωνακάκης

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

Copyright © Γεώργιος Βαμβακάς, 2019
Copyright © Ηλίας – Δημήτριος Αντωνακάκης, 2019
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τη σχεδίαση του κινητήρα πρόωσης για το νέο όχημα κατηγορίας «Urban Concept» της φοιτητικής ομάδας «Προμηθέας» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, το οποίο πρόκειται να συμμετάσχει στο διαγωνισμό εξοικονόμησης ενέργειας «Shell Eco-Marathon».

Αρχικά, παρουσιάζεται μια σύντομη επισκόπηση της τεχνολογίας των ηλεκτρικών οχημάτων καθώς και τα κύρια σημεία της σχεδίασης ηλεκτρικών μηχανών. Συγκεκριμένα, αναλύεται η πλειονότητα των υπαρχουσών τεχνολογιών ηλεκτρικών μηχανών, και βάσει των προτερημάτων και μειονεκτημάτων της καθεμίας, δικαιολογείται η απόφαση να σχεδιαστεί μία Σύγχρονη Μηχανή Επιφανειακών Μονίμων Μαγνητών.

Στη συνέχεια, αναλύονται οι δυνάμεις που επενεργούν στο όχημα, προκειμένου να καθοριστούν οι προδιαγραφές του κινητήρα. Η διαδικασία περιλαμβάνει ένα αρχικό βήμα προκαταρκτικής σχεδίασης με στόχο τον προσδιορισμό των κύριων χαρακτηριστικών και διαστάσεων της μηχανής. Εξετάζονται οι εξής δύο εναλλακτικές τοπολογίες συστήματος μετάδοσης: η απ' ευθείας σύνδεση του κινητήρα με τον άξονα του τροχού και η παρεμβολή ενός κιβωτίου ταχυτήτων με λόγο μετάδοσης 3:1 μεταξύ κινητήρα και τροχού.

Με εκκίνηση την προκαταρκτική σχεδίαση και με χρήση αλγορίθμων παραμετρικής σχεδίασης και ανάλυσης γεωμετριών μηχανών, παράγονται δύο σύνολα γεωμετρικών διαμορφώσεων, ένα για κάθε τοπολογία συστήματος μετάδοσης. Τα προαναφερθέντα σύνολα σχηματίζονται μέσω μεταβολής διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών, όπως ο αριθμός των πόλων, η εξωτερική διάμετρος, το μήκος και ο αριθμός των ενεργών εν σειρά ελιγμάτων στις αύλακες του στάτη. Η ανάλυση ευαισθησίας παράγει περί τις 2.600 εναλλακτικές γεωμετρίες για κάθε διαμόρφωση του συστήματος μετάδοσης και ο στόχος της είναι να προσδιοριστούν οι εξωτερικές διαστάσεις και η βασική διαμόρφωση της μηχανής.

Οι γεωμετρίες των μηχανών αξιολογούνται με βάση τη μάζα και την απόδοσή τους στην εκάστοτε ονομαστική κατάσταση λειτουργίας. Η σύγκριση των μηχανών βασίζεται στην κατανάλωση ενέργειας ανά χιλιόμετρο οδήγησης του οχήματος με την ονομαστική του ταχύτητα. Προκρίνεται μία γεωμετρία ανά διαμόρφωση κιβωτίου ταχυτήτων, με κριτήριο το μέγιστο βαθμό απόδοσης και την ελάχιστη μάζα, αλλά και με προϋπόθεση την επαρκή ικανοποίηση των προδιαγραφών επίδοσης του οχήματος.

Ακολουθεί μία δεύτερη ανάλυση ευαισθησίας, κατά την οποία οι δύο επιλεγμένες γεωμετρίες μηχανών εξετάζονται περαιτέρω, με σκοπό να διαπιστωθεί εάν η μεταβολή των χαρακτηριστικών του εσωτερικού τους επιφέρει βελτίωση της απόδοσης ή ελάττωση της μάζας διατηρώντας ικανοποιητικά χαρακτηριστικά επίδοσης για την εφαρμογή. Αυτή η δεύτερη ανάλυση παράγει τον τελικό κινητήρα, ο οποίος επιλέγεται για χρήση στο όχημα.

Τέλος, από την ανάλυση των προσομοιωμένων δεδομένων, μελετάται η επίδραση των εν σειρά ενεργών τυλιγμάτων στο χάρτη απόδοσης και στην ονομαστική ταχύτητα μιας Σύγχρονης Μηχανής Επιφανειακών Μονίμων Μαγνητών.

Η ανάλυση πραγματοποιείται μέσω του λογισμικού MATLAB σε συνδυασμό με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων FEMM.

Λέξεις κλειδιά: Ηλεκτρικό όχημα, σύγχρονη μηχανή μονίμων μαγνητών, επιφανειακοί μόνιμοι μαγνήτες, ανάλυση ευαισθησίας, χάρτης απόδοσης ηλεκτρικής μηχανής, χάρτης απωλειών ηλεκτρικής μηχανής, ανάλυση μικρογεωμετρίας.

ABSTRACT

This thesis is dedicated to the design of the traction electric motor that will be used in the new Urban Concept car of the “Prometheus” student team from the National Technical University of Athens, which is going to compete at the “Shell Eco-Marathon” competition.

First, a short overview of electric vehicle technology and the fundamentals of electric machine design are presented. The majority of the existing motor technologies is analysed and based on the advantages and disadvantages, the choice of designing a Surface Mounted Synchronous Permanent Magnet Motor is explained.

Second, the specifications of the motor are set following a dynamic analysis of the urban concept car. Afterwards, a preliminary design process is explained in order to extract the outer dimensions and characteristics of the motor in case a gearbox with no reduction ratio or a gearbox with a reduction ratio of 3:1 is used.

Following the preliminary analysis, using a parametric design algorithm, two clouds of motors are formed, one for each gearbox configuration. The clouds are formed by scanning different geometrical parameters of the motors, such as the number of poles, the stator outer diameter, the length and the effective turns. The sensitivity analysis produces approximately 2.600 motors for each configuration.

The motors are evaluated based on their mass and efficiency on their respective nominal operating condition, as well as based on the comparison of their energy consumption over a given route. One motor per gearbox configuration is selected according to the criteria mentioned and its metrics are presented.

The two selected motors are further examined in order to investigate whether by altering their microgeometrical characteristics, their efficiency is enhanced or their mass decreased, without compromising their power. This second analysis produces the finalized motor, which is selected to be fitted in the urban concept car.

Lastly, from the analysis of the simulated data the impact of the effective turns on each Surface Mounted Synchronous Permanent Magnet Motor’s efficiency map and base speed is summarized.

The entire analysis is carried out using MATLAB coupled with the finite elements software FEMM.

Keywords: Electric vehicle, synchronous permanent magnet motor, surface mounted magnets, sensitivity analysis, cloud of motors, electric motor efficiency map, electric motor loss map, microgeometry analysis.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ευχαριστίες μας προς όλους όσοι βοήθησαν κατά τη διάρκεια αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Ευχαριστούμε θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής μας εργασίας, Καθηγητή κ. Αντώνιο Κλαδά για την εμπιστοσύνη που μας έδειξε με την ανάθεσή της καθώς και για την καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της. Θα θέλαμε να τον ευχαριστήσουμε για την άψογη συνεργασία αυτούς τους μήνες και για τις γνώσεις που μας μετέδωσε κατά τη διάρκεια της φοίτησής μας στο Πολυτεχνείο.

Ευχαριστούμε τον Κωνσταντίνο Λάσκαρη για την εμπιστοσύνη που μας έδειξε και την έμπνευση που μας έδωσε να ασχοληθούμε με τις ηλεκτρικές μηχανές στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας και πέρα από αυτό.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα θέλαμε να απευθύνουμε στον Κωνσταντίνο Μπούρχα και τον Μίνω Μπενιακάρ για τη συνεισφορά και τις πολύτιμες συμβουλές τους κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Ακόμη, ευχαριστούμε τον Ιάκωβο Μανωλά για την καθοδήγησή του όσον αφορά την οργάνωση της εργασίας.

Τέλος, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τις οικογένειες και τους φίλους μας για την υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ 13
1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ 13
1.2 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ 13

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ 15
2.1 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟ 15
2.1.1 Επισκόπηση Συστήματος Κίνησης Ηλεκτρικού Οχήματος 16
2.2 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ 18
2.2.1 Επιλογή Τελικής Τοπολογίας Μηχανής Μόνιμων Μαγνητών 21
2.2.1.1 Αξιολόγηση Εναλλακτικών Διαμορφώσεων Μαγνητών 22
2.2.2 Τύλιγμα Στάτη 24
2.2.2.1 Τριφασικό Τύλιγμα με Επικάλυψη Μεταξύ των Φάσεων 24
2.2.2.2 Συγκεντρωμένο Τύλιγμα Χωρίς Επικάλυψη των Φάσεων 26
2.2.2.3 Σύγκριση – Αξιολόγηση Τυλιγμάτων 27
2.2.3 Ισοδύναμο Κύκλωμα και Μαθηματικό Μοντέλο Σύγχρονου Κινητήρα Μόνιμων Μαγνητών 28
2.2.3.1 Πλαίσιο Αναφοράς d-q στη Σύγχρονη Μηχανή Μονίμων Μαγνητών 29
2.2.3.2 Ισοδύναμο Κύκλωμα Μηχανής στο Πλαίσιο d-q 30
2.2.4 Κατασκευαστικά Υλικά Ηλεκτρικών Μηχανών 33
2.2.4.1 Μαγνητικά Υλικά 33

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΗΣ 37
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 37
3.2 ΔΙΑΓΩΝΙΣΜΟΣ “SHELL ECO-MARATHON” – ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ URBAN CONCEPT 37
3.2.1 Πληροφορίες για το Διαγωνισμό 37
3.2.2 Κανονισμοί Κατασκευής Οχήματος 37
3.3 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ 38
3.3.1 Εκτίμηση Χαρακτηριστικών Οχήματος με Βάση τους Κανονισμούς 38
3.3.2 Καθορισμός Ταχύτητας Περιστροφής Μηχανής 38
3.3.3 Καθορισμός Ονομαστικής Ροπής Μηχανής 39
3.3.3.1 Ανάλυση Δυνάμεων 39
3.3.3.2 Ορισμός Καταστάσεων Συστήματος 41
3.3.3.3 Καθορισμός Απαιτήσεων Ροπής στους Τροχούς 41
3.4 ΣΧΕΣΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΚΑΙ ΤΡΟΧΟΥ 44
3.5 ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ 46
3.5.1 Πάχος Διακένου 47
3.5.2 Ειδική Μαγνητική Φόρτιση 47

3.5.3 Ειδική Ηλεκτρική Φόρτιση 47
3.5.4 Πυκνότητα Ρεύματος Τυλίγματος 48
3.5.5 Ισχύς Εξόδου Μηχανής 49
3.5.6 Οριακή Τάση Διακένου 50
3.5.7 Ηλεκτρομαγνητική Ροπή 50
3.5.8 Εκτίμηση των Χαρακτηριστικών της Μηχανής 51
3.5.8.1 Λόγος Μετάδοσης 1:1 51
3.5.8.2 Λόγος Μετάδοσης 3:1 55
3.5.9 Συμπέρασμα Προκαταρκτικής Σχεδίασης 58

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΗΧΑΝΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (FEA) 59
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 59
4.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ 59
4.2.1 Μαγνητοστατικά Προβλήματα 59
4.2.2 Οριακές Συνθήκες 61
4.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ 62
4.3.1 Εισαγωγή 62
4.3.2 Σχεδίαση Διατομής Μηχανής 63
4.3.2.1 Ανεξάρτητες Μεταβλητές Σχεδίασης 63
4.3.2.2 Σχεδίαση Στάτη 64
4.3.2.3 Σχεδίαση Δρομέα 64
4.3.3 Επιλογή Υλικών Κατασκευής Μηχανής 65
4.3.3.1 Επιλογή Σιδήρου 65
4.3.3.2 Επιλογή Μαγνήτη 65
4.3.4 Τελική Σχεδίαση Μηχανής 67
4.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ 67
4.4.1 Επιλογή Κλάσματος Γεωμετρίας Μηχανής 67
4.4.2 Επίλυση Μαγνητοστατικού Προβλήματος για μία Λαμαρίνα σε μία Λειτουργική Κατάσταση 67
4.4.3 Ορισμός Ενεργού Μήκους Μαγνητικού Κυκλώματος Μηχανής και Αριθμού Ενεργών Τυλιγμάτων Στάτη 70
4.4.4 Υπολογισμός Απωλειών Μηχανής 70
4.4.4.1 Υπολογισμός Απωλειών Σιδήρου 70
4.4.4.2 Υπολογισμός Απωλειών Χαλκού 72
4.4.5 Εξαγωγή Χαρακτηριστικής Καμπύλης T – ω 73
4.4.6 Υπολογισμός Χαρτών Απωλειών και Απόδοσης Μηχανής 77
4.4.7 Υπολογισμός Μάζας Μηχανής 77
4.4.8 Ενεργειακή Αξιολόγηση Συστήματος Κίνησης 78

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΧΑΝΩΝ **80**
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 80
5.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΧΑΝΩΝ 80
5.2.1 Καθορισμός Παραμέτρων Σχεδίασης 80
5.2.1.1 Εισαγωγή 80
5.2.1.2 Καθορισμός Παραμέτρων Σχεδίασης Διατομών 80
5.2.1.3 Καθορισμός Ενεργού Μήκους και Ενεργών Τυλιγμάτων 81
5.2.2 Μεθοδολογία Ανάλυσης 81
5.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 82
5.3.1 Εισαγωγή 82
5.3.2 Επιλογή Μηχανής με Κριτήριο την Ελάχιστη Μάζα με το Μέγιστο Βαθμό Απόδοσης στη Λειτουργία $T = 10\ Nm$ και $N = 450\ \Sigma A\Lambda$ 82
5.3.2.1 Ανάλυση Μηχανών 82
5.3.2.2 Επιλογή Βέλτιστης Μηχανής 86
5.3.2.3 Ανάλυση Μικρογεωμετρίας Επιλεγμένης Μηχανής 89
5.3.2.4 Επιλογή Βέλτιστης Μηχανής 90
5.3.3 Επιλογή Μηχανής με Κριτήριο την Ελάχιστη Μάζα με το Μέγιστο Βαθμό Απόδοσης στη Λειτουργία $T = 3{,}333\ Nm$ και $N = 1350\ \Sigma A\Lambda$ 98
5.3.3.1 Ανάλυση Μηχανών 98
5.3.3.2 Επιλογή Βέλτιστης Μηχανής 102
5.3.3.3 Ανάλυση Μικρογεωμετρίας Επιλεγμένης Μηχανής 105
5.3.3.4 Επιλογή Βέλτιστης Μηχανής 106
5.3.4 Τελική Επιλογή Μηχανής για Χρήση στο Όχημα 113
5.4 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ 116
5.4.1 Εισαγωγή 116
5.4.2 Επίδραση Αριθμού Ενεργών εν Σειρά Ελιγμάτων στο Χάρτη Απόδοσης της Μηχανής 116
5.4.3 Επίδραση Αριθμού Πόλων στην Απόδοση της Μηχανής για Συγκεκριμένη Ταχύτητα Περιστροφής 117

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ **119**
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 119
6.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 119
6.2.1 Μεθοδολογία 119
6.2.2 Επιλογή Κινητήρα 120
6.3 ΚΥΡΙΟΤΕΡΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 120
6.3.1 Μεθοδολογία Σχεδιασμού 120
6.3.2 Επίδραση Αριθμού Ενεργών εν Σειρά Ελιγμάτων στο Χάρτη Απόδοσης της Μηχανής 120

6.3.3 Επίδραση Αριθμού Πόλων στην Απόδοση της Μηχανής για Συγκεκριμένη Ταχύτητα Περιστροφής 121
6.3.4 Συνεισφορά «Μικρογεωμετρικών» Χαρακτηριστικών στην Απόδοση της Μηχανής 121
6.4 ΠΡΩΤΟΤΥΠΗ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ 121
6.5 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ 122

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 123

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 124

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Κεντρικός σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο σχεδιασμός ενός ηλεκτρικού κινητήρα μονίμων μαγνητών, με όσο το δυνατόν υψηλότερη απόδοση και μικρότερη μάζα, με γνώμονα τη χρήση του στον διαγωνισμό εξοικονόμησης ενέργειας «Shell Eco-Marathon» και συγκεκριμένα στην κατηγορία «Urban Concept». Ο κινητήρας αυτός, εκτός από μικρές απώλειες, θα πρέπει να παρουσιάζει υψηλή πυκνότητα ισχύος και επάρκεια ροπής ώστε το όχημα να ανταποκρίνεται σε μία πληθώρα λειτουργικών σημείων, ανάλογα με το εκάστοτε προφίλ της πίστας. Τα τελικά χαρακτηριστικά του οχήματος δεν είναι προσδιορισμένα με βεβαιότητα, καθώς δεν έχει κατασκευαστεί την περίοδο εκπόνησης της συγκεκριμένης εργασίας. Επομένως, κάθε προσπάθεια εξαγωγής των επιθυμητών επιπέδων απόδοσης για το όχημα, δεν αποτελεί παρά μόνο μία ρεαλιστική εκτίμηση με βάση τα χαρακτηριστικά οχημάτων προγενέστερων διαγωνισμών. Το κινητήριο σύστημα αποτελείται, εκτός από τον κινητήρα, από μία μπαταρία ιόντων λιθίου και έναν αντιστροφέα για την τροφοδότηση της μηχανής, ο οποίος θα μετατρέπει την συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη τάση μεταβλητής συχνότητας.

Στα πλαίσια της μελέτης που διενεργήθηκε, επιλέχθηκε μία συγκεκριμένη τοπολογία μηχανών επιφανειακών μαγνητών (Μ.Ε.Μ) με κατανεμημένο τύλιγμα απλής στρώσης και πραγματοποιήθηκε μια βασική αναζήτηση της βέλτιστης αναλογίας διαστάσεων εξωτερικής ακτίνας και ενεργού μήκους, σε συνδυασμό με τον αριθμό των πόλων για τους σκοπούς της συγκεκριμένης εφαρμογής. Επιπλέον, εξετάστηκαν δύο εναλλακτικές τοπολογίες για το κινητήριο σύστημα που αφορούσαν την ύπαρξη ή μη ενός συστήματος μετάδοσης με λόγο 3:1.

1.2 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

- Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζονται ορισμένα εισαγωγικά στοιχεία με σκοπό να κατατοπισθεί ο αναγνώστης αναφορικά με το περιεχόμενο και την δομή της διπλωματικής αυτής εργασίας
- Στο κεφάλαιο 2, παρουσιάζονται εκτενώς χρήσιμα στοιχεία θεωρίας τα οποία σχετίζονται με το υπόβαθρο της συγκεκριμένης εργασίας. Συγκεκριμένα, ο αναγνώστης μπορεί να βρει πληροφορίες για την τεχνολογία των ηλεκτρικών μηχανών και τις κυριότερες εφαρμογές τους, με ιδιαίτερο ενδιαφέρον την ηλεκτροκίνηση και τον διαγωνισμό «Shell Eco-Marathon». Επιπλέον, μετά από μία σύντομη επισκόπηση του συστήματος ηλεκτρικής κίνησης, μελετώνται εναλλακτικές τοπολογίες μηχανών και συγκρίνονται με την επιλεγμένη τεχνολογία ώς προς τους σκοπούς της συγκεκριμένης εφαρμογής.
- Στο κεφάλαιο 3, εκτιμώνται οι βασικές προδιαγραφές του οχήματος και οι απαιτήσεις του με βάση τους κανονισμούς του διαγωνισμού και την ανάλυση των δυνάμεων που υφίστανται κατά την κίνηση του. Στη συνέχεια, γίνεται μία προσπάθεια προκαταρκτικής σχεδίασης του κινητήρα για τις δύο υποψήφιες

τοπολογίες συστήματος μετάδοσης με βάση κάποιες θεμελιώδεις αρχές σχεδίασης ηλεκτρικών μηχανών.

- Στο κεφάλαιο 4, περιγράφεται ενδελεχώς η μεθοδολογία ανάλυσης για μία μηχανή με δεδομένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, με την βοήθεια του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων FEMM και του προγράμματος MATLAB. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα επιμέρους στάδια στα οποία πραγματοποιείται η ανάλυση της μηχανής καθώς και ορισμένα αναλυτικά μοντέλα στα οποία στηρίχθηκε η εξαγωγή των αποτελεσμάτων για τη μηχανή.
- Στο κεφάλαιο 5, αναλύεται η διαδικασία βελτιστοποίησης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της μηχανής, μέσω της ανάλυσης «νέφους» και περιγράφονται οι βασικές παράμετροι σχεδίασης που εξετάστηκαν κατά την αναζήτηση αυτή. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα λειτουργικά χαρακτηριστικά (ροπή, απώλειες, μάζα, χάρτης απόδοσης κ.α.) των υποψήφιων μηχανών για τις δύο εναλλακτικές τοπολογίες συστήματος μετάδοσης και πραγματοποιείται μία ενεργειακή μελέτη για την τελική σύγκριση μεταξύ τους.
- Στο κεφάλαιο 6, εξάγονται ορισμένα βασικά συμπεράσματα από την προαναφερθείσα μελέτη, όπως η ανάδειξη των κρισιμότερων παραμέτρων σχεδίασης που καθορίζουν την βέλτιστη διαμόρφωση της μηχανής, και αξιολογείται η επιστημονική συνεισφορά της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟ

Ο τομέας της ηλεκτροκίνησης αποτελεί έναν πολλά υποσχόμενο και ταχύτητα αναπτυσσόμενο κλάδο στις σύγχρονες επιστήμες. Τα οφέλη που μπορεί να αποφέρει τόσο σε επίπεδο θέσεων απασχόλησης, τεχνολογικής καινοτομίας και κυριώς προστασίας του περιβάλλοντος είναι αναρίθμητα. Μέχρι σήμερα, λόγω ελλειπούς τεχνολογικής ωριμότητας, οι ηλεκτρικοί κινητήρες έκαναν την εμφάνιση τους κυρίως σε υβριδικά συστήματα κίνησης όπου επικρατεί η συνδυασμένη λειτουργία τους με κάποιον κινητήρα εσωτερικής καύσης. Μάλιστα, τα περισσότερα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα είναι πολύ δύσκολο να κριθούν ανταγωνιστικά σε σύγκριση με το παραδοσιακό αυτοκίνητο που χρησιμοποιεί ως πηγή ενέργειας το καύσιμο. Ωστόσο τα τελευταία χρόνια, ιδιαίτερα με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των μπαταριών, το ηλεκτρικό αυτοκίνητο καθίσταται ολοένα πιο ανταγωνιστικό και αναμένεται να κυριαρχήσει στο μέλλον, με τον κλάδο της ηλεκτροκίνησης να απασχολεί πολυάριθμους μηχανικούς, προγραμματιστές, τεχνίτες κ.α.

Στο πλαίσιο ανάπτυξης του παραπάνω τεχνολογικού κλάδου, αξιοσημείωτες είναι οι δραστηριότητες που αναπτύσσονται εθελοντικά από φοιτητικές ομάδες πάνω στο τομέα της ηλεκτροκίνησης, με σκοπό τη συμμετοχή σε διαγωνισμούς εξοικονόμησης ενέργειας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο διαγωνισμός «Shell Eco-Marathon», στον οποίο κάθε διαγωνιζόμενη ομάδα έχει ως σκοπό την ανάπτυξη ενός οχήματος το οποίο θα διανύσει μία προκαθορισμένη διαδρομή καταναλώνοντας όσο το δυνατόν λιγότερη ενέργεια. Σημαντικό χαρακτηριστικό αυτού του διαγωνισμού είναι το γεγονός πως οι συμμετέχουσες ομάδες έχουν τη δυνατότητα να επιλέξουν ανάμεσα σε δύο κλάσεις οχήματος:

- Prototype: Μονοθέσια οχήματα πολύ μικρού βάρους, συνήθως με 3 τροχούς.
- Urban Concept: Όχημα τεσσάρων τροχών, με χαρακτηριστικά όμοια ενός μικρού αυτοκινήτου πόλης.

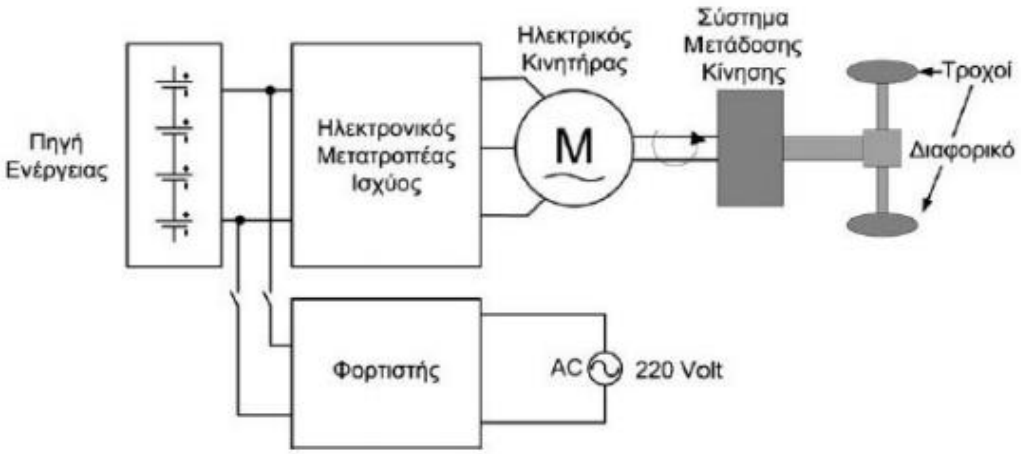
Οι δύο αυτοί τύποι οχήματος παρουσιάζονται στο σχήμα 2.1.

Σχήμα 2.1 – Αριστερά: Prototype, Δεξιά: Urban Concept

Στο σχήμα 2.1 φαίνεται το όχημα «Πυρφόρος», το οποίο έχει κατασκευαστεί από την φοιτητική ομάδα «Προμηθέας» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και το οποίο συμμετέχει στη κατηγορία πρωτοτύπων ηλεκτρικών οχημάτων με συσσωρευτές (plug-in prototype). Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, μελετάται η σχεδίαση της κινητήριας μονάδας για τη κατασκευή ενός οχήματος στα πρότυπα της κατηγορίας «Urban Concept».

2.1.1 Επισκόπηση συστήματος κίνησης ηλεκτρικού οχήματος

Τα βασικότερα στοιχεία του συστήματος κίνησης σε ένα ηλεκτρικό όχημα διακρίνονται στο σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2 – Εποπτικό διάγραμμα συστήματος κίνησης σε ένα ηλεκτρικό όχημα

Τα σημαντικότερα στοιχεία της παραπάνω επισκόπησης αποτελούν:

<u>Πηγή Ηλεκτρικής Ενέργειας</u>

Το τμήμα αυτό τροφοδοτεί με ενέργεια το υπόλοιπο σύστημα. Η παραδοσιακή πηγή ενέργειας στα ηλεκτρικά οχήματα είναι οι ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές, με τις βασικότερες κατηγορίες μπαταριών να είναι μολύβδου – οξέος, νικελίου μετάλλου – υδριδίου και ιόντων λιθίου. Σκοπός της κάθε τεχνολογίας μπαταριών είναι η ανάγκη για μεγαλύτερο αριθμό κύκλων φόρτισης – εκφόρτισης καθώς και για μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας (Wh/kg), κάτι το οποίο αποτελεί και την μεγαλύτερη πρόκληση για την περαιτέρω ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης. Σημαντικό κομμάτι λειτουργίας της μπαταρίας είναι η φόρτιση της, η οποία συνήθως πραγματοποιείται από κάποια εξωτερική πηγή τροφοδοσίας, ακόμη και από οικιακή παροχή, με την ισχύ φόρτισης να ποικίλει ανάλογα με την περίπτωση. Επιπλέον, ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας του οχήματος, είναι δυνατόν οι συσσωρευτές να αποθηκεύουν ενέργεια από την αξιοποίηση της κινητικής ενέργειας των τροχών μέσω αναγεννητικής πέδησης. Η δυνατότητα αυτή μερικής επαναφόρτισης της μπαταρίας θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για την λειτουργία των υβριδικών οχημάτων, όπου εκτός από το σύστημα ηλεκτρικής κίνησης συνυπάρχει και η κλασική πηγή ενέργειας σε μορφή καυσίμου.

Ηλεκτρονικός Μετατροπέας Ισχύος

Το τμήμα αυτό είναι υπεύθυνο για την κατάλληλη μετατροπή της συνεχούς τάσης της πηγής – μπαταρίας σε εναλλασσόμενη τάση επιθυμητής συχνότητας ώστε να μπορεί να τροφοδοτηθεί ο ηλεκτρικός κινητήρας και να μπορεί να ελεγχθεί η ταχύτητα και η αναπτυσσόμενη ροπή της μηχανής. Ο μετατροπέας αυτός αποτελείται από μία μονάδα ηλεκτρονικών ισχύος, με κυριότερο εκπρόσωπο τον τριφασικό αντιστροφέα με ημιγέφυρες που επιτρέπει την αμφίδρομη ροή ισχύος, καθώς και έναν ψηφιακό επεξεργαστή σήματος (DSP) για τον έλεγχο του.

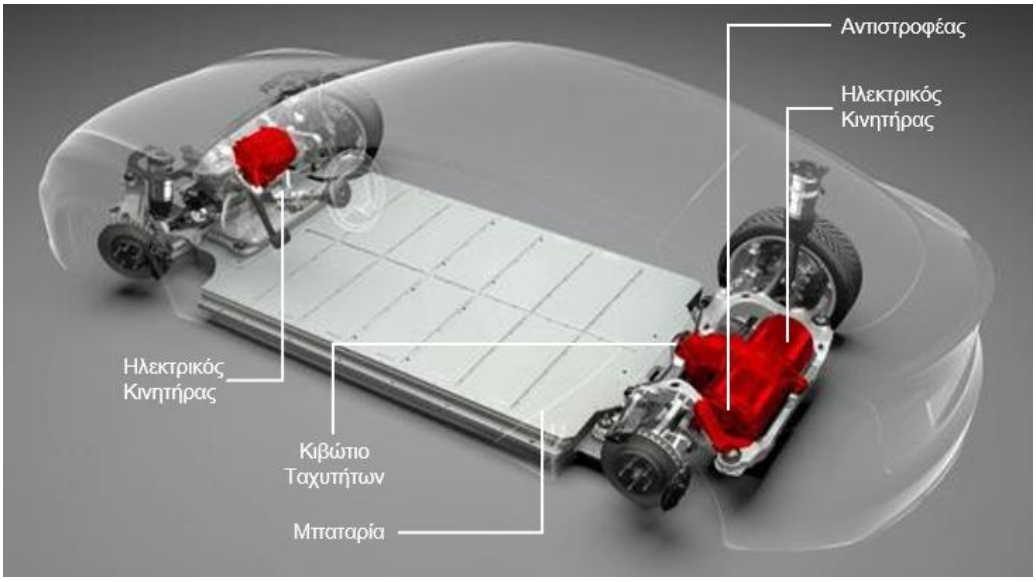
Ηλεκτρικός Κινητήρας

Η ηλεκτρική μηχανή αποτελεί την καρδιά του συστήματος κίνησης του αυτοκινήτου, αφού αποτελεί το μέσο εκείνο που αξιοποιώντας την ηλεκτρική ενέργεια της μπαταρίας, συνεισφέρει στην παραγωγή της απαραίτητης μηχανικής ενέργειας για την κίνηση του οχήματος. Ο κινητήρας αυτός πρέπει να παρουσιάζει αυστηρές προδιαγραφές ως προς το μέγεθος, το βάρος, τη μηχανική και θερμική αντοχή του, καθώς και ως προς τα χαρακτηριστικά απόδοσης και επίδοσης. Οι συνηθέστερες επιλογές ηλεκτρικού κινητήρα σήμερα, είναι οι μηχανές επαγωγής και οι σύγχρονες μηχανές. Το κομμάτι αυτό του συστήματος κίνησης αποτελεί το βασικό αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

Σύστημα Μετάδοσης Κίνησης

Το μηχανολογικό αυτό τμήμα του οχήματος είναι υπεύθυνο για την μετάδοση της κίνησης από τον άξονα του κινητήρα στους τροχούς μετά από κατάλληλη προσαρμογή της ταχύτητας και της ροπής. Σημειώνεται πως σε ένα ηλεκτρικό όχημα δεν υπάρχει η ανάγκη πλήρους αποσύμπλεξης του κινητήρα από τους τροχούς καθώς ο ηλεκτρικός κινητήρας δεν παρουσιάζει κάποιο τεχνικό ελάχιστο στροφών λειτουργίας και μπορεί να πραγματοποιήσει εκκίνηση από απολύτως μηδενική ταχύτητα περιστροφής. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει συνήθως ένα κιβώτιο ταχυτήτων με συγκεκριμένο λόγο μετάδοσης, έτσι ώστε η απαίτηση σε ροπή στον κινητήρα να είναι μικρότερη από ότι στους τροχούς και να μπορεί να επιτευχθεί μικρότερη διαστασιολόγηση της μηχανής. Επιπλέον ενδέχεται να υπάρχει κάποιο διαφορικό το οποίο μεταδίδει την κίνηση στους δύο τροχούς του αυτοκινήτου.

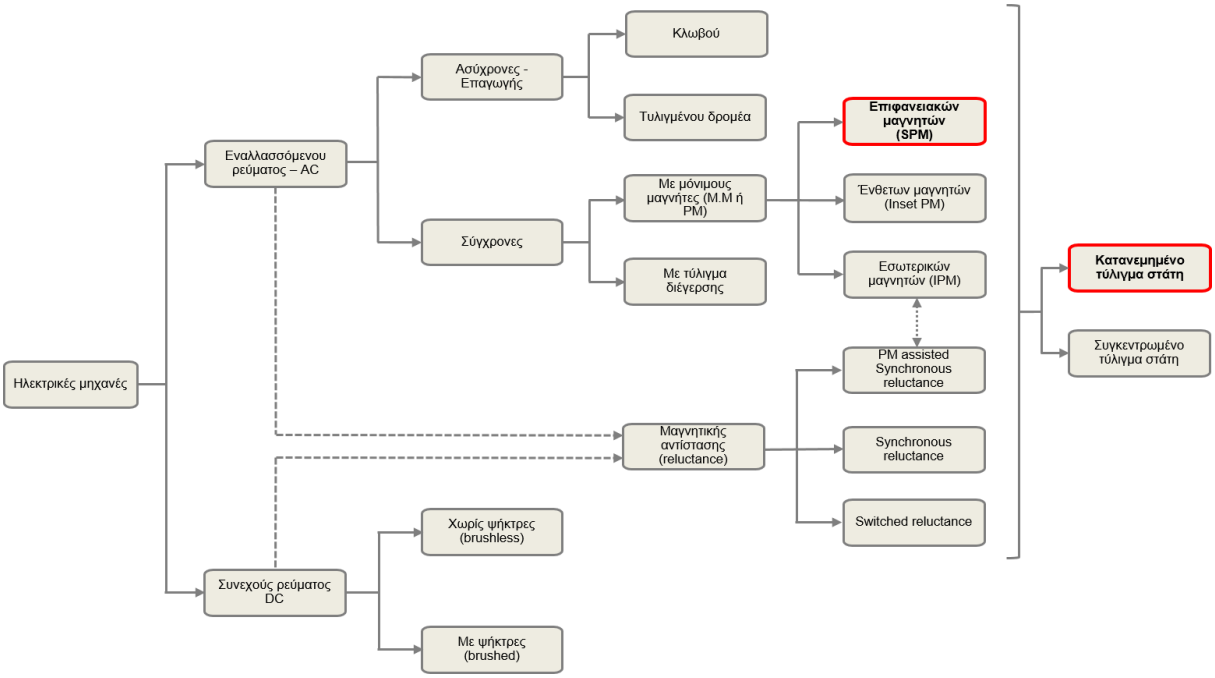
Η χωροθέτηση των παραπάνω συστημάτων παρουσιάζεται ενδεικτικά στο σχήμα 2.3 για ένα τυπικό ηλεκτρικό όχημα. Το συγκεκριμένο όχημα (Tesla Model S) χρησιμοποιεί μπαταρία ιόντων λιθίου ως πηγή ενέργειας, ενώ διαθέτει δύο κινητήρια συστήματα, ένα εμπρός κι ένα πίσω που χρησιμεύουν για τετρακίνηση. Για την οδήγηση των κινητήρων χρησιμοποιείται αντιστροφέας και για την μετάδοση της ροπής στους τροχούς κιβώτιο ταχυτήτων σταθερής σχέσης μετάδοσης.



Σχήμα 2.3 – Ενδεικτική χωροθέτηση υποσυστημάτων σε ηλεκτρικό όχημα (Tesla Model S)

2.2 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Το εύρος των εφαρμογών για τις οποίες είναι δυνατόν να αξιοποιηθεί η τεχνολογία των ηλεκτρικών μηχανών είναι εξαιρετικά ευρύ. Ωστόσο, ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής, διαφορετική τοπολογία μηχανών μπορεί να κριθεί ως η καταλληλότερη κάθε φορά, λόγω των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων που μπορεί να παρουσιάζει η καθεμία. Η κυριότερη κατηγοριοποίηση των ηλεκτρικών μηχανών απεικονίζεται στο σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4 – Εποπτικό διάγραμμα κατηγοριοποίησης ηλεκτρικών μηχανών με σημειωμένη (με κόκκινο) την επιλογή τεχνολογίας για τη παρούσα εφαρμογή

Σύμφωνα με το σχήμα 2.4, η κυριότερη κατηγοριοποίηση των ηλεκτρικών μηχανών αφορά την τροφοδότηση των τυλιγμάτων τους με συνεχές ρεύμα (DC) ή εναλλασσόμενο ρεύμα (AC). Συνήθως για εφαρμογές που απαιτούν υψηλές επιδόσεις και ισχύ, επικρατέστερη επιλογή αποτελούν οι AC μηχανές, ενώ DC μηχανές συναντώνται συχνά σε συσκευές μικρής ισχύος και βοηθητικού συνήθως χαρακτήρα. Αναφορικά με τις μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος, δύο πολύ βασικά είδη μηχανών αποτελούν οι ασύγχρονες ή μηχανές επαγωγής και οι σύγχρονες μηχανές. Οι τελευταίες, ανάλογα με το είδος της διέγερσης τους, διακρίνονται σε εκείνες που διαθέτουν τύλιγμα στο δρομέα και σε εκείνες που διαθέτουν μόνιμους μαγνήτες. Με κόκκινο χρώμα σημειώνεται η επιλεχθείσα κατηγορία μηχανής (Μονίμων Επιφανειακών Μαγνητών) για την εφαρμογή που μελετάται, καθώς και το είδος του τυλίγματος στον στάτη. Σημειώνεται ότι οι παραπάνω ηλεκτρικές μηχανές διαθέτουν τη δυνατότητα λειτουργίας είτε ως γεννήτριες, όπου η μηχανική ενέργεια από κάποιο κινητήριο σύστημα μετατρέπεται σε ηλεκτρική, είτε ως κινητήρες όπου η ηλεκτρομηχανική μετατροπή συμβαίνει με τον ακριβώς αντίθετο τρόπο, δηλαδή σκοπός τους είναι η αξιοποίηση μίας ηλεκτρικής πηγής τροφοδοσίας για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας. Για τους σκοπούς του αντικειμένου της παρούσας διπλωματικής εργασίας, μελετάται η λειτουργία των παραπάνω μηχανών ως κινητήριες μονάδες.

Αναλυτικότερα, οι βασικότερες κατηγορίες κινητήρων είναι:

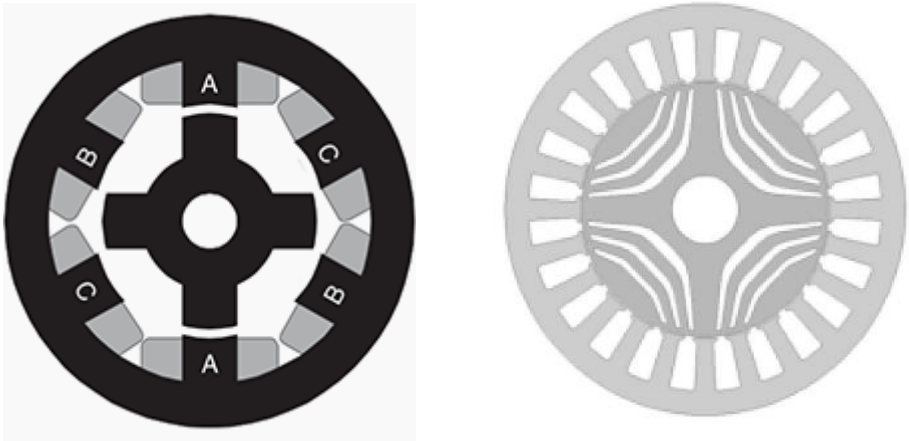
<u>Κινητήρας Συνεχούς Ρεύματος (Brushed DC)</u>

Οι μηχανές αυτές διακρίνονται για την απλότητα του ελέγχου τους, ενώ είναι κατάλληλες για ρύθμιση ταχύτητας. Επιπλέον, το γεγονός ότι ο συνδυασμός μίας μηχανής Σ.Ρ. με τον αντίστοιχο μετατροπέα είναι σημαντικά φθηνότερος από τον αντίστοιχο για μία μηχανή Ε.Ρ., την καθιστούσαν προτιμητέα σε εφαρμογές βιομηχανίας, απλές συσκευές κ.τ.λ. Ωστόσο, η ανάγκη τους για συντήρηση και αντικατάσταση των ψηκτρών ανά τακτά χρονικά διαστήματα, οδήγησαν στην «εξάλειψη» τους σε εφαρμογές με απαίτηση αξιοπιστίας και μειωμένης ανάγκης συντήρησης. Παράλληλα, η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος και των μικροεπεξεργαστών έφερε ως αποτέλεσμα την ύπαρξη κινητήρων χωρίς σύστημα συλλέκτη και ψηκτρών (Brushless DC).

<u>Κινητήρας Μαγνητικής Αντίστασης (Synchronous ή Switched Reluctance)</u>

Ένα άλλο είδος μηχανής, το οποίο μπορεί να ανήκει είτε στην κατηγορία των AC μηχανών είτε των DC μηχανών, εφόσον τροφοδοτούνται με ρεύματα μορφής τετραγωνικών παλμών (για αυτό και σημειώνεται με διακεκομμένα βέλη στο σχήμα 2.4), είναι ο κινητήρας μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης. Στις μηχανές αυτές, η παραγωγή ροπής οφείλεται αποκλειστικά στη συνιστώσα εκτυπότητας (reluctance torque) και όχι στη αλληλεπίδραση δύο πεδίων. Η ροπή αυτή αποκαλείται συχνά ροπή ευθυγράμμισης. Οι μηχανές αυτές παρουσιάζουν τα πλεονεκτήματα της απλότητας κατασκευής και του μικρού κόστους, ενώ ενδείκνυνται για εφαρμογές όπου απαιτείται εφεδρεία και αντοχή σε σφάλματα. Ωστόσο, οι μηχανές αυτές έχουν μικρή πυκνότητα ισχύος, περιορισμένο βαθμό απόδοσης, μεγάλη κυμάτωση ροπής και απαιτούν σύνθετες τεχνικές ελέγχου. Τα πιο σημαντικά είδη μηχανών που υπάγονται στη κατηγορία αυτή είναι η μηχανή Switched Reluctance (DC τροφοδοσία) και η Synchronous Reluctance (AC τροφοδοσία), όπου μέσω ειδικής διαμόρφωσης του

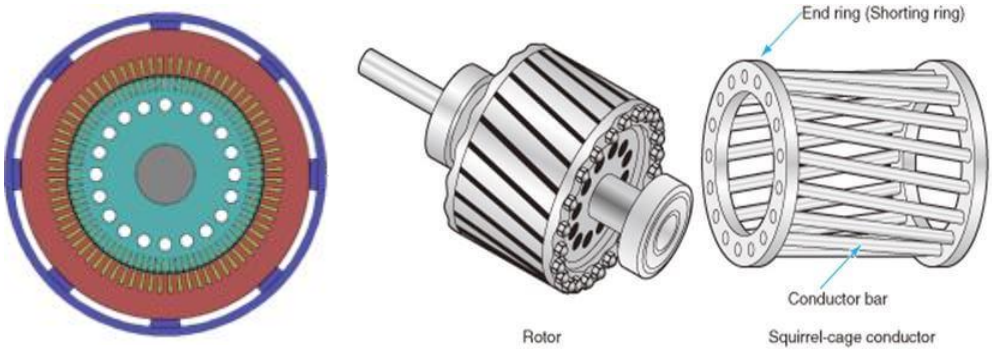
δρομέα επιτυγχάνεται ομαλή μεταβολή της μαγνητικής αντίστασης, μειώνοντας την κυμάτωση ροπής και τον θόρυβο. Συχνά οι τελευταίες υποβοηθούνται από μόνιμους μαγνήτες στο δρομέα (PM assisted) και αποτελούν ουσιαστικά σύγχρονες μηχανές.



Σχήμα 2.5 – Αριστερά: Switched Reluctance Motor
Δεξιά: Synchronous Reluctance Motor

Κινητήρας Επαγωγής (Induction Machine – IM)

Ο κινητήρας επαγωγής (ασύγχρονος) αποτελεί μία από τις συνηθέστερες επιλογές στα συστήματα ηλεκτροκίνησης, λόγω του εύκολου ελέγχου και της υψηλής αξιοπιστίας. Επιπλέον, ένα σημαντικό πλεονέκτημα τους έναντι άλλων μηχανών είναι ότι δεν χρειάζονται κάποιο ειδικό σύστημα διέγερσης στο δρομέα με το μειονέκτημα όμως πως δεν ρυθμίζουν οι ίδιες τον συντελεστή ισχύος τους (απορροφούν πάντα άεργο ισχύ). Υπάρχουν δύο εναλλακτικές διαμορφώσεις ως προς τον δρομέα. Στην πρώτη, ο δρομέας εφοδιάζεται με τριφασικό τύλιγμα αντίστοιχο του στάτη (κινητήρας τυλιγμένου δρομέα), ενώ στη δεύτερη, η οποία και έχει επικρατήσει, ο δρομέας αποτελείται από μεταλλικές ράβδους βραχυκυκλωμένες στα άκρα (τύλιγμα κλωβού). Για την οδήγηση αυτών των κινητήρων απαιτείται διάταξη αντιστροφέα με δυνατότητα μεταβολής της συχνότητας τροφοδοσίας για έλεγχο της ταχύτητας.



Σχήμα 2.6– Κινητήρας επαγωγής: Αριστερά: διατομή, Δεξιά: δρομέας και τύλιγμα κλωβού

Σύγχρονος Κινητήρας Μονίμων Μαγνητών (Σ.Κ.Μ.Μ.)

Η βασικότερη κατηγορία μηχανών που έχει επικρατήσει πλέον είναι εκείνη των σύγχρονων μηχανών που αντί για τύλιγμα διέγερσης διαθέτουν μόνιμους μαγνήτες

στο δρομέα τους, επιτυγχάνοντας μείωση των απωλειών χαλκού και την απουσία ψηκτρών, που συνεπάγεται αύξηση της αξιοπιστίας. Συγκεκριμένα, οι Σ.Κ.Μ.Μ. αποτελούν άκρως ελκυστική τεχνολογία στα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης καθώς εμφανίζουν εξαιρετικά υψηλό βαθμό απόδοσης, μεγάλη πυκνότητα ισχύος που επιφέρει μειωμένη μάζα του κινητήρα, καθώς και μειωμένη κυμάτωση ροπής. Αντίθετα, σημαντικό μειονέκτημα αποτελεί το κόστος των μηχανών αυτών, λόγω του κόστους των μαγνητών και της πολύπλοκης διαμόρφωσης του δρομέα, προκειμένου να συγκρατηθούν οι μόνιμοι μαγνήτες σε υψηλές ταχύτητες. Παράλληλα, υπάρχει ο κίνδυνος μόνιμης ή προσωρινής απομαγνήτισής τους, είτε λόγω υψηλών θερμοκρασιών είτε λόγω ρευμάτων βραχυκύκλωσης. Ωστόσο, η ωρίμανση της τεχνολογίας των μαγνητών, με κυριότερο «εκπρόσωπο» τους μαγνήτες Νεοδυμίου και κράματος Νεοδυμίου – Σιδήρου – Βορίου (NdFeB), καθιστά αυτήν την τοπολογία μηχανών ακόμα πιο συμφέρουσα. Όσον αφορά την τροφοδότηση των σύγχρονων κινητήρων, το σύστημα οδήγησης τους αποτελείται από έναν τριφασικό αντιστροφέα που επιβάλλει ημιτονοειδή τάση επιθυμητής (μεταβλητής) συχνότητας. Τέλος, ανάλογα με την διαμόρφωση των μαγνητών στο δρομέα, διακρίνονται σε τρεις ακόμα επιμέρους κατηγορίες που παρουσιάζονται παρακάτω.

2.2.1 Επιλογή Τελικής Τοπολογίας Μηχανής Μονίμων Μαγνητών

Στο επόμενο πίνακα παρουσιάζεται ενδεικτικά η αξιολόγηση των παραπάνω βασικών κατηγοριών μηχανών, με βάση στοιχεία βιβλιογραφίας, για τα κριτήρια που είναι σημαντικότερα για τους σκοπούς της συγκεκριμένης εφαρμογής:

	Κινητήρας DC	Κινητήρας Επαγωγής	**Σ.Κ.Μ.Μ**	Κινητήρας Reluctance
Πυκνότητα Ισχύος	Χαμηλή	Καλή	**Υψηλή**	Χαμηλή
Απόδοση	Χαμηλή	Καλή	**Υψηλή**	Χαμηλή
Αξιοπιστία	Χαμηλή	Υψηλή	**Καλή**	Υψηλή
Έλεγχος	Πολύ εύκολος	Εύκολος	**Εύκολος**	Σύνθετος

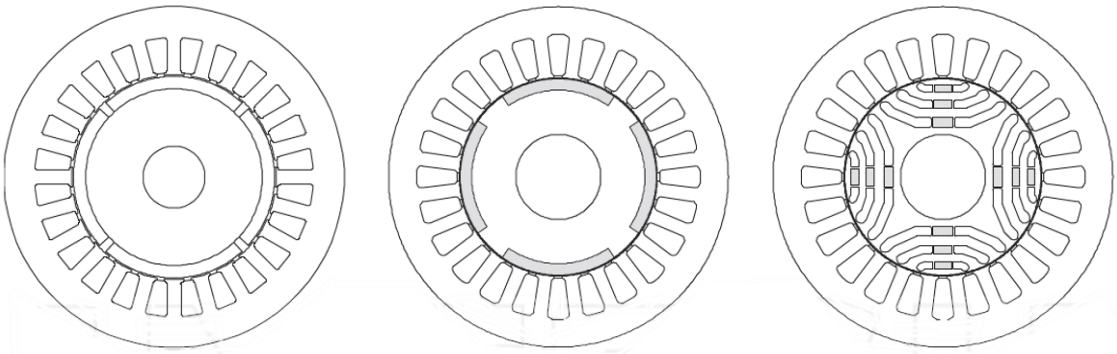
Πίνακας 2.7– Αξιολόγηση των βασικότερων κατηγοριών μηχανών

Για τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής εργασίας και του αντικειμένου στο οποίο επικεντρώνεται, το κριτήριο της απόδοσης και της πυκνότητας ισχύος θεωρούνται τα πιο σημαντικά, εφόσον το όχημα για το οποίο προορίζεται ο σχεδιασμός του κινητήρα πρόκειται να συμμετάσχει σε διαγωνισμό εξοικονόμησης ενέργειας. Συγκεκριμένα, κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικό ο κινητήρας αυτός να μπορεί να επιτύχει τον στόχο επίδοσης με την μικρότερη δυνατή μάζα, δηλαδή να έχει υψηλή πυκνότητα ισχύος, και να απαιτεί όσο το δυνατόν λιγότερη ενέργεια για να διανύσει το όχημα μία δεδομένη διαδρομή, κάτι που γίνεται εφικτό με την αύξηση της απόδοσης του κινητήριου συστήματος. Επομένως, σύμφωνα με τα παραπάνω κριτήρια, η εργασία αυτή επικεντρώνεται στις μηχανές μονίμων μαγνητών. Ωστόσο, άξιες αναφοράς είναι οι διάφορες τοπολογίες μονίμων μαγνητών στο δρομέα της μηχανής, οι οποίες είναι αντίστοιχα:

- Επιφανειακοί Μόνιμοι Μαγνήτες – Ε.Μ.Μ. (Surface Permanent Magnets – SPM)
- Ένθετοι Μόνιμοι Μαγνήτες (Inset Permanent Magnets)

- Εσωτερικοί Μόνιμοι Μαγνήτες (Interior Permanent Magnets – IPM)

Οι παραπάνω κατηγορίες μονίμων μαγνητών φαίνονται ενδεικτικά για μία 4-πολική μηχανή στο σχήμα 2.8.



Σχήμα 2.8 – Σ.Κ.Μ.Μ: Αριστερά: Επιφανειακών Μαγνητών, Μέση: Ένθετων Μαγνητών, Δεξιά: Εσωτερικών Μαγνητών

2.2.1.1 Αξιολόγηση Εναλλακτικών Διαμορφώσεων Μαγνητών

Επιφανειακοί Μόνιμοι Μαγνήτες (SPM)

Σε αυτή την τοπολογία, οι μαγνήτες τοποθετούνται στην επιφάνεια του δρομέα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8, και αποτελούν την πιο απλή και συνήθη εφαρμογή στις σύγχρονες μηχανές. Το κυριότερο πλεονέκτημα τους είναι το γεγονός πως παρουσιάζουν μεγάλη απλότητα στη κατασκευή, με μείωση του κατασκευαστικού κόστους. Παράλληλα, παρουσιάζουν υψηλές επιδόσεις και πυκνότητα ισχύος, αφού οι μαγνήτες βρίσκονται πολύ κοντά στο διάκενο, όπου λαμβάνει χώρα η ανάπτυξη της ροπής στη μηχανή και άρα αξιοποιούνται σε μέγιστο βαθμό οι μαγνητικές τους ιδιότητες. Σημαντικό χαρακτηριστικό αυτών των μηχανών είναι το γεγονός ότι καθώς η μαγνητική διαπερατότητα του μαγνήτη δε διαφέρει πολύ από εκείνη του αέρα, παρουσιάζεται η ελάχιστη δυνατή εκτυπότητα, και άρα η κυριαρχούσα συνιστώσα ανάπτυξης ροπής, είναι εκείνη της αλληλεπίδρασης των πεδίων στάτη και δρομέα. Επιπλέον, καθώς η εκτυπότητα είναι ελάχιστη, οι αυτεπαγωγές ορθού και κάθετου άξονα είναι περίπου ίδιες και η μεγιστοποίηση της ροπής συμβαίνει για εσωτερική γωνία ροπής κοντά στις 90 ηλεκτρικές μοίρες. Ωστόσο, σημαντικό μειονέκτημα της διαμόρφωσης αυτής είναι πως οι μαγνήτες βρίσκονται εκτεθειμένοι και ιδιαίτερα σε υψηλότερες ταχύτητες υπάρχει ο κίνδυνος αποκόλλησης τους, λόγω φυγόκεντρων δυνάμεων.

Ένθετοι Μόνιμοι Μαγνήτες (Inset)

Ομοίως με την τοπολογία SPM μηχανών, οι ένθετοι μόνιμοι μαγνήτες τοποθετούνται στην επιφάνεια του δρομέα, με την βασική διαφορά ότι τα κενά μεταξύ των μαγνητών καλύπτονται από σίδηρο, όπως μπορεί να φανεί στο σχήμα 2.8. Οι μικρές αυτές γέφυρες σιδήρου (iron bridges) είναι υπεύθυνες για την αύξηση της εκτυπότητας του δρομέα, προσθέτοντας μία δεύτερη συνιστώσα ροπής στη μηχανή (reluctance torque), αλλά ταυτόχρονα συμβάλλουν στην αύξηση των σκεδάσεων της ροής, με αποτέλεσμα την ελλιπή αξιοποίηση του πεδίου του μαγνήτη για παραγωγή ροπής.

Εσωτερικοί Μόνιμοι Μαγνήτες (IPM)

Στις μηχανές αυτές, οι μόνιμοι μαγνήτες τοποθετούνται στο εσωτερικό του σιδήρου του δρομέα. Μάλιστα υπάρχουν πολλές εναλλακτικές διαμορφώσεις για τους εσωτερικούς μόνιμους μαγνήτες όπως τμηματικοί (segmented) μαγνήτες, μαγνήτες σε διάταξη V, πολυστρωματικοί με φράγματα ροής αέρα κ.α. Το τελευταίο είδος μπορεί να φανεί στο σχήμα 2.8. Σημαντικό χαρακτηριστικό των παραπάνω διαμορφώσεων είναι η έντονη συνιστώσα εκτυπότητας που προστίθεται στη μηχανή. Αξίζει να αναφερθεί πως η μεγιστοποίηση της ροπής (λόγω εκτυπότητας) πλέον δε συμβαίνει στις 90 ηλεκτρικές μοίρες για τη γωνία ροπής, αλλά μπορεί να φτάνει μέχρι και τις 140 – 150 ηλεκτρικές μοίρες. Αυτό σημαίνει πως η συνιστώσα του πεδίου είναι χαμηλότερη σε σχέση με την αντίστοιχη μίας μηχανής SPM, με αποτέλεσμα να μπορεί να λειτουργήσει σε μεγαλύτερο εύρος ταχυτήτων υπό σταθερή ροπή χωρίς να χρειάζεται να εξασθενήσει περαιτέρω το πεδίο (field weakening). Στην περίπτωση των εσωτερικών μαγνητών, αυτοί είναι περισσότερο προστατευμένοι σε σχέση με τους επιφανειακούς, αλλά εισάγεται μεγάλη πολυπλοκότητα κατασκευής και αύξηση κόστους.

Στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής εργασίας, προτιμήθηκε να μελετηθεί η Σύγχρονη Μηχανή Επιφανειακών Μόνιμων Μαγνητών (Σ.Μ. Ε.Μ.Μ.) – SPM, λόγω απλότητας κατασκευής και ανάγκης για υψηλή πυκνότητα ισχύος. Επιπλέον, καθώς οι ταχύτητες περιστροφής που εξετάζονται για τη μηχανή δεν είναι πολύ υψηλές δεν εγκυμονεί μεγάλος κίνδυνος για αποκόλληση των μαγνητών. Τέλος, πέρα από το γεγονός ότι η κυμάτωση ροπής είναι μικρότερη εν γένει για μία μηχανή επιφανειακών μαγνητών, είναι κρίσιμο το γεγονός πως η ταχύτητα βάσης (base speed), δηλαδή η ταχύτητα για την οποία η επαγόμενη τάση γίνεται ίση με την επιβαλλόμενη, είναι αρκετά χαμηλή (ίση με την ονομαστική ταχύτητα περιστροφής για μία σωστή σχεδίαση). Επομένως, καθώς η ονομαστική ταχύτητα περιστροφής για τη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι σχετικά χαμηλή, αν η επιλεχθείσα μηχανή ήταν εσωτερικών μαγνητών, θα απαιτούνταν υψηλότερος αριθμός τυλιγμάτων για μία σωστή σχεδίαση, αυξάνοντας την πολυπλοκότητα της.

Στον πίνακα 2.9 απεικονίζονται ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα από την επιλογή της SPM μηχανής:

Πλεονεκτήματα SPM	Μειονεκτήματα SPM
1. Απλότητα κατασκευής	1. Ελλιπής προφύλαξη μαγνητών
2. Πυκνότητα ισχύος	2. Μεγαλύτερη ποσότητα μαγνήτη
3. Χαμηλή κυμάτωση ροπής	
4. Κατάλληλη για σχεδίαση σε χαμηλές ταχύτητες	

Πίνακας 2.9 – Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σχεδίασης μηχανής επιφανειακών μαγνητών

2.2.2 Τύλιγμα Στάτη

Αναφορικά με το τύλιγμα του στάτη, υπάρχει μία σημαντική κατηγοριοποίηση του ανάλογα με το τρόπο που αυτό διανέμεται στις αύλακες της μηχανής. Κάθε διαμόρφωση τυλίγματος παρουσιάζει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

2.2.2.1 Τριφασικό Τύλιγμα με Επικάλυψη Μεταξύ των Φάσεων

Απλό μη Διανεμημένο Τύλιγμα

Συχνά το τύλιγμα αυτό αναφέρεται ως «κλασικό συγκεντρωμένο τύλιγμα πλήρους βήματος». Αυτό σημαίνει ότι οι σπείρες μίας φάσης διέρχονται από ένα μόνο αυλάκι ανά πόλο, δηλαδή οι σπείρες «συγκεντρώνονται» στο ίδιο αυλάκι, με αποτέλεσμα όλα τα ελίγματα του πηνίου μίας φάσης να έχουν τον ίδιο μαγνητικό άξονα ανά ζεύγος πόλων. Η παραπάνω διαμόρφωση αποτελεί την απλούστερη τοπολογία τυλίγματος, αλλά δε δίνει καλά αποτελέσματα ως προς το αρμονικό περιεχόμενο του πεδίου στο διάκενο.

Κατανεμημένο Τύλιγμα Πλήρους Βήματος

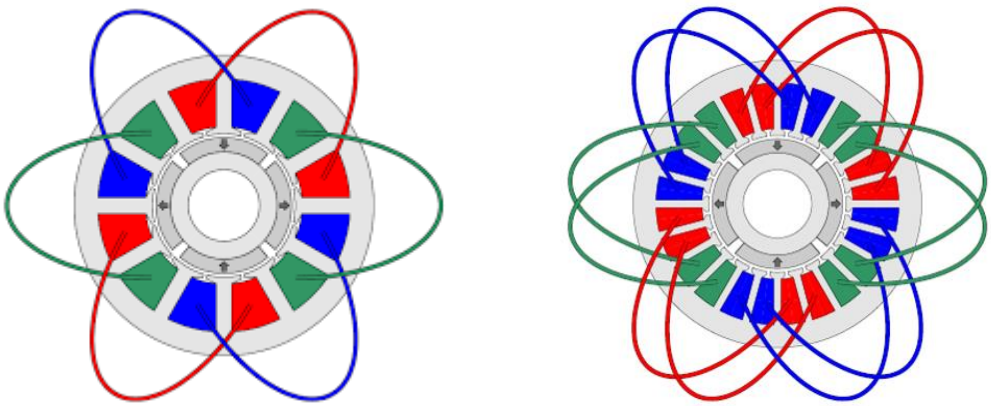
Μία βελτιωμένη εκδοχή του συγκεντρωμένου τυλίγματος, αποτελεί το κατανεμημένο ή διανεμημένο τύλιγμα πλήρους βήματος, όπου οι σπείρες μίας φάσης ανά πόλο διανέμονται σε περισσότερες από μία διαδοχικές αύλακες. Στην περίπτωση αυτή, ορίζεται το μέγεθος q, το οποίο αποκαλείται αριθμός ομάδων πηνίων, και εκφράζει ουσιαστικά τον αριθμό των διαδοχικών αυλάκων ανά πόλο και φάση που τροφοδοτούνται από τα πηνία της ίδια φάσης. Ο συνολικός αριθμός των αυλάκων της μηχανής σε αυτή τη περίπτωση είναι:

$$Q = m \cdot q \cdot P \tag{2.1}$$

Όπου m οι φάσεις της μηχανής και P ο αριθμός των πόλων της. Αξίζει να σημειωθεί πως η κατανομή του τυλίγματος σε διαδοχικές αύλακες μειώνει σε μεγάλο βαθμό το αρμονικό περιεχόμενο, συμβάλλοντας στην ημιτονικότητα του πεδίου, αλλά με τίμημα μία μικρή απομείωση της θεμελιώδους συνιστώσας της μαγνητεγερτικής δύναμης (ΜΕΔ). Συγκεκριμένα, ο συντελεστής πλάτους που δίνει την απομείωση αυτή λόγω κατανεμημένου τυλίγματος είναι:

$$k_b = \frac{\sin\left(\frac{q\gamma}{2}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)} \tag{2.2}$$

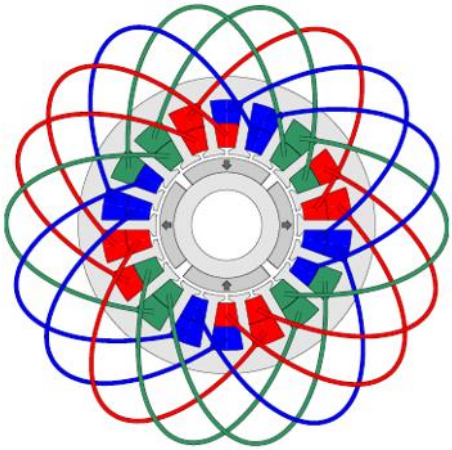
Όπου q οι ομάδες πηνίων και γ το βήμα αύλακος σε ηλεκτρικές μοίρες. Στο σχήμα 2.10 διακρίνονται οι δύο τοπολογίες που αναφέρθηκαν παραπάνω, ενδεικτικά για μία τετραπολική μηχανή $Q = 12$ αυλάκων για απλό μη διανεμημένο τύλιγμα, και $Q = 24$ αυλάκων για το κατανεμημένο τύλιγμα πλήρους βήματος.



Σχήμα 2.10 – Αριστερά: Ενδεικτικό παράδειγμα κλασικού συγκεντρωμένου τυλίγματος πλήρους βήματος
Δεξιά: Ενδεικτικό παράδειγμα κατανεμημένου τυλίγματος πλήρους βήματος

Κατανεμημένο Τύλιγμα Κλασματικού Βήματος

Μία άλλη τεχνική βελτίωσης της ημιτονικότητας του πεδίου, είναι η κατανομή των πηνίων μίας φάσης σε πολλαπλά στρώματα εντός μίας αύλακας. Αυτή η διαμόρφωση οδηγεί σε μία υποκατηγορία του κατανεμημένου τυλίγματος το οποίο είναι το κατανεμημένο τύλιγμα κλασματικού βήματος. Σε αυτήν την περίπτωση, είναι δυνατόν σε κάποιες αύλακες να υπάρχουν σπείρες διαφορετικής φάσης σε κάθε στρώση. Μία τέτοια διαμόρφωση τυλίγματος φαίνεται ενδεικτικά στο σχήμα 2.11 για έναν στάτη δύο στρώσεων ανά αύλακα με $Q = 18$ αυλάκια και $q = 3/2$:



Σχήμα 2.11– Ενδεικτικό παράδειγμα κατανεμημένου τυλίγματος κλασματικού βήματος 2 στρώσεων ανά αύλακα: Q=18 αυλάκια, q=3/2

Ομοίως με τη κατανομή του τυλίγματος σε διαδοχικές αύλακες, το κλασματικό βήμα προκαλεί και εκείνο απομείωση της θεμελιώδους συνιστώσας πεδίου στο διάκενο, η οποία δίνεται από τον παρακάτω συντελεστή βήματος:

$$k_p = \cos\left(\frac{\pi - \rho}{2}\right) \tag{2.3}$$

Όπου ρ, η γωνία του κλασματικού βήματος σε ηλεκτρικές μοίρες. Επομένως, διαμορφώνεται ο συντελεστής τυλίγματος, μέσω του συντελεστή πλάτους και του συντελεστή βήματος, με τον εξής τρόπο:

$$k_w = k_b \cdot k_p \tag{2.4}$$

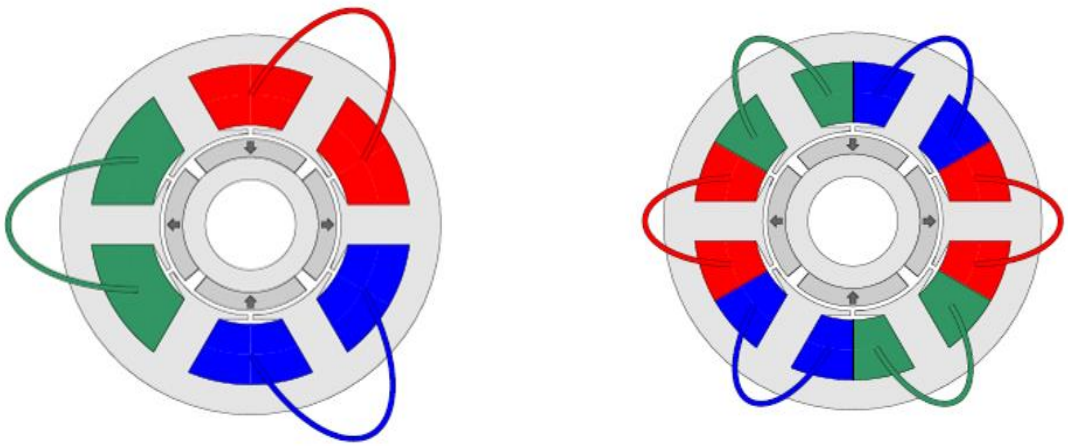
Τέλος, υπάρχουν δύο εναλλακτικές διαμορφώσεις του τυλίγματος αυτού ως προς τις τερματικές συνδέσεις οι οποίες είναι:

- Βροχοειδές τύλιγμα (για μικρό αριθμό πόλων ≤ 4)
- Κυματοειδές τύλιγμα (για μεγάλο αριθμό πόλων ≥ 10)

Οι δύο αυτές τοπολογίες για ενδιάμεσους αριθμούς πόλων είναι ισοδύναμες.

2.2.2.2 Συγκεντρωμένο Τύλιγμα Χωρίς Επικάλυψη των Φάσεων

Το τύλιγμα αυτό αποτελεί μία ιδιαίτερη κατηγορία κλασματικού βήματος, με τη βασική διαφορά ότι το τύλιγμα της κάθε φάσης δεν επικαλύπτεται σε καμία περίπτωση με το αντίστοιχο των υπόλοιπων φάσεων. Αυτό συμβαίνει γιατί οι σπείρες του πηνίου μίας φάσης περιελίσσονται γύρω από κάθε δόντι και όχι μεταξύ δύο αυλάκων. Μία επιμέρους κατηγοριοποίηση του τυλίγματος αυτού προέρχεται από τη διαφοροποίηση μεταξύ αυλάκων μονής στρώσης (single-layer) και διπλής στρώσης (double layer). Οι δύο αυτές διαμορφώσεις φαίνονται ενδεικτικά για μία 4-πολική μηχανή στο σχήμα 2.12.



Σχήμα 2.12– Ενδεικτικό παράδειγμα συγκεντρωμένου τυλίγματος κλασματικού βήματος χωρίς επικάλυψη: απλής στρώσης (αριστερά) και διπλής στρώσης (δεξιά)

Σε κάθε περίπτωση το συγκεντρωμένο τύλιγμα ενέχει περιορισμούς ως προς την επιλογή του αριθμού πόλων και αυλάκων, καθώς όχι μόνο δεν είναι όλοι οι συνδυασμοί εφικτοί, αλλά και ο συντελεστής τυλίγματος δεν είναι ίδιος για κάθε συνδυασμό. Συγκεκριμένα, οι διάφοροι συνδυασμοί αυτοί φαίνονται στους παρακάτω πίνακες από βιβλιογραφία, για το τύλιγμα διπλής και απλής στρώσης αντίστοιχα:

Διπλή Στρώση (Double Layer)

Q_s/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								0,62	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	0,945	0,95	0,933		0,866	0,76			
27								0,866	0,877	0,915		0,954	0,954	0,945	0,915	0,877	0,866		
30				$q=1$					0,866	0,874		0,936	0,951		0,951	0,936		0,874	0,866
33										0,866		0,903	0,928		0,954	0,954		0,928	0,903
36					$q=1$						0,866	0,867	0,902	0,933	0,945	0,953		0,953	0,945
39												0,866	0,863		0,918	0,936		0,954	0,954
42						$q=1$							0,866		0,89	0,913		0,945	0,953
45														0,866	0,859	0,886		0,927	0,945
48							$q=1$								0,866	0,857		0,905	0,933
51																0,866		0,88	0,901
54								$q=1$									0,866	0,854	0,877
57																		0,866	0,852
60									$q=1$										0,866

	$q = 1/2, 1/4$		$q = 3/8, 3/10$		$Q_s = 21 + 6k, p = Q_s \pm 1, k = 0,1,2,\ldots$
	$q = 3/7, 3/11$		$q = 5/14, 5/16$		$Q_s = 24 + 6k, p = Q_s \pm 2, k = 0,1,2,\ldots$
	$q = 2/5, 2/7$		ακατάλληλο		$k_{w1} < 0,866$

Σχήμα 2.13– Πίνακας εφικτών συνδυασμών αριθμού αυλάκων και πόλων για τύλιγμα διπλή στρώσης, μαζί με τους αντίστοιχους συντελεστές τυλίγματος

Απλή Στρώση (Single Layer)

Q_s/p	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
6	0,866		0,866	0,5										
12	0,5		0,866	0,966		0,966	0,866		0,5					
18		0,5			0,866	0,902	0,945		0,945	0,902				0,5
24			0,5				0,866		0,966	0,958		0,958	0,966	
30				0,5					0,866	0,874		0,936	0,951	

Σχήμα 2.14– Πίνακας εφικτών συνδυασμών αριθμού αυλάκων και πόλων για τύλιγμα απλής στρώσης, μαζί με τους αντίστοιχους συντελεστές τυλίγματος

2.2.2.3 Σύγκριση – Αξιολόγηση Τυλιγμάτων

Ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει το συγκεντρωμένο τύλιγμα κλασματικού βήματος είναι το γεγονός οτι μπορεί να τοποθετηθεί πολύ πιο εύκολα γύρω από κάθε δόντι, αφού τα πηνία κάθε φάσης δεν επικαλύπτονται, απλοποιώντας την κατασκευή του, ενώ απαιτεί λιγότερο χώρο σε κάθε αύλακα πετυχαίνοντας υψηλότερο συντελεστή πληρότητας. Τέλος, μέσω των μικρότερων άκρων τυλίγματος (end-windings) είναι δυνατόν να επιτευχθούν μικρότερες απώλειες χαλκού. Ωστόσο, καθώς η θεμελιώδης συχνότητα του πεδίου καθορίζεται από τον αριθμό των πόλων της μηχανής, υπάρχει περίπτωση να εμφανίζονται υπο-αρμονικές (sub-harmonics) για τον δρομέα λόγω του τυλίγματος, οι οποίες καθώς έχουν μεγάλο μήκος κύματος, παρουσιάζουν υψηλή διείσδυση στο σώμα του δρομέα. Το γεγονός αυτό, ιδιαίτερα για υψηλές ταχύτητες μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένες απώλειες πυρήνα στο δρομέα.

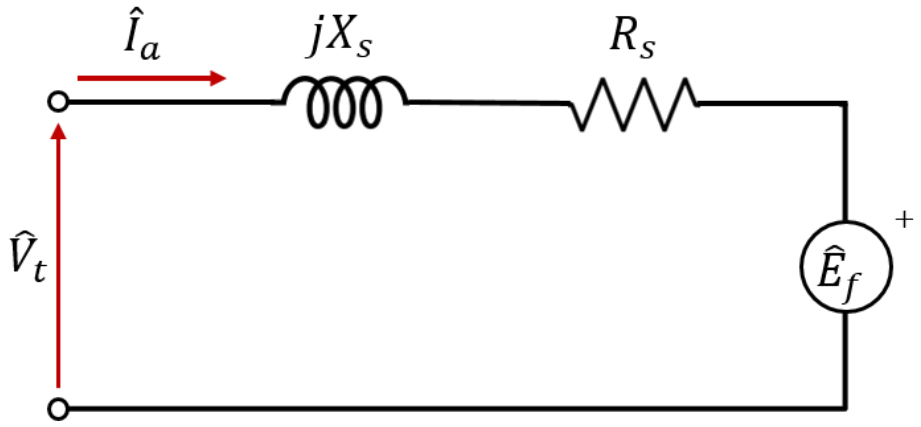
Από την άλλη, το κατανεμημένο τύλιγμα (πλήρους ή κλασματικού βήματος), εξαιρώντας το μειονέκτημα της πιο σύνθετης περιέλιξης και μικρότερου συντελεστή πληρότητας αύλακος, προσφέρει εν γένει υψηλότερο συντελεστή τυλίγματος, οδηγώντας σε μικρότερη απομείωση της θεμελιώδους συνιστώσας του πεδίου, ενώ πολύ σημαντικό είναι το γεγονός ότι το αρμονικό περιεχόμενο είναι μικρότερο. Επιπλέον, μέσω κατάλληλης σχεδίασης είναι δυνατόν να περιοριστούν στο ελάχιστο τόσο η κυμάτωση ροπής όσο και οι απώλειες χαλκού, ειδικά από τη στιγμή που δεν απαιτείται υψηλή πυκνότητα ρεύματος στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Για την παρούσα εργασία επιλέγεται να μελετηθεί το κατανεμημένο τύλιγμα πλήρους βήματος, καθώς εκτιμήθηκε πως τα πλεονεκτήματα που μπορεί να προσφέρει είναι περισσότερα από τα μειονεκτήματα του.

Τέλος, αναφορικά με τη συνδεσμολογία του τυλίγματος, ανάμεσα στην παράλληλη και εν σειρά σύνδεση των πηνίων ανά ζεύγος πόλων, προτιμάται η παράλληλη συνδεσμολογία καθώς έτσι εξασφαλίζεται ότι η επιβαλλόμενη τάση ισοκατανέμεται στα ελίγματα της κάθε φάσης, ενώ οι τερματικές συνδέσεις είναι απλούστερες από ότι στην εν σειρά σύνδεση.

2.2.3 Ισοδύναμο Κύκλωμα και Μαθηματικό Μοντέλο Σύγχρονου Κινητήρα Μόνιμων Μαγνητών

Η απλούστερη περιγραφή της σύγχρονης μηχανής μπορεί να γίνει μέσω του ακόλουθου απλοποιημένου μονοφασικού ισοδυνάμου κυκλώματος:



Σχήμα 2.15– Απλοποιημένο στατικό ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης μηχανής σε λειτουργία κινητήρα

Όπου $\hat{E}_f$ η ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) διεγέρσεως, R_s η ωμική αντίσταση του τυλίγματος της φάσης, X_s η σύγχρονη επαγωγική αντίδραση που περιλαμβάνει την αντίδραση μαγνήτισης και την αντίδραση σκέδασης: $X_s = X_\alpha + X_l$, και $\hat{V}_t$ η τερματική φασική τάση τροφοδοσίας.

Τα παραπάνω μεγέθη αναπαριστώνται μέσω παραστατικών μιγαδικών και συνδέονται μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$\hat{V}_t = \hat{E}_f + (R_s + jX_s) \cdot \hat{I}_a \tag{2.5}$$

2.2.3.1 Πλαίσιο Αναφοράς d-q στη Σύγχρονη Μηχανή Μονίμων Μαγνητών

Η αναλυτική περιγραφή μίας τριφασικής AC μηχανής, χωρίς την χρήση κάποιου μαθηματικού εργαλείου απαιτεί την επίλυση πολύπλοκων διαφορικών εξισώσεων με ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενες ποσότητες ρεύματος και τάσης στο χρόνο. Τη λύση σε αυτό το πρόβλημα, δίνει ο μετασχηματισμός Park, σύμφωνα με τον οποίο όλες οι προαναφερθείσες χρονομεταβλητές ποσότητες στο ακίνητο πλαίσιο του στάτη abc, μετατρέπονται σε χρονοσταθερές ποσότητες στο σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς του δρομέα d-q. Η σχέση την οποία εισάγει ο μετασχηματισμός του Park και η οποία συνδέει τρία οποιαδήποτε τριφασικά μεγέθη της μηχανής $f_a,\ f_b,\ f_c$, με τα αντίστοιχα στο πλαίσιο $dq,\ f_d,\ f_q$, είναι:

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \tag{2.6}$$

Όπου $\theta = \frac{P}{2} \cdot \theta_m$, η ηλεκτρική γωνία του δρομέα (d-άξονα) σε σχέση με τον άξονα της φάσης α (ως αναφορά χρησιμοποιείται ο άξονας της φάσης α).

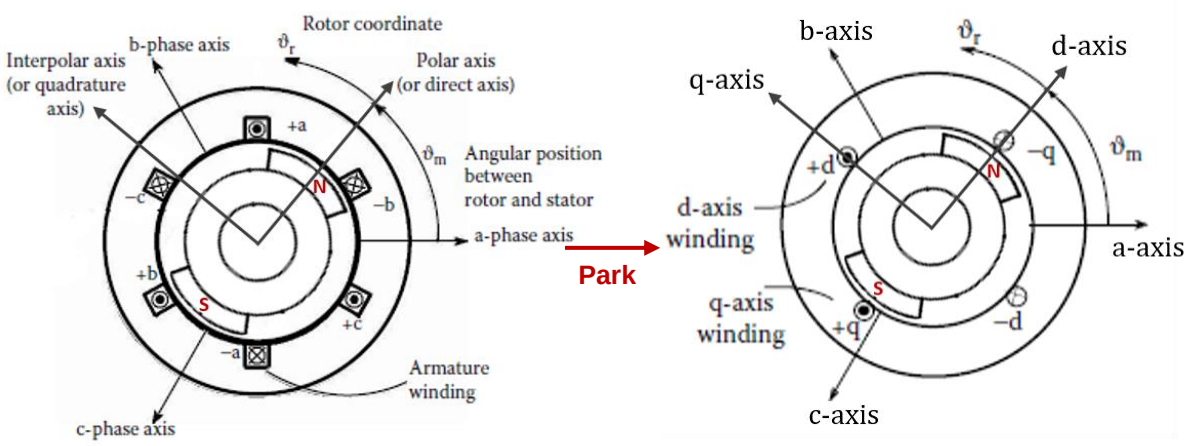
Ο παραπάνω μετασχηματισμός μπορεί να εφαρμοστεί με τον ίδιο ακριβώς τρόπο για οποιοδήποτε ηλεκτρικό μέγεθος της μηχανής, με τα βασικότερα τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στο κυκλωματικό ισοδύναμο της να είναι:

- $I_d,\ I_q$: συνιστώσες ρεύματος στο πλαίσιο d-q
- $V_d,\ V_q$: συνιστώσες εφαρμοζόμενης τάσης στο πλαίσιο d-q
- $\lambda_d,\ \lambda_q$: συνιστώσες πεπλεγμένης ροής στο πλαίσιο d-q
- $L_d,\ L_q$: συνιστώσες αυτεπαγωγής στο πλαίσιο d-q

Ουσιαστικά, το φυσικό νόημα του παραπάνω μετασχηματισμού είναι πως τα «ακίνητα» τριφασικά τυλίγματα του στάτη abc, τα οποία είναι μετατοπισμένα μεταξύ τους κατά 120 ηλεκτρικές μοίρες, μετατρέπονται σε δύο ισοδύναμα τυλίγματα dq, τα οποία στρέφονται με την σύγχρονη ταχύτητα του δρομέα. Τα τυλίγματα αυτά, με DC ποσότητες ρεύματος και τάσης, είναι μετατοπισμένα μεταξύ τους κατά 90 ηλεκτρικές μοίρες, με τους άξονες τους να ταυτίζονται με τον ορθό (ή ευθύ) d-άξονα και τον εγκάρσιο q-άξονα αντίστοιχα. Οι δύο αυτοί άξονες στη σύγχρονη μηχανή μονίμων μαγνητών ορίζονται ως εξής:

- Ο ευθύς άξονας (d-axis), ή διαφορετικά άξονας μέγιστης ροής, ταυτίζεται με τον άξονα του πεδίου διεγέρσεως, δηλαδή στη προκειμένη περίπτωση με τον άξονα του μαγνήτη. Για αναφορά ο ευθύς άξονας συνήθως ευθυγραμμίζεται με τον άξονα της φάσης α, όπου θεωρείται πως η γωνία του δρομέα είναι μηδενική $\theta_m = 0$
- Ο εγκάρσιος άξονας (q-axis), είναι μετατοπισμένος κατά 90 ηλεκτρικές μοίρες σε σχέση με τον d-άξονα

Η παραπάνω περιγραφή απεικονίζεται αναλυτικά στο σχήμα 2.16, για μία σύγχρονη μηχανή μονίμων μαγνητών με δύο πόλους.



Σχήμα 2.16– Φυσικό νόημα μετασχηματισμού d-q σε μία σύγχρονη μηχανή μονίμων μαγνητών

Επιπλέον, μέσω του μετασχηματισμού Park, οι μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος μπορούν να μελετηθούν σαν να είναι συνεχούς ρεύματος, όπου τα φαινόμενα ροής και ροπής είναι διαχωρισμένα. Αυτό σημαίνει πως η διέγερση και η εγκατάσταση του μαγνητικού πεδίου συνδέεται με τον d άξονα, ενώ η ανάπτυξη της ηλεκτρομαγνητικής ροπής είναι αλληλένδετη με τον q άξονα. Έτσι λοιπόν επικράτησε ο έλεγχος των ποσοτήτων ρεύματος στο στρεφόμενο πλαίσιο d-q, για την οδήγηση της μηχανής, και ο οποίος ονομάζεται διανυσματικός έλεγχος (vector control).

2.2.3.2 Ισοδύναμο Κύκλωμα Μηχανής στο Πλαίσιο d-q

Οι θεμελιώδεις κυκλωματικές σχέσεις της μηχανής που ισχύουν στο τριφασικό σύστημα είναι:

$$V_a = R_s I_a + \frac{d\lambda_a}{dt} \tag{2.7}$$

$$V_b = R_s I_b + \frac{d\lambda_b}{dt} \tag{2.8}$$

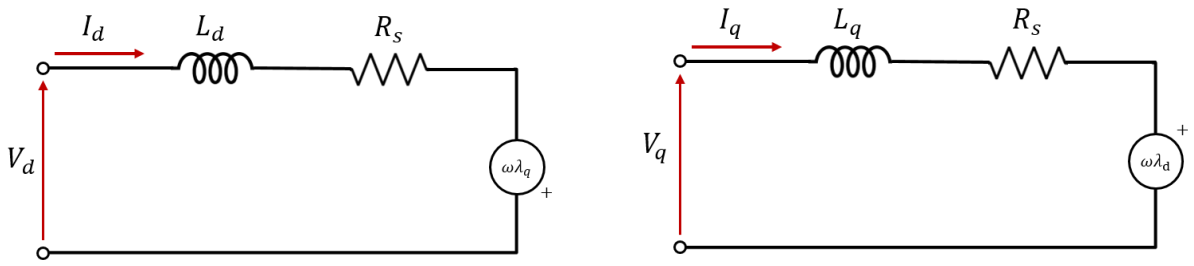
$$V_c = R_s I_c + \frac{d\lambda_c}{dt} \tag{2.9}$$

Εφαρμόζοντας τον μετασχηματισμό Park για το παραπάνω σύστημα εξισώσεων (2.7) - (2.9), λαμβάνεται η ισοδύναμη περιγραφή του δυναμικού μοντέλου της μηχανής στο στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς του δρομέα, με χρονοσταθερά πλέον ηλεκτρικά μεγέθη, γεγονός που απλοποιεί σημαντικά την επίλυση. Σε όρους πεπλεγμένης ροής, προκύπτουν οι ακόλουθες εξισώσεις d-q:

$$V_d = R_s I_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega\lambda_q \tag{2.10}$$

$$V_q = R_s I_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega\lambda_d \tag{2.11}$$

Το ισοδύναμο κύκλωμα, σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις, φαίνεται στο σχήμα 2.17.



Σχήμα 2.17 – Αριστερά: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ευθύ άξονα
Δεξιά: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα εγκάρσιου άξονα

Για την εξαγωγή των παραπάνω, θεωρείται πως για γραμμικές συνθήκες λειτουργίας του σιδήρου, ισχύει:

$$\lambda_d = \Lambda_m + L_d I_d \tag{2.12}$$

$$\lambda_q = L_q I_q \tag{2.13}$$

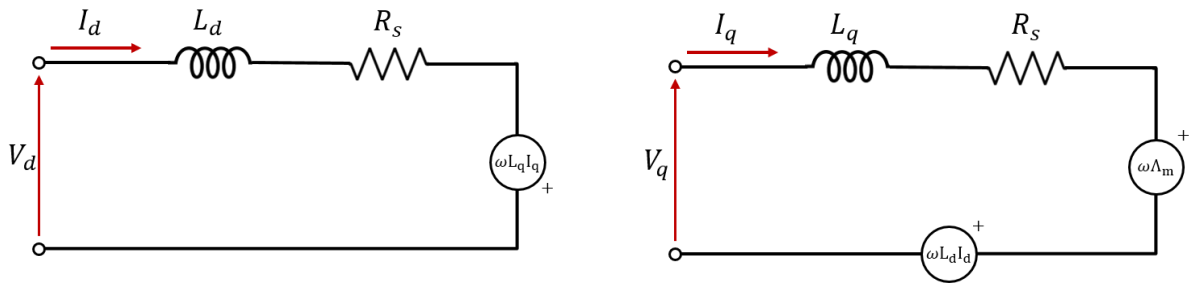
Όπου, Λ_m είναι η πεπλεγμένη ροή στον d-άξονα λόγω της ύπαρξης του μαγνήτη.

Επομένως, σε αυτή την περίπτωση οι εξισώσεις διαμορφώνονται ως εξής:

$$V_d = R_s I_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \tag{2.14}$$

$$V_q = R_s I_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega(\Lambda_m + L_d I_d) \tag{2.15}$$

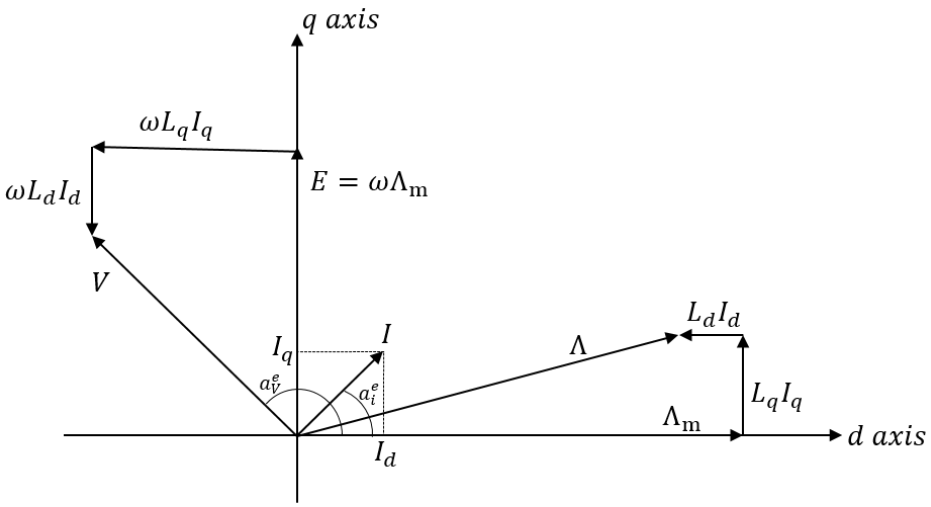
Άρα εναλλακτικά, το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του d και q άξονα μπορούν να πάρουν την ακόλουθη μορφή σε όρους αυτεπαγωγών αντίστοιχα:



Σχήμα 2.18– Αριστερά: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ευθύ άξονα με όρους αυτεπαγωγών
Δεξιά: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα εγκάρσιου άξονα με όρους αυτεπαγωγών

Σημειώνεται ότι στην παραπάνω ανάλυση αγνοείται ο κλάδος των απωλειών πυρήνα.

Στο σχήμα 2.19 παρουσιάζεται ενδεικτικά ένα διανυσματικό διάγραμμα μόνιμης κατάστασης, το οποίο προκύπτει σύμφωνα με τις (2.14) και (2.15).



Σχήμα 2.19– Ενδεικτικό διανυσματικό διάγραμμα μόνιμης κατάστασης για μία σύγχρονη μηχανή επιφανειακών μαγνητών

Για την περίπτωση που φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, η θετική συνιστώσα του ρεύματος είναι στον d-άξονα, το οποίο σημαίνει πως η συνιστώσα του πεδίου που παράγεται ενισχύει το αντίστοιχο πεδίο του μαγνήτη. Ωστόσο, η παραπάνω κατάσταση λειτουργίας δεν είναι ενδεικτική για μία μηχανή επιφανειακών μαγνητών, από τη στιγμή που η ηλεκτρική γωνία ροπής δ, η οποία ταυτίζεται με την γωνία του ρεύματος α_i^e, αναμένεται να είναι περίπου στις 90 ηλεκτρικές μοίρες ή λίγο μεγαλύτερη. Το γεγονός αυτό σημαίνει πως στη μηχανή επιφανειακών μαγνητών, μέχρι να εισέλθει η μηχανή στην περιοχή εξασθένησης πεδίου, η d-συνιστώσα ρεύματος είναι περίπου μηδενική (ή λίγο αρνητική) με τη συνεισφορά του μαγνήτη να είναι σχεδόν η μοναδική στη διαμόρφωση του πεδίου.

Τέλος, ενδιαφέρον παρουσιάζει η εξαγωγή της παραγόμενης ηλεκτρομαγνητικής ροπής μέσω παραπάνω d-q ποσοτήτων. Συγκεκριμένα, αυτή υπολογίζεται ως εξής:

$$T_{dq} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \left(\lambda_d I_q - \lambda_q I_d \right)$$

$$\xRightarrow{(2.12),(2.13)} \quad T_{dq} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \left([\Lambda_m + L_d I_d] \cdot I_q - L_q I_q \cdot I_d \right) \tag{2.16}$$

Τελικά, ο υπολογισμός παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$T_{dq} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot \Lambda_m I_q + \left(L_d - L_q \right) \cdot I_d I_q \tag{2.17}$$

Όπου $P/2$ τα ζεύγη πόλων της μηχανής και $3/2$ ένας συντελεστής που χρησιμοποιείται γιατί ο μετασχηματισμός Park δεν είναι συντηρητικός ως προς την ισχύ. Από την παραπάνω εξίσωση, φαίνεται πως η παραγωγή της ροπής οφείλεται σε δύο επιμέρους όρους:

- Ο πρώτος όρος αποτελεί τη ροπή μαγνήτισης, η οποία οφείλεται κατ' ουσίαν στην αλληλεπίδραση μεταξύ των πεδίων του στάτη και του δρομέα (δηλαδή του μαγνήτη). Αυτή είναι και η κυριότερη αιτία παραγωγής ροπής σε μία σύγχρονη μηχανή. Προφανώς, η ροπή αυτή είναι ανάλογη του ρεύματος του εγκάρσιου άξονα.

- Ο δεύτερος όρος αποτελεί τη ροπή εκτυπότητας ή ροπή ευθυγράμμισης (reluctance torque), η οποία σε μία μηχανή επιφανειακών μαγνητών αναμένεται να είναι αμελητέα από τη στιγμή που ισχύει $L_d \cong L_q$, δηλαδή δεν υπάρχει μεγάλος δείκτης εκτυπότητας λόγω διαμόρφωσης του δρομέα.

2.2.4 Κατασκευαστικά Υλικά Ηλεκτρικών Μηχανών

2.2.4.1 Μαγνητικά Υλικά

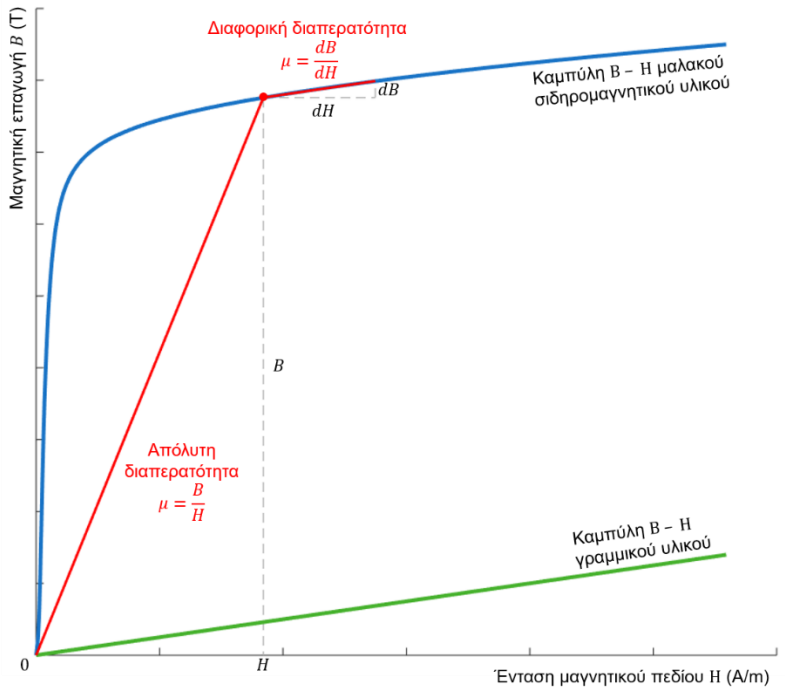
Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό που προσδιορίζει τη μαγνητική συμπεριφορά ενός υλικού, είναι το μέγεθος της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας. Με βάση το χαρακτηριστικό αυτό, τα υλικά χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, αναφορικά με τη συμπεριφορά τους στο μαγνητικό πεδίο:

Μη μαγνητικά ή διαμαγνητικά υλικά

Στον κενό χώρο, η μαγνητική επαγωγή (B) είναι ανάλογη με την ένταση του μαγνητικού πεδίου (H), στην οποία οφείλεται. Συνεπώς η γραφική αναπαράσταση του B συναρτήσει του H, γνωστή ως καμπύλη μαγνήτισης, είναι μία ευθεία γραμμή. Η κλίση αυτής της ευθείας ισούται με τη μαγνητική διαπερατότητα, η οποία σε αυτήν την περίπτωση είναι σταθερή και ίση με αυτή του κενού, μ_0. Την ίδια μαγνητική συμπεριφορά παρουσιάζουν και τα διαμαγνητικά υλικά, κάτι που συνεπάγεται σταθερή μαγνητική διαπερατότητα και μικρές τιμές μαγνητικής επαγωγής λόγω της αντίστοιχα μικρής κλίσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.20. Διάφορα διαμαγνητικά υλικά είναι ο αέρας, το νερό, το ξύλο κ.α.. Μάλιστα, ανάμεσα στο δρομέα και τον στάτη μίας ηλεκτρικής μηχανής συναντάται συνήθως αέρας, ο οποίος φυσικά διαθέτει ιδιότητες μη μαγνητικού υλικού, με αποτέλεσμα να παρουσιάζει μικρή συγκέντρωση μαγνητικής ροής.

Σιδηρομαγνητικά Υλικά

Το σύνηθες υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του σώματος του δρομέα και του στάτη είναι ο σίδηρος. Η επιλογή του σιδήρου και γενικά των σιδηρομαγνητικών υλικών, γίνεται λόγω του γεγονότος ότι παρουσιάζουν πολύ υψηλή σχετική μαγνητική διαπερατότητα μ_r, η οποία μπορεί να λαμβάνει τιμές από 2.000 έως και 80.000 T·m/A. Επιπλέον, η τιμή της δεν είναι σταθερή αλλά μπορεί να μεταβάλλεται όσο αυξάνεται η ένταση H του μαγνητικού πεδίου. Έτσι, η σχέση της πυκνότητας μαγνητικής ροής με την ένταση του μαγνητικού πεδίου δεν είναι γραμμική, αλλά χαρακτηρίζεται από το φαινόμενο του μαγνητικού κορεσμού. Μια τυπική καμπύλη μαγνήτισης $B - H$ ενός σιδηρομαγνητικού υλικού φαίνεται στο σχήμα 2.20.



Σχήμα 2.20 – Καμπύλη μαγνήτισης μαλακού σιδηρομαγνητικού υλικού και γραμμικού μη μαγνητικού υλικού

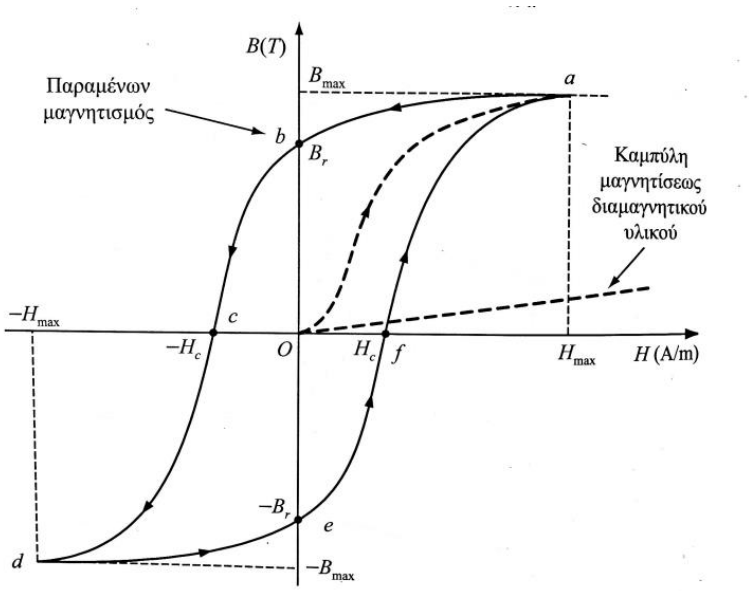
Ο κορεσμός είναι εμφανής, καθώς από ένα σημείο φόρτισης και μετά, η αύξηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου δε συνεπάγεται σημαντική αύξηση της μαγνητικής επαγωγής. Επιπλέον, γίνεται διάκριση ανάμεσα στη μέση ή απόλυτη μαγνητική διαπερατότητα του υλικού $\mu = B/H$ για ένα σημείο φόρτισης (B,H) και στη διαφορική μαγνητική διαπερατότητα $\mu = dB/dH$, η οποία ακολουθεί εφαπτομενικά την καμπύλη φόρτισης και δίνει μία πιο ακριβή εικόνα για τις μαγνητικές ιδιότητες του υλικού σε κάθε σημείο λειτουργίας. Τέλος, στο ίδιο διάγραμμα φαίνεται η καμπύλη μαγνήτισης για ένα διαμαγνητικό υλικό όπως ο αέρας που περιγράφηκε νωρίτερα.

Επιπλέον, τα σιδηρομαγνητικά υλικά διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες. Την πρώτη κατηγορία αποτελούν τα μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά, τα οποία δεν έχουν μεγάλες τιμές παραμένοντος μαγνητισμού, δηλαδή όταν πάψουν να μαγνητίζονται $(H = 0)$, χάνουν σε μεγάλο βαθμό την μαγνητική τους επαγωγή $(B = 0)$. Η καμπύλη μαγνήτισης των υλικών αυτών μπορεί να γραμμικοποιηθεί ικανοποιητικά τουλάχιστον μέχρι κάποια τιμή έντασης H του μαγνητικού πεδίου, με αποτέλεσμα η μαγνητική διαπερατότητα μ_r, να είναι σταθερή στην περιοχή αυτή. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά, των οποίων ο παραμένων μαγνητισμός παρουσιάζει πολύ υψηλές τιμές, με αποτέλεσμα να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν μόνιμοι μαγνήτες.

Επομένως, τα μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά είναι συνήθως αυτά που επιλέγονται για την κατασκευή του σώματος μίας μηχανής. Σε περίπτωση που μελετάται κάποια εφαρμογή με χαμηλές απαιτήσεις σε απόδοση, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί συμπαγής σίδηρος για το σώμα του δρομέα και του στάτη. Ωστόσο, λόγω ανάπτυξης δινορρευμάτων, τα οποία ρέουν στο εσωτερικό της μάζας του σιδερένιου πυρήνα, επιλέγεται συνήθως το υλικό του σιδήρου να τεμαχιστεί σε πολύ λεπτές λαμαρίνες

επιθυμητής διατομής, οι οποίες καλύπτονται με μονωτικό υλικό, με σκοπό να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες που προκαλούν τα ρεύματα αυτά, μέσω της μείωσης της αγώγιμης διαδρομής τους. Επιπλέον, στα μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά, καθώς η καμπύλη μαγνήτισης εμφανίζει πολύ μεγάλη κλίση, ο βρόχος υστέρησης έχει μικρό εμβαδό, συντελώντας σε μειωμένες απώλειες υστέρησης. Άρα λοιπόν, το σύνολο των απωλειών πυρήνα, δηλαδή απώλειες υστέρησης και δινορρευμάτων, μπορεί να μειωθεί σύμφωνα με τα παραπάνω όσο το δυνατόν περισσότερο, και σε συνδυασμό με την υψηλή μαγνητική διαπερατότητα που παρουσιάζουν τα υλικά αυτά, καθιστούν τον σίδηρο ως την επικρατέστερη επιλογή για την κατασκευή μηχανών. Συχνά μάλιστα χρησιμοποιούνται προσμίξεις πυριτίου, οι οποίες μπορούν να βελτιώσουν ορισμένες ιδιότητες του υλικού, όπως η αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης του ή η μείωση της μαγνητικής του αντίστασης, με τίμημα όμως την ελάττωση της αντοχής του.

Στο σχήμα 2.21 φαίνεται η καμπύλη μαγνήτισης ενός σιδηρομαγνητικού υλικού καθώς και ο βρόχος υστέρησης που σχηματίζεται κατά την εφαρμογή μίας εναλλασσόμενης έντασης μαγνητικού πεδίου H.



Σχήμα 2.21 – Καμπύλη μαγνήτισης μαλακού σιδηρομαγνητικού υλικού και γραμμικού μη μαγνητικού υλικού

Στο παραπάνω σχήμα, με διακεκομμένη γραμμή φαίνεται η καμπύλη μαγνήτισης του σιδηρομαγνητικού υλικού, υποθέτοντας πως αρχικά είναι τελείως μη μαγνητισμένο.

Στη συνέχεια, επιβάλλοντας εναλλασσόμενη ένταση H, καθώς εκείνη αυξάνεται μέχρι την τιμή H_{max}, το υλικό μαγνητίζεται κατά μήκος της $O\alpha$, φτάνοντας στην μέγιστη επαγωγή B_{max}. Όταν η ένταση του πεδίου αρχίσει να μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί, η μαγνητική επαγωγή θα μειωθεί, όχι με τον ίδιο τρόπο που αυξήθηκε, αλλά κατά μήκος της καμπύλης αbcd, επειδή τώρα το υλικό είναι μαγνητισμένο. Το αξιοσημείωτο όμως είναι πως όταν η ένταση H μηδενιστεί, δεν συμβαίνει το ίδιο για την πυκνότητα μαγνητικής ροής, η οποία έχει την τιμή B_r. Η τιμή αυτή χαρακτηρίζει τον παραμένων μαγνητισμό του υλικού, ο οποίος στα μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά είναι πάρα πολύ μικρός ($B_r \cong 0$), ενώ στα σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά, δηλαδή στους μόνιμους μαγνήτες διατηρεί υψηλή τιμή. Η ένταση που απαιτείται προκειμένου να μηδενιστεί η

μαγνητική επαγωγή του υλικού (σημείο c), ονομάζεται δύναμη ή ένταση επαναφοράς H_c (coercivity). Τέλος, καθώς η ένταση του μαγνητικού πεδίου συνεχίζει να μεταβάλλεται εναλλασσόμενα (θετικές και αρνητικές τιμές), η μαγνήτιση του υλικού ακολουθεί τον βρόγχο $\alpha bcdef$. Το εμβαδόν του βρόγχου αυτού καθορίζει και τις απώλειες υστέρησης, κατά την ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ του μαγνητικού πεδίου και του ηλεκτρικού κυκλώματος.

Αναφορικά με το σύστημα διέγερσης και τροφοδότησης της μηχανής, τα τυλίγματα της είναι κατασκευασμένα από αγωγούς χαλκού, κατάλληλης διατομής ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της εφαρμογής, τα οποία περιβάλλονται από μονωτικό υλικό καθώς όπως είναι φυσικό, οι αγωγοί εντός της αύλακας έρχονται συχνά σε στενή επαφή μεταξύ τους. Επίσης, το DC τύλιγμα πεδίου διεγέρσεως στις σύγχρονες μηχανές, τείνει πλέον να αντικατασταθεί πλήρως από τους μόνιμους μαγνήτες, οι οποίοι όπως ήδη αναφέρθηκε αποτελούν σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά, τα οποία έχουν την ικανότητα να διατηρούν πολύ υψηλές τιμές παραμένοντος μαγνητισμού B_r. Τα συνηθέστερα υλικά κατασκευής για τους μαγνήτες είναι ο Φερρίτης, το Νεοδύμιο καθώς και κράματα Νεοδυμίου – Σιδήρου – Βορίου (NdFeB).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΗΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μηχανή που σχεδιάζεται πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε πρωτότυπο όχημα το οποίο θα λάβει μέρος στο διαγωνισμό «Shell Eco-Marathon» στην κατηγορία «Urban Concept». Ο καθορισμός των προδιαγραφών της μηχανής δεν οδηγεί με βεβαιότητα στην απόφαση για την τελική τοπολογία και διαμόρφωση της, αλλά βοηθά σε μία αρχική εκτίμηση των χαρακτηριστικών της.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η αρχική προσέγγιση μέσω αναλυτικών σχέσεων με στόχο την εξαγωγή κάποιων βασικών διαστάσεων της μηχανής οι οποίες χρησιμοποιούνται ως αφετηρία για την αριθμητική επίλυση στη συνέχεια.

3.2 ΔΙΑΓΩΝΙΣΜΟΣ “SHELL ECO-MARATHON” – ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ “URBAN CONCEPT”

3.2.1 Πληροφορίες για το Διαγωνισμό

Ο διαγωνισμός «Shell Eco-Marathon» είναι ένας ετήσιος διαγωνισμός στον οποίο οι διαγωνιζόμενες ομάδες προσπαθούν να αναπτύξουν οχήματα εξοικονόμησης ενέργειας. Στόχος κάθε διαγωνιζόμενης ομάδας είναι να αναπτύξει ένα όχημα το οποίο να είναι ικανό να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις της εκάστοτε διαδρομής, χρησιμοποιώντας τη λιγότερη ενέργεια από όλα τα υπόλοιπα συμμετέχοντα οχήματα.

Η κατηγορία «Urban Concept» αφορά το σχεδιασμό οχημάτων που μοιάζουν με μικρά συμβατικά αυτοκίνητα πόλης. Τα οχήματα αυτά είναι βελτιστοποιημένα έτσι ώστε να μπορούν να είναι οικονομικά, αλλά και να μπορούν να ανταπεξέρχονται σε απαιτήσεις εκκίνησης από στάση πιο συχνά από τα οχήματα που συμμετέχουν στις υπόλοιπες κατηγορίες του διαγωνισμού.

3.2.2 Κανονισμοί Κατασκευής Οχήματος

Ο διαγωνισμός «Shell Eco-Marathon» εφαρμόζει αυστηρούς όρους ως προς την τήρηση των κανονισμών και δημοσιοποιεί αναλυτικά χαρακτηριστικά που θα πρέπει να έχουν όλα τα συμμετέχοντα οχήματα. Στη συνέχεια αναφέρονται τα χαρακτηριστικά εκείνα που επηρεάζουν τη σχεδίαση της κινητήριας μηχανής.

- Το συνολικό ύψος του οχήματος θα πρέπει να είναι από 1000mm έως και 1300mm.
- Το συνολικό πλάτος του οχήματος (εξαιρουμένων των πλαϊνών καθρεπτών) θα πρέπει να είναι από 1200mm έως και 1300mm.
- Το συνολικό μήκος του οχήματος θα πρέπει να είναι από 2200mm έως και 3500mm.
- Η απόσταση του οχήματος από το έδαφος θα πρέπει να είναι 100mm.
- Η μέγιστη επιτρεπτή μάζα του οχήματος χωρίς τον οδηγό είναι 225kg.
- Η ελάχιστη επιτρεπτή μάζα του οδηγού είναι 70kg.
- Οι ζάντες των τροχών θα πρέπει να είναι από 15” έως και 17”.

3.3 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

3.3.1 Εκτίμηση Χαρακτηριστικών Οχήματος με Βάση τους Κανονισμούς

Καθώς το όχημα που πρόκειται να λάβει μέρος στο διαγωνισμό δεν έχει ακόμη κατασκευαστεί, για τον καθορισμό των απαιτήσεων από τη μηχανή γίνονται οι παρακάτω παραδοχές. Οι παραδοχές αυτές βασίζονται σε εκτιμήσεις που έχουν γίνει από την ομάδα κατασκευής του οχήματος όσον αφορά τα χαρακτηριστικά του:

- Η μάζα του οχήματος είναι $140\ kg$ χωρίς τον οδηγό.
- Το βάρος του οδηγού είναι $70\ kg$.
- Η ονομαστική ταχύτητα του οχήματος είναι $35\ {}^{km}/_{h}$.
- Η επιτάχυνση του οχήματος από στάση έως την ονομαστική ταχύτητα θα πρέπει να διαρκεί $30\ s$.
- Ο αεροδυναμικός συντελεστής του οχήματος είναι $0{,}3$.
- Η διατομή του οχήματος είναι $1{,}25\ m^2$.
- Η διάμετρος του τροχού (μαζί με τα ελαστικά) είναι $16{,}5$”.

3.3.2 Καθορισμός Ταχύτητας Περιστροφής Μηχανής

Όπως αναφέρεται στην ενότητα 3.3.1, η ονομαστική ταχύτητα του οχήματος είναι:

$$v_N = 35\ {}^{km}/_{h} = 9{,}722\ {}^{m}/_{s} \tag{3.1}$$

Η ακτίνα των τροχών του οχήματος είναι:

$$R_{\tau\rho o\chi o\acute{\upsilon}} = \frac{16{,}5\ in}{2} = 8{,}25\ in = 0{,}20955\ m \tag{3.2}$$

Οπότε, σε ονομαστική ταχύτητα, η γωνιακή ταχύτητα των τροχών είναι:

$$\omega_{\tau\rho o\chi o\acute{\upsilon}} = \frac{v_N}{R_{\tau\rho o\chi o\acute{\upsilon}}} = \frac{9{,}722\ {}^{m}/_{s}}{0{,}20955\ m} = 46{,}395\ {}^{rad}/_{s} \tag{3.3}$$

Και τελικά, η ονομαστική ταχύτητα περιστροφής των τροχών είναι:

$$n_{\tau\rho o\chi o\acute{\upsilon}} = \frac{60 \cdot \omega_{\tau\rho o\chi o\acute{\upsilon}}}{2 \cdot \pi} = \frac{60 \cdot 46{,}395\ {}^{rad}/_{s}}{2 \cdot \pi} = 443{,}04\ \Sigma A\Lambda \tag{3.4}$$

Καθώς η παραπάνω ανάλυση βασίζεται σε παραδοχές, θεωρούμε πως η ονομαστική ταχύτητα των τροχών θα είναι:

$$n_{\tau\rho o\chi o\acute{\upsilon}} = 450\ \Sigma A\Lambda \tag{3.5}$$

Για το σχεδιασμό του κατάλληλου κινητηρίου συστήματος, το οποίο θα επιτρέψει τις καλύτερες επιδόσεις στο όχημα (δηλαδή την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας κατά την εκάστοτε διαδρομή) διερευνώνται δύο τοπολογίες:

- Σχεδιασμός μηχανής ονομαστικών στροφών 450 ΣΑΛ για χρήση στο όχημα χωρίς την τοποθέτηση κιβωτίου ταχυτήτων.

- Σχεδιασμός μηχανής ονομαστικών στροφών 1350 ΣΑΛ για χρήση στο όχημα με την τοποθέτηση κιβωτίου ταχυτήτων με λόγο μετάδοσης (μείωσης) 3:1.

Σαν αποτέλεσμα, οι ταχύτητες περιστροφής των κινητήρων που μελετώνται είναι:

$$n_{\mu\eta\chi\alpha\nu\acute{\eta}\varsigma,\chi\omega\rho\acute{\iota}\varsigma\ K/T} = 450\ \Sigma A\Lambda \tag{3.6}$$

Και:

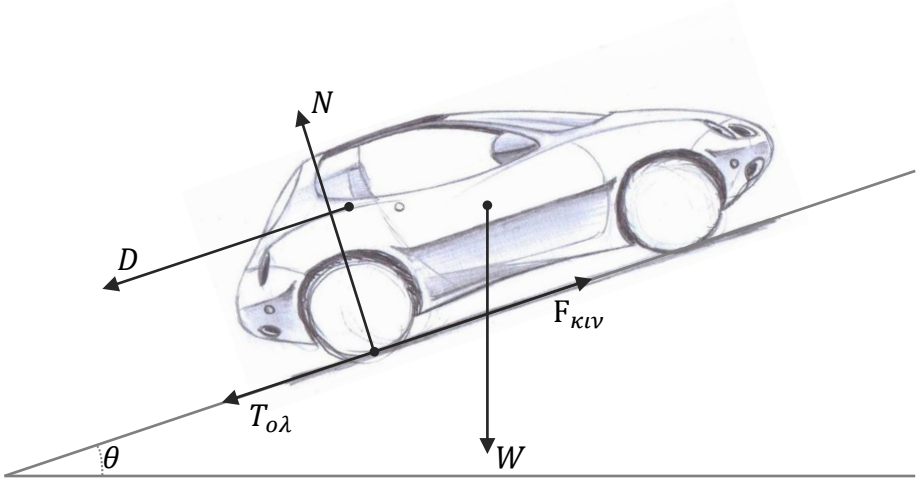
$$n_{\mu\eta\chi\alpha\nu\acute{\eta}\varsigma,\mu\varepsilon\ K/T} = 1350\ \Sigma A\Lambda \tag{3.7}$$

3.3.3 Καθορισμός Ονομαστικής Ροπής Μηχανής

3.3.3.1 Ανάλυση Δυνάμεων

Για τον καθορισμό των απαιτήσεων ροπής από τη μηχανή, είναι αναγκαίο να προσδιοριστεί η συνολική δύναμη πρόωσης που απαιτείται για την κίνηση του οχήματος στις διάφορες λειτουργικές καταστάσεις.

Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζονται οι δυνάμεις που ασκούνται πάνω στο όχημα κατά την κίνησή του.



Σχήμα 3.1 – Γραφική αναπαράσταση των ασκούμενων στο όχημα δυνάμεων

Οι δυνάμεις που ασκούνται στο όχημα είναι οι εξής:

- Το βάρος του οχήματος W.
- Η τριβή ολίσθησης $T_{o\lambda}$.
- Η οπισθέλκουσα δύναμη λόγω αεροδυναμικής αντίστασης D.
- Η δύναμη πρόωσης από τον κινητήρα $F_{\kappa\iota\nu}$.
- Η κάθετη από το έδαφος αντίσταση N.

Τριβή Ολίσθησης

Η τριβή ολίσθησης είναι η δύναμη που αντιστέκεται στη σχετική κίνηση δύο σωμάτων που εφάπτονται και βρίσκονται σε κίνηση. Έχει φορά αντίθετη της κίνησης και μέτρο όπως περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$T = \mu \cdot N \tag{3.8}$$

όπου μ ο συντελεστής τριβής ολίσθησης μεταξύ του ελαστικού και του εδάφους.

Ο συντελεστής τριβής ολίσθησης εξαρτάται από την ποιότητα κατασκευής των ελαστικών αλλά και την πίεση του αέρα εντός αυτών. Τυπικές τιμές του συντελεστή αυτού είναι 0,005 – 0,015, ενώ στην ανάλυση εφεξής χρησιμοποιείται η τιμή 0,012, η οποία θεωρήθηκε μία ασφαλής πρόβλεψη.

Η κάθετη αντίδραση του εδάφους είναι η δύναμη η οποία διατηρεί την ισχύ του 2ου Νόμου του Νεύτωνα στην κάθετη στην κίνηση διεύθυνση. Για κίνηση σε μία διάσταση, η κάθετη αντίδραση ισούται με τη συνιστώσα του βάρους εκείνη, η οποία είναι κάθετη στον άξονα της κίνησης.

Αεροδυναμική Αντίσταση

Η αεροδυναμική αντίσταση είναι μία δύναμη η οποία δημιουργείται από την κίνηση ενός στερεού μέσα σε ένα ρευστό μέσο. Στην περίπτωση αυτή, το στερεό είναι το όχημα και το ρευστό μέσο είναι ο αέρας. Η αεροδυναμική αντίσταση οφείλεται στη διαφορά μεταξύ των ταχυτήτων του στερεού και του ρευστού, έχει κατεύθυνση αντίθετη από αυτή της σχετικής ταχύτητας του στερεού προς το ρευστό και μέτρο το οποίο δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$D = \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \tag{3.9}$$

όπου c_d ο αεροδυναμικός συντελεστής οπισθέλκουσας δύναμης του οχήματος, ρ η πυκνότητα του αέρα, v η ταχύτητα με την οποία κινείται το όχημα και A η μετωπική του επιφάνεια.

Ο αεροδυναμικός συντελεστής του οχήματος εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του οχήματος και εκφράζει την αντίσταση των μερών του στην κίνηση μέσα σε ένα ρευστό. Τυπικές τιμές του συντελεστή αυτού είναι 0,3 – 0,4 για την πλειονότητα των αυτοκινήτων του εμπορίου. Σημειώνεται πως τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν γενικά χαμηλότερες τιμές του συντελεστή αυτού, καθώς έχουν μικρότερες ανάγκες για ψύξη και άρα μπορούν να αποκτήσουν ένα πιο αεροδυναμικό σχεδιασμό. Η τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή που χρησιμοποιείται στην ανάλυση αυτή είναι 0,3.

Δύναμη Πρόωσης του Κινητήρα

Η δύναμη πρόωσης του κινητήρα εκφράζεται ως το πηλίκο της ροπής T που εφαρμόζεται στο κέντρο του τροχού προς την ακτίνα του τροχού.

$$F_{\kappa\iota\nu} = \frac{T}{R_{\tau\rho o\chi o\acute{\upsilon}}} \tag{3.10}$$

Η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται στο όχημα ανά πάσα στιγμή δίνεται από τον 2ο Νόμο του Νεύτωνα:

$$\boldsymbol{\Sigma F} = m \cdot \boldsymbol{a} \tag{3.11}$$

όπου $\boldsymbol{\Sigma F}$ η συνισταμένη των δυνάμεων και $\boldsymbol{a}$ η επιτάχυνση του σώματος.

Θεωρώντας ότι το σώμα κινείται σε ανηφόρα με γωνία θ ως προς το οριζόντιο επίπεδο, και ορίζοντας $\boldsymbol{t}$ τον άξονα της κίνησης και $\boldsymbol{n}$ τον άξονα κάθετο σε αυτόν, η εξίσωση (3.11) αναλύεται στις παρακάτω εξισώσεις:

$$\Sigma F_t = m \cdot a_t \tag{3.12}$$

$$\Sigma F_n = m \cdot a_n \tag{3.13}$$

Προφανώς το όχημα επιταχύνεται μόνο στον άξονα της κίνησής του και άρα:

$$a_n = 0 \tag{3.14}$$

Οπότε η (3.13) γίνεται:

$$\Sigma F_n = 0 \Rightarrow N - W \cdot cos\theta = 0 \Rightarrow N = W \cdot cos\theta \tag{3.15}$$

Και η (3.14):

$$\Sigma F_t = m \cdot a_t \Rightarrow F_{\kappa\iota\nu} - W \cdot sin\theta - T - D = m \cdot a \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F_{\kappa\iota\nu} = m \cdot g \cdot sin\theta + \mu \cdot m \cdot g \cdot cos\theta + \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A + m \cdot a \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F_{\kappa\iota\nu} = m \cdot g \cdot (sin\theta + \mu \cdot cos\theta) + m \cdot a + \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \tag{3.16}$$

Η δύναμη πρόωσης από το κινητήριο σύστημα $F_{\kappa\iota\nu}$ εφαρμόζεται στο σημείο επαφής του τροχού στον οποίο είναι συνδεδεμένο το κινητήριο σύστημα με το έδαφος. Οπότε η απαιτούμενη ροπή στον άξονα του τροχού θα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$T = F_{\kappa\iota\nu} \cdot R_{\tau\rho o\chi o\acute{\upsilon}} \tag{3.17}$$

3.3.3.2 Ορισμός Καταστάσεων Συστήματος

Το κινητήριο σύστημα θα πρέπει όχι μόνο να μπορεί να αποδώσει την απαιτούμενη ροπή στην ονομαστική ταχύτητα του οχήματος, αλλά θα πρέπει να είναι ικανό να υποστηρίζει το όχημα στις ακόλουθες καταστάσεις:

- Κίνηση σε ευθεία με την ονομαστική ταχύτητα των $35\,{}^{km}/_{h}$.
- Εκκίνηση σε ευθεία με την απαιτούμενη επιτάχυνση.
- Κίνηση σε ανηφόρα μέγιστης κλίσης 5% με την ονομαστική ταχύτητα των $35\,{}^{km}/_{h}$.
- Εκκίνηση σε ανηφόρα μέγιστης κλίσης 5% με μειωμένη επιτάχυνση.

3.3.3.3 Καθορισμός Απαιτήσεων Ροπής στους Τροχούς

Με βάση την παραπάνω ανάλυση και παραδοχές, καθορίζονται οι απαιτήσεις ροπής στους τροχούς του οχήματος για τις λειτουργικές καταστάσεις της ενότητας 3.3.3.2.

Ονομαστική Ταχύτητα σε Ευθεία

Για ομαλή κίνηση σε ευθεία με σταθερή ταχύτητα $35\,{}^{km}/_{h}$ η κινητήριος δύναμη που απαιτείται από το σύστημα είναι:

$$F_{\kappa\iota\nu} = (210kg) \cdot \left(9{,}806\frac{m}{s^2}\right) \cdot (sin0° + 0{,}012 \cdot cos0°) + (210kg) \cdot 0 +$$

$$+ \frac{1}{2} \cdot (0{,}3) \cdot \left(1{,}225\frac{kg}{m^3}\right) \cdot \left(9{,}722\frac{m}{s}\right)^2 \cdot (1{,}25\,m^2) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F_{\kappa\iota\nu} = 46{,}42\,N$$

Και άρα η απαίτηση ροπής στους τροχούς είναι:

$$T = F_{\kappa\iota\nu} \cdot R_{\tau\rho o\chi o\acute{\upsilon}} = (42{,}302\,N) \cdot (0{,}20955\,m) = 9{,}73\,Nm$$

Εκκίνηση σε Ευθεία

Το όχημα πρέπει να αποκτά την ονομαστική του ταχύτητα σε $30\,s$, οπότε κατά την εκκίνηση απαιτείται επιτάχυνση μέτρου $\alpha = \frac{\Delta u}{\Delta t} = \frac{9{,}722\,{}^{m}/_{s} - 0}{30\,s} = 0{,}324\frac{m}{s^2}$.

Στην περίπτωση που το όχημα είναι ακίνητο, ο συντελεστής τριβής δεν είναι ο συντελεστής τριβής ολίσθησης, αλλά ο συντελεστής στατικής τριβής, ο οποίος σε γενικές γραμμές είναι μεγαλύτερος από τον συντελεστή ολίσθησης. Μία ασφαλής προσέγγιση για την τιμή του είναι 0,015.

$$F_{\kappa\iota\nu} = (210kg) \cdot \left(9{,}806\frac{m}{s^2}\right) \cdot (sin0° + 0{,}015 \cdot cos0°) + (210kg) \cdot \left(0{,}324\,{}^{m}/_{s^2}\right) +$$

$$+ \frac{1}{2} \cdot (0{,}3) \cdot \left(1{,}225\frac{kg}{m^3}\right) \cdot (0)^2 \cdot (1{,}25\,m^2) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F_{\kappa\iota\nu} = 98{,}928\,N$$

Και άρα η απαίτηση ροπής στους τροχούς είναι:

$$T = F_{\kappa\iota\nu} \cdot R_{\tau\rho o\chi o\acute{\upsilon}} = (98{,}928\ \ N) \cdot (0{,}20955\,m) = 20{,}73\,Nm$$

Ονομαστική Ταχύτητα σε Ανηφόρα με Κλίση 5%

Ανηφόρα κλίσης 5% σημαίνει κίνηση υπό γωνία $\theta = 2{,}862°$.

Για ομαλή κίνηση σε ευθεία με σταθερή ταχύτητα $35\,{}^{km}/_{h}$ η κινητήριος δύναμη που απαιτείται από το σύστημα είναι:

$$F_{\kappa\iota\nu} = (210kg) \cdot \left(9{,}806\frac{m}{s^2}\right) \cdot (sin2{,}862° + 0{,}012 \cdot cos2{,}862°) + (210kg) \cdot 0 +$$

$$+ \frac{1}{2} \cdot (0{,}3) \cdot \left(1{,}225\frac{kg}{m^3}\right) \cdot \left(9{,}722\frac{m}{s}\right)^2 \cdot (1{,}25\,m^2) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F_{\kappa\iota\nu} = 149{,}224\ N$$

Και άρα η απαίτηση ροπής στους τροχούς είναι:

$$T = F_{\kappa\iota\nu} \cdot R_{\tau\rho o\chi o\acute{\upsilon}} = (149{,}224\ N) \cdot (0{,}20955\ m) = 31{,}27\ Nm$$

<u>Εκκίνηση σε Ανηφόρα με Κλίση 5%</u>

Καθώς η εκκίνηση σε ανηφόρα είναι η πιο επίπονη για το όχημα κατάσταση, μειώνονται οι απαιτήσεις σε επιτάχυνση, καθώς ο στόχος είναι ο κινητήρας να μπορεί να κινήσει το όχημα εάν αυτό σταματήσει σε ανηφόρα. Έτσι, το όχημα πρέπει να αποκτά την ονομαστική του ταχύτητα σε $60\ s$, οπότε κατά την εκκίνηση απαιτείται επιτάχυνση μέτρου $\alpha = \frac{\Delta u}{\Delta t} = \frac{9{,}722\ {}^{m}/_{s} - 0}{60\ s} = 0{,}162\ \frac{m}{s^2}$.

$$F_{\kappa\iota\nu} = (210kg) \cdot \left(9{,}806\frac{m}{s^2}\right) \cdot (sin2{,}862° + 0{,}015 \cdot cos2{,}862°) +$$

$$+(210kg) \cdot \left(0{,}162\ {}^{m}/_{s^2}\right) + \frac{1}{2} \cdot (0{,}3) \cdot \left(1{,}225\frac{kg}{m^3}\right) \cdot (0)^2 \cdot (1{,}25\ m^2) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F_{\kappa\iota\nu} = 161{,}535\ N$$

Και άρα η απαίτηση ροπής στους τροχούς είναι:

$$T = F_{\kappa\iota\nu} \cdot R_{\tau\rho o\chi o\acute{\upsilon}} = (161{,}535\ \ N) \cdot (0{,}20955\ m) = 33{,}85\ Nm$$

Καθώς το όχημα δεν έχει κατασκευαστεί ακόμα, η μηχανή θα πρέπει να υπερδιαστασιολογηθεί έτσι ώστε να μπορέσει να καλύψει τις απαιτήσεις του οχήματος, αν αυτό διαθέτει διαφορετικά χαρακτηριστικά από αυτά που έχουν ληφθεί υπόψη κατά την ανάλυση αυτή.

Τελικά, καθορίζεται η απαίτηση ροπής στους τροχούς ως εξής:

- Η μηχανή θα πρέπει όταν η απαίτηση ροπής στους τροχούς είναι $10\ Nm$ να λειτουργεί με το βέλτιστο δυνατό τρόπο (χαμηλή κατανάλωση ενέργειας – υψηλός βαθμός απόδοσης).
- Η μηχανή θα πρέπει να μπορεί να υποστηρίξει απαίτηση ροπής $50\ Nm$ στους τροχούς.

Με βάση τα όσα αναφέρονται στην ενότητα 3.3.2, για τις δύο διαμορφώσεις του κινητηρίου συστήματος, ισχύουν τα εξής:

	Διαμόρφωση χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων	Διαμόρφωση με κιβώτιο ταχυτήτων λόγου 3:1
Ονομαστική Ροπή	$10\ Nm$	$3{,}333\ Nm$
Μέγιστη Ροπή	$50\ Nm$	$16{,}667\ Nm$
Ονομαστική ταχύτητα περιστροφής	$450\ \Sigma A\Lambda$	$1350\ \Sigma A\Lambda$

Πίνακας 3.2 – Καθορισμός χαρακτηριστικών μηχανών

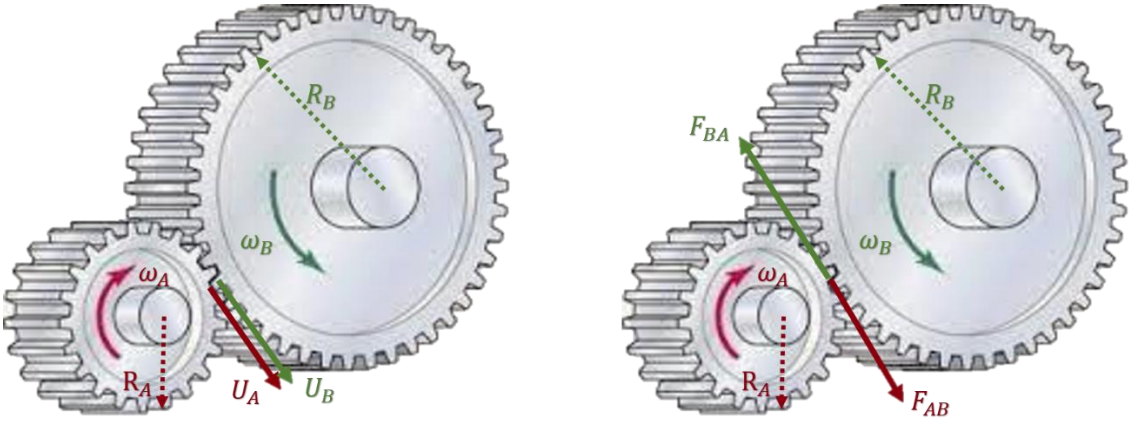
3.4 ΣΧΕΣΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ – ΤΡΟΧΟΥ

Προκειμένου να αναζητηθεί η βέλτιστη τοπολογία κινητήριου συστήματος η οποία θα οδηγήσει στην μικρότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας, κρίνεται σκόπιμη η μελέτη της επίδρασης ενός συστήματος μετάδοσης κίνησης, με λόγο μετάδοσης ταχύτητας:

$$N_{K.T} = \frac{n_{\kappa\iota\nu\eta\tau\acute{\eta}\rho\alpha}}{n_{\tau\rho o\chi o\acute{\upsilon}}} = \frac{\omega_{\kappa\iota\nu\eta\tau\acute{\eta}\rho\alpha}}{\omega_{\tau\rho o\chi o\acute{\upsilon}}} \tag{3.18}$$

Συγκεκριμένα, εξετάζεται ένας «μειωτήρας», ο οποίος θα επιτρέψει στη μηχανή να περιστρέφεται με υψηλότερη ταχύτητα απ' ότι οι τροχοί, αλλά ταυτόχρονα να παρουσιάζει μικρότερη απαίτηση σε ροπή, οδηγώντας ενδεχομένως σε μικρότερη διαστασιολόγηση της και άρα σε μικρότερη μάζα.

Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η ενδεικτική λειτουργία ενός συστήματος μετάδοσης κίνησης, το οποίο βασίζεται στην επαφή γραναζιών διαφορετικών διαμέτρων.



Σχήμα 3.2 – Ενδεικτική λειτουργία «μειωτήρα» με γρανάζια διαφορετικής διαμέτρου

Για την ομαλή λειτουργία των γραναζιών χωρίς ολίσθηση, οι εφαπτομενικές ταχύτητες στο σημείο επαφής θα πρέπει να είναι ίσες. Αυτό σημαίνει ότι:

$$U_A = U_B \implies \omega_A \cdot R_A = \omega_B \cdot R_B \quad \text{ή} \quad \frac{\omega_A}{R_B} = \frac{\omega_B}{R_A} \tag{3.19}$$

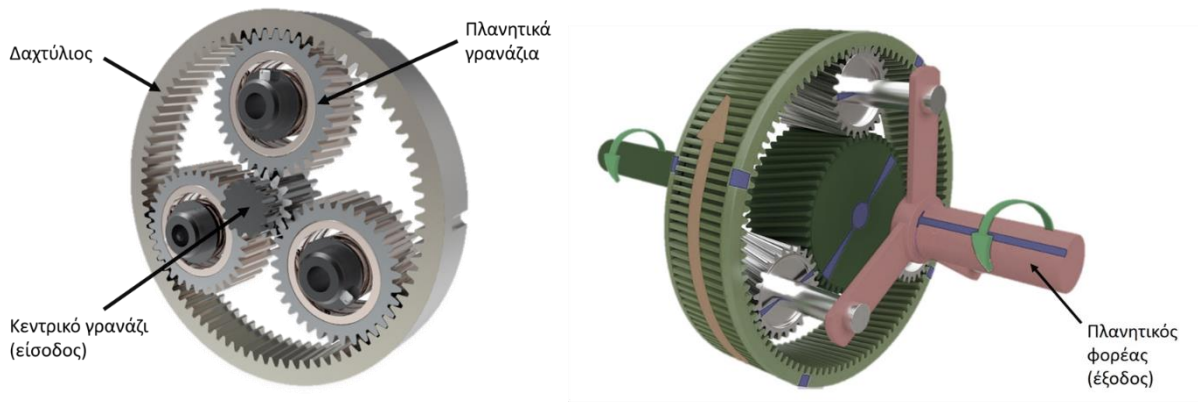
Επομένως, θεωρώντας για παράδειγμα ότι το γρανάζι Α, αντιστοιχεί στο κινητήριο σύστημα και το γρανάζι Β στον άξονα κίνησης των τροχών, για μία ενδεικτική σχέση ακτινών $R_B = 3 \cdot R_A$, η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα (Α) θα είναι τριπλάσια από την αντίστοιχη του τροχού (Β).

Ταυτόχρονα, η ροπή του ζεύγους δυνάμεων που στρέφει τα γρανάζια θα είναι τρεις φορές μεγαλύτερη για το Α από ότι στο Β, γιατί ενώ οι δυνάμεις είναι ίσες, η απόσταση μεταξύ των φορέων τους τριπλασιάζεται για $R_B = 3 \cdot R_A$. Σημειώνεται ότι ζεύγος δυνάμεων συνιστούν δύο αντίθετες δυνάμεις με ίσα μέτρα και διαφορετικούς φορείς. Το μέτρο της ροπής του ζεύγους είναι ίσο με το γινόμενο του μέτρου των δυνάμεων επί την κάθετη απόσταση μεταξύ των φορέων τους $T = F \cdot d$.

Με βάση λοιπόν την παραπάνω αρχή λειτουργίας και ανάλογα με τον λόγο μετάδοσης $N_{K.T}$ που θα χρησιμοποιηθεί (π.χ $N_{K.T} = 3:1$), είναι δυνατόν να επιτευχθεί κατασκευή μηχανής με μικρότερη απαίτηση σε ροπή, η οποία ταυτόχρονα θα στρέφεται ταχύτερα από μία μηχανή απευθείας συνδεδεμένη στους τροχούς, δηλαδή:

$$T_{\kappa\iota\nu\eta\tau\acute{\eta}\rho\alpha} = \frac{1}{N_{K.T}} \cdot T_{\tau\rho o\chi o\acute{\upsilon}} \quad \kappa\alpha\iota \quad \omega_{\kappa\iota\nu\eta\tau\acute{\eta}\rho\alpha} = N_{K.T} \cdot \omega_{\tau\rho o\chi o\acute{\upsilon}} \tag{3.20}$$

Ένα τέτοιο μηχανικό σύστημα είναι δυνατόν να εισάγει σημαντικές απώλειες. Για τους σκοπούς της παρούσας εφαρμογής που αφορά τη κατασκευή οχήματος εξοικονόμησης ενέργειας, κρίθηκε σκόπιμο να αναζητηθεί κάποιο σύστημα μετάδοσης το οποίο θα παρουσιάζει πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης, έτσι ώστε η παραπάνω τοπολογία να καθίσταται ανταγωνιστική. Μία από τις αποδοτικότερες επιλογές είναι ένα σύστημα ομοαξονικών πλανητικών γραναζιών, των οποίων η λειτουργία φαίνεται ενδεικτικά στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3 – Ενδεικτική λειτουργία επικυκλικού συστήματος μετάδοσης

Όπως φαίνεται από το σχήμα 3.3, το επικυκλικό (πλανητικό) σύστημα μετάδοσης αποτελείται από τέσσερα στοιχεία: το κεντρικό γρανάζι (ήλιος), τα γρανάζια που περιστρέφονται γύρω από τον ήλιο (δορυφόροι), τον πλανητικό φορέα και το γρανάζι δακτύλιο με την εσωτερική οδόντωση (κορόνα). Φυσικά, η λειτουργία του συστήματος αυτού, βασίζεται στον στοιχειώδη μηχανισμό γραναζιών που περιγράφηκε παραπάνω. Συνήθως, τον ρόλο της εισόδου έχει το κεντρικό γρανάζι, ενώ η έξοδος προς τους τροχούς λαμβάνεται από τον πλανητικό φορέα που συνδέεται στους δορυφόρους, με τον δακτύλιο να μένει ακίνητος. Επομένως, η κίνηση στον «ήλιο» προέρχεται από τον κινητήρα, και μέσω του πλανητικού φορέα μεταδίδεται προς τον άξονα του τροχού. Έπειτα από ανάλυση η οποία βασίζεται στο μηχανισμό του σχήματος 3.2, ο λόγος μετάδοσης του παραπάνω συστήματος δίνεται από τη σχέση:

$$N_{K.T} = \frac{\omega_{\kappa\iota\nu\eta\tau\acute{\eta}\rho\alpha}}{\omega_{\tau\rho o\chi o\acute{\upsilon}}} = \frac{\omega_{\acute{\eta}\lambda\iota o\upsilon}}{\omega_{\varphi o\rho\acute{\varepsilon}\alpha}} = 1 + \frac{R_{\delta\alpha\kappa\tau\upsilon\lambda\acute{\iota}o\upsilon}}{R_{\acute{\eta}\lambda\iota o\upsilon}} \tag{3.21}$$

Άρα λοιπόν, για την επίτευξη σχέσης μείωσης ταχύτητας 3:1, η οποία εξετάστηκε για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, απαιτείται η εξής σχέση ακτινών για το κεντρικό γρανάζι και τον δακτύλιο:

$$R_{\delta\alpha\kappa\tau\upsilon\lambda\acute{\iota}o\upsilon} = 2 \cdot R_{\acute{\eta}\lambda\iota o\upsilon} \tag{3.22}$$

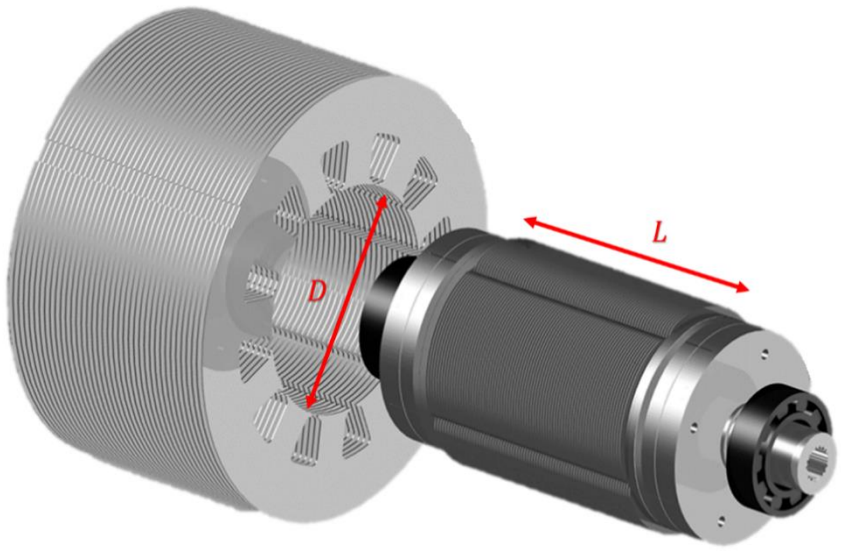
Σημειώνεται πως τα γρανάζια αυτά σημειώνουν πολύ υψηλές αποδόσεις, που ανάλογα με το κατασκευαστή μπορούν να φτάσουν μέχρι και το 97%. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε, τα πλεονεκτήματα από την προσθήκη ενός τέτοιου μειωτήρα, θα αξιολογηθούν στη συνέχεια, μέσω της σύγκρισης των τελικών μηχανών για τις δύο εξεταζόμενες τοπολογίες.

3.5 ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ

Η δυνατότητα αξιοποίησης μεγάλων υπολογιστικών πόρων σε συνδυασμό με την ύπαρξη εξελιγμένων λογισμικών που στηρίζονται στη χρήση πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis), καθιστούν την σχεδίαση ενός ηλεκτρικού κινητήριου συστήματος εφικτή με τεράστια ακρίβεια. Στην παρούσα ενότητα, δίνεται έμφαση σε μια πρώιμη εκτίμηση των χαρακτηριστικών της μηχανής, η οποία παρά το γεγονός πως εμπεριέχει σημαντικό σφάλμα και αγνοεί τη λεπτομερή διαμόρφωση του ηλεκτρικού κινητήρα, μπορεί να απεικονίσει σε εναν ικανοποιητικό βαθμό την αναγκαία γεωμετρική διαμόρφωση του διακένου καθώς και ορισμένα βασικά μεγέθη φορτίσεων της μηχανής.

Συγκεκριμένα, η προκαταρκτική γεωμετρική διαμόρφωση, αφορά τον προσδιορισμό της αναλογίας διαστάσεων διαμέτρου D και ενεργού μήκους L του διακένου, οι οποίες αποτελούν θεμελιώδεις παραμέτρους στην επίδοση της μηχανής. Οι διαστάσεις αυτές φαίνονται στο σχήμα 3.4.

Παράλληλα, όπως αναφέρθηκε, γίνεται αναφορά σε ορισμένα μεγέθη θερμικών, ηλεκτρικών και μαγνητικών φορτίσεων, με βάση κάποιες εμπειρικές τιμές που έχουν επικρατήσει στην σχεδίαση ηλεκτρικών μηχανών.



Σχήμα 3.4 – Διαστάσεις D,L της μηχανής

3.5.1 Πάχος Διακένου

Πρωτεύουσας σημασίας παράμετρος για την επίτευξη της επιθυμητής αναπτυσσόμενης ροπής στο διάκενο, συνιστά το πάχος του διακένου. Η γενική αρχή λειτουργίας στην οποία στηρίζεται η επιλογή του κατάλληλου μήκους διακένου , είναι πως όσο μικρότερη είναι αυτή η παράμετρος, τόσο μεγαλύτερες θα είναι οι συνιστώσες πυκνότητας δύναμης, ή ισοδύναμα της πίεσης, με αποτέλεσμα το μέγεθος της ροπής να είναι σημαντικά υψηλότερο. Ωστόσο, η επιλογή της παραμέτρου αυτής, υπόκειται σε κάποιους σημαντικούς τεχνικούς περιορισμούς που δεν επιτρέπουν την ελαχιστοποίηση της. Συγκεκριμένα, η υλοποίηση του μικρότερου δυνατού διακένου, καθορίζεται από την ακρίβεια της κατασκευής , όπως και τη δυνατότητα μηχανικής στήριξης του δρομέα και του στάτη. Φυσικά, όταν αναφέρεται η ακρίβεια της κατασκευής, πέρα από την σωστή τοποθέτηση του πυρήνα και των μονίμων μαγνητών, θα πρέπει να περιοριστούν στον ελάχιστο δυνατό βαθμό οποιεσδήποτε εκκεντρότητες στον άξονα της μηχανής, που θα οδηγούσαν σε κατασκευαστική ασυμμετρία (ασύμμετρο διάκενο).

3.5.2 Ειδική Μαγνητική Φόρτιση

Η ειδική μαγνητική φόρτιση $\bar{B}$, είναι ένα μέγεθος που απεικονίζει τη μέση τιμή πυκνότητας μαγνητικής ροής , η οποία εμφανίζεται στο διάκενο, και συνδέει τον αριθμό των πόλων P της μηχανής και την ροή ανά πόλο Φ , με τα θεμελιώδη γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

$$\bar{B} = \frac{P \cdot \Phi}{\pi \cdot D \cdot L} \tag{3.23}$$

Όπου D είναι η διάμετρος διακένου και L το ενεργό αξονικό μήκος της μηχανής. Ο όρος $\pi \cdot D \cdot L$ στον παρονομαστή, συνιστά την συνολική κυλινδρική επιφάνεια του διακένου της μηχανής.

Τυπικές τιμές τις οποίες λαμβάνει συνήθως η ειδική μαγνητική φόρτιση είναι $0{,}4\,T$ με $0{,}7\,T$, λαμβάνοντας υπ΄ όψιν το γεγονός πως τα δόντια σιδήρου καλύπτουν περίπου το 1/2 με 1/3 του βήματος αύλακος της μηχανής. Ωστόσο, σε ειδικές εφαρμογές με μεγάλες απαιτήσεις σε πυκνότητα ροπής, όπου πρωτεύοντα ρόλο διαδραματίζει η επίδοση, η μαγνητική φόρτιση θα μπορούσε να φτάσει και το $1\,T$. Συνήθως, το άνω όριο του μεγέθους αυτού, τίθεται σπό την εμφάνιση του κορεσμού στο σιδηρομαγνητικό υλικό, καθώς συνεχής λειτουργία στην περιοχή αυτή, επιβαρύνει τη μηχανή με μη γραμμικά αυξανόμενες απώλειες πυρήνα. Αυτό είναι το αντίτιμο για την ενισχυμένη ικανότητα παραγωγής ροπής και ισχύος, για υψηλότερη τιμή μαγνητικής φόρτισης.

3.5.3 Ειδική Ηλεκτρική Φόρτιση

Το μέγεθος της ειδικής ηλεκτρικής φόρτισης ac, προσδιορίζεται από την ενεργό τιμή των αμπερελιγμάτων ανά μέτρο περιφέρειας διακένου, σύμφωνα με τη σχέση :

$$ac = \frac{3 \cdot 2 \cdot N_{\varphi} \cdot I_{rms}}{\pi \cdot D} \tag{3.24}$$

Όπου N_φ είναι ο συνολικός αριθμός εν σειρά ελιγμάτων ανά φάση, I_{rms} η ενεργός τιμή του ρεύματος και πD η περιφέρεια του διακένου. Συνήθεις τιμές που λαμβάνει η ειδική ηλεκτρική φόρτιση σε τυπικές εφαρμογές σύγχρονων μηχανών είναι από $15.000\ AE/m$ ως $45.000\ AE/m$. Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση μαζί με την μαγνητική φόρτιση, που αναλύθηκε νωρίτερα, αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες στην διαμόρφωση της ικανότητας παραγωγής ροπής μιας δεδομένης μηχανής. Όσο υψηλότερη η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής φόρτισης, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η ικανότητα παραγωγής ροπής, με αντίτιμο ωστόσο και πάλι τις μη γραμμικά αυξανόμενες απώλειες της μηχανής. Σε αντίθεση όμως με την μαγνητική φόρτιση, η ηλεκτρική συνδέεται άμεσα με ένα άλλο είδος απωλειών, που είναι οι απώλειες χαλκού της μηχανής.

3.5.4 Πυκνότητα Ρεύματος Τυλίγματος

Πολύ σημαντικό μέγεθος, το οποίο σχετίζεται με την ειδική ηλεκτρική φόρτιση, αποτελεί η πυκνότητα ρεύματος που εφαρμόζεται στα τυλίγματα χαλκού και η οποία ορίζεται μέσω του εμβαδού των αυλακιών της μηχανής ως εξής:

$$J_{eff} = \frac{N_s \cdot I_{rms}}{A_{eff}} \tag{3.25}$$

Όπου, N_s ο αριθμός των ελιγμάτων ανά αύλακα, I_{rms} , η ενεργός τιμή του φασικού ρεύματος και A_{eff} το «ενεργό» εμβαδόν χαλκού της αύλακας.

Παράλληλα, θεωρώντας ένα συντελεστή πληρότητας αύλακος ff καθώς δεν είναι δυνατόν να καλύπτεται όλη η επιφάνεια του αυλακιού από χαλκό, ορίζεται η έννοια της «θεωρητικής» πυκνότητας ρεύματος αύλακος J_{slot}, η οποία θα αντιστοιχούσε στο συνολικό εμβαδό της αύλακας A_{slot}:

$$J_{slot} = ff \cdot J_{eff} = \frac{N_s \cdot I_{rms}}{A_{eff}/ff} = \frac{N_s \cdot I_{rms}}{A_{slot}} \tag{3.26}$$

Η παραπάνω πυκνότητα ρεύματος είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την ανάλυση στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων.

Επιπλέον, τόσο η θερμική συμπεριφορά όσο και οι ωμικές απώλειες στα τυλίγματα της μηχανής είναι άμεσα συνυφασμένα με το μέτρο της πυκνότητας ρεύματος. Αυτό συμβαίνει καθώς τόσο στην ονομαστική λειτουργία, όσο και σε κατάσταση υπερφόρτισης, οι θερμικές απώλειες που προκαλούνται, επιφέρουν αύξηση της θερμοκρασίας της μηχανής με κίνδυνο καταστροφής των υλικών, εφόσον ξεπεραστεί το θερμικό όριο αντοχής τους ή τον υποβιβασμό της μονωτικής ικανότητας των μονώσεων που χρησιμοποιούνται.

Για το λόγο αυτό, θεωρείται συνήθως ένα εμπειρικό όριο πυκνότητας ρεύματος της τάξης των $4\ A/mm^2$, πάνω από το οποίο εμφανίζεται η ανάγκη εξαναγκασμένης ψύξης, το οποίο για μία εφαρμογή περιορισμένης ισχύος όπως η παρούσα, θα μπορούσε να είναι ένα σύστημα τεχνητού αερισμού. Οι εξεταζόμενες τιμές ρεύματος δεν ξεπερνούν την παραπάνω τιμή, παρά μόνο σε μεταβατικά φαινόμενα, όπως εκκίνηση σε ανηφόρα, όπου απαιτείται ένα αποδεκτό ποσοστό υπερφόρτισης.

3.5.5 Ισχύς Εξόδου Μηχανής

Τα δύο παραπάνω μεγέθη φορτίσεων συνδέονται με τη λεγόμενη σχέση εξόδου της ηλεκτρικής μηχανής, η οποία δίνει μία αρχική εκτίμηση της ροπής ή της ισχύος εξόδου. Για την εύρεση αυτής της σχέσης, λαμβάνεται υπόψη ότι:

Η ενεργός τιμή της επαγόμενης τάσης, E_{rms}, δίνεται από τη σχέση:

$$E_{rms} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot k_w \cdot f \cdot N_\varphi \cdot \Phi \quad \text{ή} \quad E_{rms} = 4{,}44 \cdot k_w \cdot f \cdot N_\varphi \cdot \Phi \tag{3.27}$$

Όπου k_w ο συντελεστής τυλίγματος (θεμελιώδους συνιστώσας), f η ηλεκτρική συχνότητα, N_φ είναι ο συνολικός αριθμός εν σειρά ελιγμάτων ανά φάση και Φ η μαγνητική (θεμελιώδης) ροή ανά πόλο. Σημειώνεται πως τα εν σειρά ενεργά τυλίγματα μίας φάσης ορίζονται:

- Για εν σειρά συνδεσμολογία όλων των τυλιγμάτων ως:

$$N_\varphi = \frac{P}{2} \cdot q \cdot layers \cdot N_{slot} \tag{3.28α}$$

- Για παράλληλη συνδεσμολογία ως προς κάθε ζεύγος πόλων, ως:

$$N_\varphi = q \cdot layers \cdot N_{slot} \tag{3.28β}$$

Όπου q οι ομάδες πηνίων ή ο αριθμός διαδοχικών αυλάκων με πηνία της ίδιας φάσης, $layers$ ο αριθμός των στρωμάτων σε κάθε αύλακα και N_{slot} ο αριθμός των ελιγμάτων ανά στρώση και αύλακα.

Η φαινόμενη ισχύς της μηχανής δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$S = 3 \cdot E_{rms} \cdot I_{rms} \tag{3.29}$$

Όπου I_{rms}, η ενεργός τιμή του φασικού ρεύματος και E_{rms} η ενεργός τιμή της επαγόμενης τάσης.

Η ηλεκτρική συχνότητα f συνδέεται με την μηχανική ταχύτητα περιστροφής μέσω της σχέσης:

$$n = \frac{120 \cdot f}{P} \quad [\Sigma A\Lambda] \quad \text{ή} \quad n = \frac{2 \cdot f}{P} \quad [\Sigma A\Delta]$$

$$\Rightarrow \quad f = \frac{P}{2} \cdot n \tag{3.30}$$

Όπου n, η μηχανική ταχύτητα περιστροφής σε στροφές ανά δευτερόλεπτο (ΣΑΔ)

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις, εξάγεται η εξίσωση ισχύος εξόδου της ηλεκτρικής μηχανής:

$$S = 1{,}11 \cdot k_w \cdot \pi^2 \cdot \bar{B} \cdot ac \cdot D^2 \cdot L \cdot n \tag{3.31}$$

Μέσω της παραπάνω σχέσης, η ισχύς εξόδου συνδέεται τόσο με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά όσο και με τις ειδικές φορτίσεις της μηχανής. Συγκεκριμένα, η ισχύς της μηχανής είναι ανάλογη των φορτίσεων $\bar{B} \cdot ac$, ανάλογη του τετραγώνου της διαμέτρου διακένου D^2 και του ενεργού μήκους πυρήνα L. Επομένως, κατά την σχεδίαση μίας ηλεκτρικής μηχανής (είτε κινητήρα είτε γεννήτριας), θα πρέπει να γίνουν οι κατάλληλοι συμβιβασμοί στην επιλογή των παραπάνω παραμέτρων, έτσι ώστε να επιτυγχάνονται τα επιθυμητά χαρακτηριστικά επίδοσης (ισχύος, ροπής) χωρίς να θυσιάζονται άλλα στοιχεία της μηχανής, όπως η απόδοση (λόγω αυξημένων φορτίσεων και απωλειών) , το βάρος ή/και η μηχανική αντοχή του δρομέα (συνάρτηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών D,L).

3.5.6 Οριακή Τάση Διακένου

Μία πολύ σημαντική παράμετρος, η οποία αφορά τους μηχανικούς περιορισμούς της μηχανής, είναι το όριο της τάσεως διακένου σ_{max} και η οποία δεν θα πρέπει να ξεπερνάει την τιμή των $10\ tn/cm^2$. Η οριακή αυτή τάση, καθορίζεται από το μέτρο της φυγόκεντρης δύναμης που ασκείται στον δρομέα, ανά μονάδα επιφάνειας, και η οποία δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$F = m \cdot \omega_R \cdot R \tag{3.32}$$

Όπου m είναι η μάζα του δρομέα, ω_R η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής και R η ακτίνα του. Επομένως, η οριακή τάση διακένου διαμορφώνεται ως εξής:

$$\sigma_{max} = \frac{m \cdot \omega_R \cdot R}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot L} \Longrightarrow \sigma_{max} = \frac{m \cdot \omega_R}{2 \cdot \pi \cdot L} \tag{3.33}$$

3.5.7 Ηλεκτρομαγνητική Ροπή

Θεμελιώδες μέγεθος, το οποίο μπορεί να χαρακτηρίσει την επίδοση της μηχανής είναι η αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή στο διάκενο. Αρχικά, μέσω της πεδιακής προσέγγισης και του τανυστή του Maxwell, υπολογίζεται η μέση εφαπτομενική πίεση διακένου ως εξής:

$$P_t = \frac{1}{\pi \cdot D \cdot \mu_0} \cdot \oint \overrightarrow{B_n} \cdot \overrightarrow{B_t}\, dl \tag{3.34}$$

Όπου B_n, B_t είναι η μέση ακτινική και εφαπτομενική συνιστώσα της μαγνητικής επαγωγής διακένου αντίστοιχα, με το ολοκλήρωμα να εκτείνεται κατά μήκος της κλειστής γραμμής C που ορίζει η περιφέρεια του διακένου.

Εναλλακτικά, ορίζεται η μέση εφαπτομενική δύναμη στο διάκενο ως:

$$F_t = P_t \cdot A = P_t \cdot \pi \cdot D \cdot L \quad \Longrightarrow F_t = \frac{L}{\mu_0} \cdot \oint \overrightarrow{B_n} \cdot \overrightarrow{B_t}\, dl \tag{3.35}$$

Τελικά, θεωρώντας ότι:

$$\oint \overrightarrow{B_n} \cdot \overrightarrow{B_t}\, dl = \pi \cdot D \cdot \overline{B_n} \cdot \overline{B_t} \quad \kappa\alpha\iota \;\; T_{em} = F_t \cdot R$$

η εύρεση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής καταλήγει στην ακόλουθη εξίσωση:

$$T_{em} = \frac{D^2 L}{2 \cdot \mu_0} \cdot \pi \cdot \overline{B_n} \cdot \overline{B_t} \tag{3.36}$$

3.5.8 Εκτίμηση των Χαρακτηριστικών της Μηχανής

Εντός της ενότητας αυτής, καθορίζονται σε πρώιμο στάδιο οι βασικές διαστάσεις της μηχανής προς σχεδίαση, λαμβάνοντας υπ' όψιν κάποιες ενδεικτικές τιμές βασικών μαγνητικών, ηλεκτρικών και θερμικών μεγεθών. Ωστόσο, καθώς βασικό αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας συνιστά η αναλυτική διερεύνηση των βέλτιστων γεωμετρικών χαρακτηριστικών, η τελική επιλογή τους θα προκύψει έπειτα από ανάλυση ευαισθησίας με χρήση πεπερασμένων στοιχείων .

Αναλυτικότερα, για τους σκοπούς της συγκεκριμένης εφαρμογής, επιλέχθηκε μια σύγχρονη μονίμων επιφανειακών μαγνητών, λόγω της υψηλής πυκνότητας ροπής και της υψηλής απόδοσης που παρουσιάζει. Επιπλέον, προτιμήθηκε η χρήση κατανεμημένου τυλίγματος απλής στρώσης, το οποίο παρουσιάζει ευρεία χρήση σε κινητήρες πρόωσης ηλεκτρικών οχημάτων. Εφόσον μάλιστα γίνει δυνατό να περιοριστούν η κυμάτωση ροπής (μέσω κατάλληλης διαμόρφωσης γεωμετρίας) και οι απώλειες χαλκού, τα πλεονεκτήματα που προσφέρει το κατανεμημένο τύλιγμα είναι περισσότερα σε σχέση με τα αντίστοιχα του συγκεντρωμένου. Τέλος, επιλέγεται παράλληλη συνδεσμολογία των τυλιγμάτων ανά ζεύγος πόλων.

Παρακάτω, παρουσιάζεται μία πολύ πρώιμη εκτίμηση των χαρακτηριστικών της μηχανής, από τη γεωμετρική διαμόρφωση του διακένου (διαστάσεις D, L) μέχρι και τα μεγέθη ηλεκτρικών φορτίσεων, για τις δύο προτεινόμενες τοπολογίες συστήματος κίνησης:

<u>3.5.8.1 Λόγος Μετάδοσης 1:1</u>

Σύμφωνα με την παράγραφο 3.5.2, η μέση τιμή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο εκτιμήθηκε πως είναι:

$$\bar{B} = 0{,}6\, T$$

Επομένως, θεωρώντας την τυπική τιμή $\theta = 45^o$, για την γωνία μεταξύ εφαπτομενικής και ακτινικής συνιστώσας, αυτές προκύπτουν αντίστοιχα:

$$B_n = \bar{B} \cdot \sin(45^o) \quad \kappa\alpha\iota \quad B_t = \bar{B} \cdot \cos(45^o)$$

$$\Rightarrow B_n = B_t = 0{,}6 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = 0{,}424\, T$$

Προφανώς, η μηχανή θα πρέπει να διαστασιολογηθεί έτσι ώστε να μπορεί να αποδώσει την μέγιστη ζήτηση ροπής (π.χ. εκκίνηση σε ανηφόρα). Επομένως,

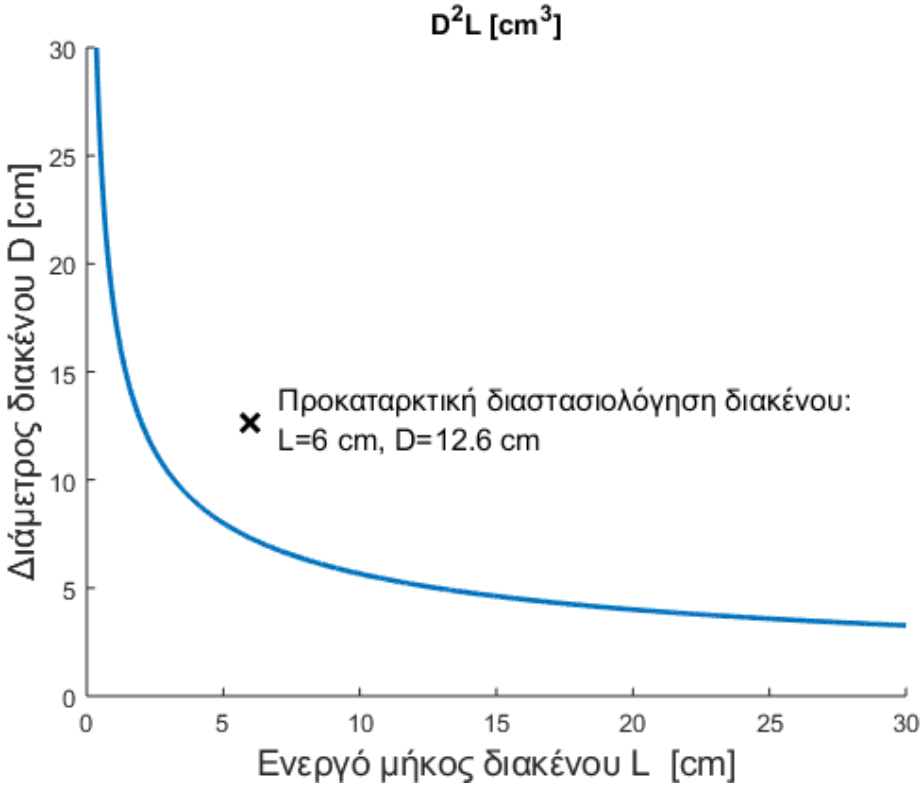
αντικαθιστώντας στην σχέση (3.36), για απαίτηση μέγιστης ηλεκτρομαγνητικής ροπής από την μηχανή $T_{em} = 50\ Nm$, προκύπτει:

$$T_{em} = \frac{D^2 L}{2 \cdot \mu_0} \cdot \pi \cdot \overline{B_n} \cdot \overline{B_t} \quad \Longrightarrow \quad D^2 L = \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot T_{em}}{\pi \cdot \overline{B_n} \cdot \overline{B_t}} = \frac{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 50}{\pi \cdot 0{,}424^2}$$

$$\Longrightarrow \boldsymbol{D^2 L = 222{,}22\ cm^3} \tag{3.37}$$

Όπου D η διάμετρος του διακένου και L το ενεργό μήκος διακένου στον άξονα του κινητήρα σε cm.

Στο σχήμα 3.5 παρουσιάζονται όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί γεωμετρικών χαρακτηριστικών D, L οι οποίοι ικανοποιούν τον περιορισμό (3.37), ώστε να παράγεται η μέγιστη δυνατή ροπή, καθώς και η τελική επιλογή γεωμετρίας διακένου.



Σχήμα 3.5 – Θεμελιώδη γεωμετρικά χαρακτηριστικά διακένου μηχανής

Προφανώς, η προκαταρκτική διαστασιολόγηση του διακένου (δείκτης 'x'), δεν αποτελεί παρά μόνο μία προσεγγιστική πρόβλεψη των τελικών διαστάσεων, προσπαθώντας προφανώς να ικανοποιείται ο περιορισμός $D^2 L > 222{,}22\ cm^3$. Συγκεκριμένα, όπως διαπιστώνεται από το παραπάνω σχήμα, προκειμένου η πυκνότητα ρεύματος στα αυλάκια να μην ξεπερνάει το εμπειρικό όριο φυσικής ψύξης των 4 A/mm^2, δηλαδή να υπάρχει επαρκής χώρος για τα τυλίγματα στις αύλακες, επιλέχθηκε μία υπερδιαστασιολόγηση της γεωμετρίας του διακένου, η οποία φυσικά καλύπτει την απαίτηση ροπής αφού βρίσκεται πάνω από την μπλε καμπύλη περιορισμού. Πράγματι, σε περίπτωση που επιλέγονταν διαστάσεις που βρίσκονταν ακριβώς πάνω στη καμπύλη, δεν θα υπήρχε διαθέσιμο το απαραίτητο εμβαδό για τις αύλακες, με αποτέλεσμα να οδηγηθεί η μηχανή σε μη αποδοτική λειτουργία. Επιπλέον, έχουν ληφθεί υπ' όψιν οι περιορισμοί από τους κανονισμούς του διαγωνισμού, ενώ έχει

προτιμηθεί μία μηχανή δισκοειδούς μορφής καθώς ο διαθέσιμος χώρος στο όχημα «Urban concept» το επιτρέπει, και η ταχύτητα περιστροφής δεν είναι αρκετά υψηλή ώστε να προκύπτει η αναγκαιότητα για επιμήκη μηχανή, λόγω μηχανικών περιορισμών.

Σε κάθε περίπτωση, η ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων που πραγματοποιείται στη συνέχεια, εξετάζει μεγάλο εύρος γεωμετρικών χαρακτηριστικών D, L και καταλήγει στην αποδοτικότερη επιλογή. Το ζεύγος τιμών λοιπόν το οποίο επιλέχθηκε κατά την πρώιμη αυτή σχεδίαση είναι:

$$\boldsymbol{L = 6\ cm\ , D = 1}2{,}6\ \boldsymbol{cm}$$

Το πάχος διακένου, λαμβάνοντας τις κατασκευαστικές δυσκολίες που εισάγει μία μηχανή επιφανειακών μαγνητών, επιλέγεται να είναι:

$$\boldsymbol{g = 0{,}7\ mm}$$

Η σχέση που συνδέει την ηλεκτρική συχνότητα με την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής [ΣΑΛ] και τους πόλους της μηχανής είναι, από την σχέση (3.30):

$$n = \frac{120 \cdot f}{P}$$

Επομένως, για $n = 450\ \Sigma A\Lambda$, η σχέση των πόλων με τη συχνότητα λειτουργίας είναι:

$$\frac{P}{f} = 0{,}266\ sec$$

Ωστόσο, η αυξημένη συχνότητα λειτουργίας αποτελεί καταλυτικό παράγοντα για την αύξηση των απωλειών πυρήνα. Για τον λόγο αυτό, κρίνεται σκόπιμο να επιλεγεί αριθμός πόλων της μηχανής που δεν θα οδηγεί σε συχνότητα λειτουργίας, μεγαλύτερης των 50 Hz. Επιπλέον, κατά τη γενική περίπτωση, όσο πιο γρήγορα στρέφεται μία μηχανή, τόσο μικρότερος ο αριθμός πόλων που επιλέγεται, ενώ το αντίθετο συμβαίνει στις χαμηλόστροφες μηχανές. Πράγματι, σύμφωνα με την μεταγενέστερη ανάλυση, μία παράμετρος γεωμετρίας που εξετάζεται είναι και ο αριθμός των πόλων. Συγκεκριμένα, η τελική επιλογή περιλαμβάνει μια 8-πολική γεωμετρία μηχανής, που οδηγεί σε μεγάλη πυκνότητα ροπής και υψηλή απόδοση.

Επομένως, το ζεύγος τιμών πόλων και ονομαστικής συχνότητας, τελικά είναι:

$$(P, f) = (8\ \pi\acute{o}\lambda o\iota, 30{,}08\ Hz)$$

Η μαγνητική ροή ανά πόλο μπορεί να υπολογιστεί μέσω της ειδικής μαγνητικής φόρτισης $\bar{B}$ και της σχέσης (3.23) ως εξής:

$$\Phi = \frac{\pi \cdot D \cdot L \cdot \bar{B}}{P} = \frac{\pi \cdot 12{,}6cm \cdot 6cm \cdot 0{,}6T}{8} \Longrightarrow \Phi = 1{,}781\ mWb$$

Θεωρώντας πως η DC τάση που μπορεί να παρέχει η μπαταρία είναι 48 V (μέγιστο επιτρεπτό όριο από τους κανονισμούς του διαγωνισμού), η τάξη μεγέθους για την

ενεργό τιμή της φασικής επαγόμενης τάσης στα τυλίγματα της μηχανής, λαμβάνοντας υπ' όψιν και την πτώση τάσης, είναι:

$$E_{rms} \approx \frac{m_a \cdot \frac{V_{dc}}{2}}{\sqrt{2}} - I \cdot R \Longrightarrow E_{rms} \approx \ 12\ V$$

Άρα, σύμφωνα με την σχέση (3.27) για την ενεργό τιμή της επαγόμενης τάσης E_{rms}, και θεωρώντας μία τυπική τιμή συντελεστή τυλίγματος, για κατανεμημένο τύλιγμα, $k_w = 0.95$, μπορεί να βρεθεί ο συνολικός αριθμός εν σειρά ελιγμάτων ανά φάση:

$$N_\varphi = \frac{E_{rms}}{4{,}44 \cdot k_w \cdot f \cdot \Phi} = 52\ \varepsilon\lambda\acute{\iota}\gamma\mu\alpha\tau\alpha$$

Η ενεργός τιμή του ρεύματος δίνεται προσεγγιστικά, θεωρώντας μοναδιαίο συντελεστή ισχύος:

$$I_{rms} = \frac{P_{el}}{3 \cdot E_{rms}}$$

Όπου, P_{el} η ονομαστική ισχύς μόνιμης κατάστασης, και δίνεται ως:

$$P_{el} = T_{em} \cdot \omega_{\kappa\iota\nu} = 10Nm \cdot \frac{2\pi \cdot 450}{60} r/s = 471\ W$$

Άρα:

$$I_{rms} = \frac{P_{el}}{3 \cdot E_{rms}} = \frac{471}{3 \cdot 12} = 13{,}08\ A$$

Τέλος, η ειδική ηλεκτρική διαμορφώνεται από την σχέση (3.25) ως εξής:

$$ac = \frac{3 \cdot 2 \cdot 52 \cdot 13{,}08\ A}{\pi \cdot 12{,}6cm} = 10.309\ AE/m$$

Θεωρώντας πως η μηχανή λειτουργεί στη μόνιμη κατάσταση με πυκνότητα ρεύματος $J_{eff} = 2\ A/mm^2$, προκειμένου να υπάρχει περιθώριο υπερφόρτισης μέχρι τα $4\ A/mm^2$, και για παράλληλη συνδεσμολογία των τυλιγμάτων ανά ζεύγος πόλων με $q = 2$ ομάδες πηνίων, το πραγματικό εμβαδό χαλκού μέσα στο αυλάκι θα είναι, μέσω της σχέσης (3.26):

$$A_{eff} = A_{cu} = \frac{N_s \cdot I_{rms}}{J_{eff}} = \frac{52/2 \cdot 13{,}08}{2} = 170{,}04\ mm^2$$

Ωστόσο, θεωρώντας τυπικό συντελεστή πληρότητας αύλακος για κατανεμημένο τύλιγμα:

$$ff = 0{,}45$$

Το συνολικό εμβαδόν του αυλακιού θα είναι:

$$A_{slot} = \frac{A_{cu}}{ff} = 377{,}87\ mm^2$$

3.5.8.2 Λόγος Μετάδοσης 3:1

Όπως και για τη προηγούμενη τοπολογία, εκτιμάται πως η μέση τιμή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο είναι:

$$\bar{B} = 0{,}6\ T$$

Επομένως, θεωρώντας την τυπική τιμή $\theta = 45^o$, για την γωνία μεταξύ εφαπτομενικής και ακτινικής συνιστώσας, αυτές προκύπτουν αντίστοιχα:

$$B_n = \bar{B} \cdot \sin(45^o) \quad \kappa\alpha\iota \quad B_t = \bar{B} \cdot \cos(45^o)$$

$$\Rightarrow B_n = B_t = 0{,}6 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = 0{,}424\ T$$

Προφανώς, η μηχανή θα πρέπει πάλι να διαστασιολογηθεί έτσι ώστε να μπορεί να αποδώσει την μέγιστη ζήτηση ροπής, η οποία φυσικά λόγο της σχέσης μετάδοσης θα είναι υποτριπλάσια $T_{em} = 50/3\ Nm$. Επομένως, αντικαθιστώντας στην σχέση (3.36), προκύπτει:

$$T_{em} = \frac{D^2 L}{2 \cdot \mu_0} \cdot \pi \cdot \overline{B_n} \cdot \overline{B_t} \quad \Longrightarrow \quad D^2 L = \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot T_{em}}{\pi \cdot \overline{B_n} \cdot \overline{B_t}} = \frac{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 16{,}67}{\pi \cdot 0{,}424^2}$$

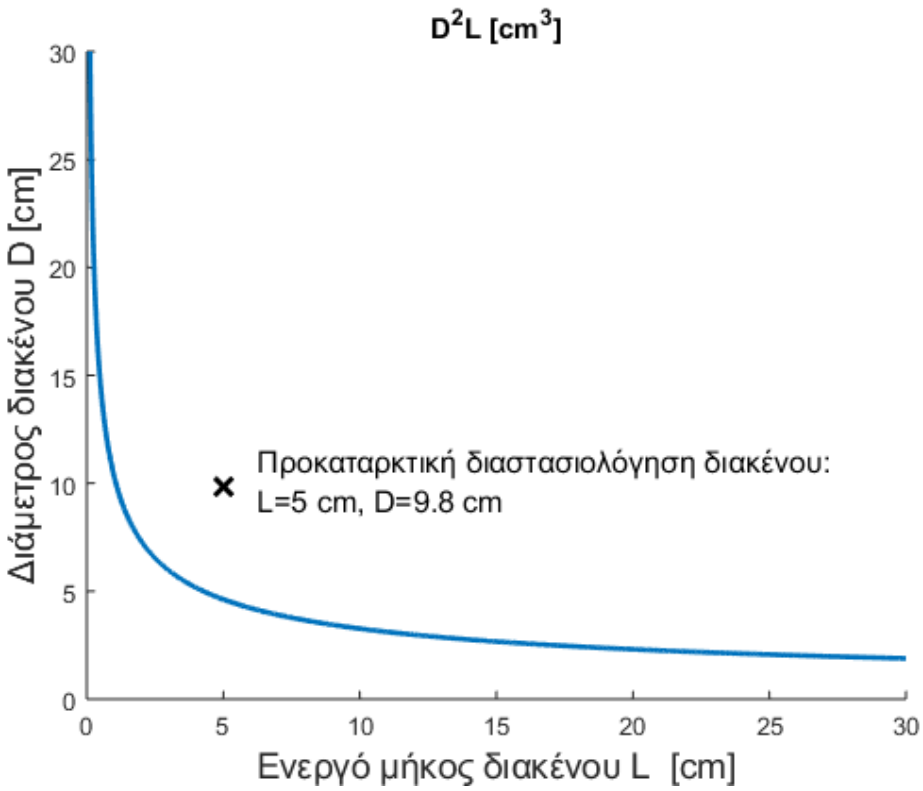
$$\Longrightarrow \boldsymbol{D^2 L = 74{,}07 cm^3} \tag{3.38}$$

Όπου D η διάμετρος του διακένου και L το ενεργό μήκος διακένου στον άξονα του κινητήρα σε cm.

Στο σχήμα 3.6 παρουσιάζονται όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί γεωμετρικών χαρακτηριστικών D, L οι οποίοι ικανοποιούν τον περιορισμό (3.38), ώστε να παράγεται η μέγιστη δυνατή ροπή, καθώς και η πρώιμη επιλογή γεωμετρίας διακένου.

Προφανώς, η προκαταρκτική διαστασιολόγηση του διακένου (δείκτης ‘x’), δεν αποτελεί παρά μόνο μία προσεγγιστική πρόβλεψη των τελικών διαστάσεων, προσπαθώντας προφανώς να ικανοποιείται ο περιορισμός $D^2 L > 74{,}07\ cm^3$. Συγκεκριμένα, όπως διαπιστώνεται από το σχήμα 3.6, προκειμένου η πυκνότητα ρεύματος στα αυλάκια να μην ξεπερνάει το εμπειρικό όριο φυσικής ψύξης των 4 A/mm^2, δηλαδή να υπάρχει επαρκής χώρος για τα τυλίγματα στις αύλακες, επιλέγεται μία υπερδιαστασιολόγηση της γεωμετρίας του διακένου, η οποία φυσικά καλύπτει την απαίτηση ροπής αφού βρίσκεται πάνω από την μπλε καμπύλη περιορισμού.

Πράγματι, σε περίπτωση που επιλέγονταν διαστάσεις που βρίσκονταν ακριβώς πάνω στη καμπύλη, δεν θα υπήρχε διαθέσιμο το απαραίτητο εμβαδό για τις αύλακες, με αποτέλεσμα να οδηγούμαστε σε μη αποδοτική λειτουργία. Επιπλέον, έχουν ληφθεί υπ’ όψιν οι περιορισμοί από τους κανονισμούς του διαγωνισμού, ενώ έχει προτιμηθεί μία μηχανή δισκοειδούς μορφής όπως και κατά την προηγούμενη ανάλυση.



Σχήμα 3.6 – Θεμελιώδη γεωμετρικά χαρακτηριστικά διακένου μηχανής

Σε κάθε περίπτωση, η ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων που πραγματοποιείται στη συνέχεια, εξετάζει μεγάλο εύρος γεωμετρικών χαρακτηριστικών D, L και καταλήγει στην αποδοτικότερη επιλογή. Το ζεύγος τιμών λοιπόν το οποίο επιλέχθηκε κατά την πρώιμη αυτή σχεδίαση είναι:

$$\boldsymbol{L = 5\ cm,\ \ D = 9,8\ cm}$$

Το πάχος διακένου, λαμβάνοντας τις κατασκευαστικές δυσκολίες που εισάγει μία μηχανή επιφανειακών μαγνητών, επιλέγεται να είναι:

$$\boldsymbol{g = 0,7\ mm}$$

Η σχέση που συνδέει την ηλεκτρική συχνότητα με την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής [ΣΑΛ] και τους πόλους της μηχανής είναι από την σχέση 3.24:

$$n = \frac{120 \cdot f}{P}$$

Επομένως, για $n = 1350\ \Sigma A\Lambda$, η σχέση των πόλων με τη συχνότητα λειτουργίας είναι:

$$\frac{P}{f} = 0{,}0889\ sec$$

Η αυξημένη συχνότητα λειτουργίας αποτελεί καταλυτικό παράγοντα για την αύξηση των απωλειών πυρήνα. Για τον λόγο αυτό, κρίνεται σκόπιμο να επιλεγεί αριθμός πόλων της μηχανής που δεν θα οδηγεί σε συχνότητα λειτουργίας, μεγαλύτερης των

50 Hz. Επιπλέον, κατά τη γενική περίπτωση, όσο πιο γρήγορα στρέφεται μία μηχανή, τόσο μικρότερος ο αριθμός πόλων που επιλέγεται, ενώ το αντίθετο συμβαίνει στις χαμηλόστροφες μηχανές. Συγκεκριμένα, η αρχική επιλογή περιλαμβάνει μια 4-πολική γεωμετρία μηχανής, που οδηγεί σε μεγάλη πυκνότητα ροπής και υψηλή απόδοση, καθώς και σε συχνότητα λειτουργίας μικρότερης των 50 Hz. Πράγματι, μία 6-πολική μηχανή, θα απαιτούσε ονομαστική συχνότητα λειτουργίας 67.5 Hz, κάτι που σαφώς θα μπορούσε να επιφέρει υψηλότερες απώλειες πυρήνα. Επομένως, το ζεύγος τιμών πόλων και ονομαστικής συχνότητας, τελικά είναι:

$$(P, f) = (4\ \pi\acute{o}\lambda o\iota, 45\ Hz)$$

Η μαγνητική ροή ανά πόλο μπορεί να υπολογιστεί μέσω της ειδικής μαγνητικής φόρτισης $\bar{B}$ και της σχέσης (3.24) ως εξής:

$$\Phi = \frac{\pi \cdot D \cdot L \cdot \bar{B}}{P} = \frac{\pi \cdot 9{,}8cm \cdot 5cm \cdot 0{,}6T}{4} \Longrightarrow \Phi = 2{,}309\ mWb$$

Θεωρώντας πως η DC τάση που μπορεί να παρέχει η μπαταρία είναι 48 V (μέγιστο επιτρεπτό όριο από τους κανονισμούς του διαγωνισμού), η τάξη μεγέθους για την ενεργό τιμή της φασικής επαγόμενης τάσης στα τυλίγματα της μηχανής είναι:

$$E_{rms} \approx \frac{m_a \cdot \frac{V_{dc}}{2}}{\sqrt{2}} - I \cdot R \Longrightarrow E_{rms} \approx\ 12\ V$$

Σύμφωνα με την σχέση (3.27) για την ενεργό τιμή της επαγόμενης τάσης E_{rms}, και θεωρώντας μία τυπική τιμή συντελεστή τυλίγματος, για κατανεμημένο τύλιγμα, $k_w = 0.95$, μπορεί να βρεθεί ο συνολικός αριθμός εν σειρά ελιγμάτων ανά φάση:

$$N_\varphi = \frac{E_{rms}}{4{,}44 \cdot k_w \cdot f \cdot \Phi} = 26\ \varepsilon\lambda\acute{\iota}\gamma\mu\alpha\tau\alpha$$

Η ενεργός τιμή του ρεύματος δίνεται προσεγγιστικά, θεωρώντας μοναδιαίο συντελεστή ισχύος:

$$I_{rms} = \frac{P_{el}}{3 \cdot E_{rms}}$$

Όπου, P_{el} η ονομαστική ισχύς μόνιμης κατάστασης, και δίνεται ως :

$$P_{el} = T_{em} \cdot \omega_{\kappa\iota\nu} = 3{,}33Nm \cdot \frac{2\pi \cdot 1350}{60} r/s = 471\ W$$

Άρα:

$$I_{rms} = \frac{P_{el}}{3 \cdot E_{rms}} = \frac{471}{3 \cdot 12} = 13{,}08\ A$$

Τέλος, η ειδική ηλεκτρική φόρτιση (βλ. Ενότητα 3.5.3) διαμορφώνεται από την σχέση (3.24) ως εξής:

$$ac = \frac{3 \cdot 2 \cdot 26 \cdot 13{,}08\ A}{\pi \cdot 9{,}8cm} = 6628\ AE/m$$

Θεωρώντας πως η μηχανή λειτουργεί στη μόνιμη κατάσταση με πυκνότητα ρεύματος $J_{eff} = 2\ A/mm^2$, προκειμένου να υπάρχει περιθώριο υπερφόρτισης μέχρι τα $4\ A/mm^2$, και για παράλληλη συνδεσμολογία των τυλιγμάτων ανά ζεύγος πόλων με q=4 ομάδες πηνίων, το πραγματικό εμβαδό χαλκού μέσα στο αυλάκι θα είναι, μέσω της σχέσης (3.26):

$$A_{eff} = A_{cu} = \frac{N_s \cdot I_{rms}}{J_{eff}} = \frac{26/4 \cdot 13{,}08}{2} = 42{,}51\ mm^2$$

Ωστόσο, λαμβάνοντας έναν τυπικό συντελεστή πληρότητας αύλακος για κατανεμημένο τύλιγμα:

$$ff = 0{,}45$$

Το συνολικό εμβαδόν του αυλακιού θα είναι:

$$A_{slot} = \frac{A_{cu}}{ff} = 94{,}47\ mm^2$$

3.5.9 Συμπέρασμα Προκαταρκτικής Σχεδίασης

Η παραπάνω ανάλυση για τις δύο συγκρινόμενες τοπολογίες, δεν αποτελεί παρά μόνο μία πολύ πρώιμη προσέγγιση των κύριων χαρακτηριστικών της τελικής μηχανής, που ωστόσο εμπεριέχει πολύ μεγάλο σφάλμα και απέχει σημαντικά από τις τελικές διαμορφώσεις που θα παρουσιαστούν σε επόμενο κεφάλαιο. Αυτό φυσικά δεν κρίνεται αρνητικό, από τη στιγμή που η προκαταρτκτική αυτή σχεδίαση αποτυπώνει μια αρχική εικόνα για τον κινητήρα, και τα εργαλεία ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEA) δίνουν σαφώς παραστατικότερα και πιο ακριβή αποτελέσματα. Η σημαντικότερη εξαγωγή συμπεράσματος από τα παραπάνω, είναι πως η προκαταρκτική γεωμετρική διαμόρφωση του διακένου, περιορίζει σε πρώτο βαθμό το πεδίο ορισμού της αναλογίας διαστάσεων D, L , που θα πρέπει η μετέπειτα ανάλυση να εξετάσει.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΗΧΑΝΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (FEA)

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η προκαταρκτική σχεδίαση της μηχανής χρησιμεύει στον εντοπισμό της τάξης μεγέθους των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της μηχανής, αλλά δε δύναται να αποτυπώσει με ακρίβεια τα συνολικά χαρακτηριστικά της μηχανής και τη συμπεριφορά της στις διάφορες λειτουργικές καταστάσεις. Για να επιτευχθεί λεπτομερής ανάλυση και να εξαχθούν όλες οι παράμετροι οι οποίες επηρεάζουν τη λειτουργία της μηχανής, κρίνεται απαραίτητη η χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

4.2 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Ενώ οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν το μαγνητικό πρόβλημα που μελετάται φαίνονται σχετικά μικρές, είναι πολύ δύσκολο να βρεθούν αναλυτικές λύσεις σε σύνθετες γεωμετρίες. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (ΜΠΣ). Η ΜΠΣ διασπά το πρόβλημα σε στοιχειώδη υπο-προβλήματα, τα οποία μπορεί να είναι πολλά περισσότερα σε αριθμό, αλλά η επίλυσή τους είναι σημαντικά ευκολότερη. Τα υπο-προβλήματα επιλύονται και στη συνέχεια συντίθενται με σκοπό την εύρεση της συνολικής λύσης του προβλήματος.

Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας, το πρόβλημα είναι μαγνητικής φύσεως και άρα χρησιμοποιείται αντίστοιχο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων (FEMM). Το FEMM δημιουργεί ένα πλέγμα στο χώρο του προβλήματος, χωρίζοντάς τον σε στοιχειώδεις τριγωνικές περιοχές στις οποίες γίνεται η επίλυση των ηλεκτρομαγνητικών διαφορικών εξισώσεων. Με τη μέθοδο της διακριτοποίησης αυτής, το αρχικό σύστημα διαφορικών εξισώσεων μετατρέπεται σε ένα πρόβλημα γραμμικής άλγεβρας με δεκάδες χιλιάδες αγνώστους, ανάλογα και με την επιθυμητή ακρίβεια. Τέτοια συστήματα είναι αρκετά εύκολο να λυθούν, καθώς υπάρχουν αποδοτικοί αλγόριθμοι που χρειάζονται πολύ λίγο χρόνο.

Σε κάθε στοιχείο του πλέγματος η λύση προσεγγίζεται μέσω γραμμικής παρεμβολής των τιμών του πεδίου στις τρείς πλευρές του εκάστοτε τριγώνου. Το πρόβλημα γραμμικής άλγεβρας δημιουργείται εφαρμόζοντας ένα κατώτατο όριο σφάλματος ανάμεσα σε αυτό και την διαφορική εξίσωση που προσεγγίζει.

4.2.1 Μαγνητοστατικά Προβλήματα

Μαγνητοστατικά ονομάζονται τα προβλήματα στα οποία τα πεδία είναι χρονικά αμετάβλητα. Σε αυτήν την περίπτωση, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου $\boldsymbol{H}$ και η πυκνότητα της μαγνητικής ροής $\boldsymbol{B}$ θα πρέπει να ικανοποιούν τις παρακάτω εξισώσεις Maxwell:

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J} \tag{4.1}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0 \tag{4.2}$$

Όπου τα δύο μεγέθη $\boldsymbol{H}$ και $\boldsymbol{B}$ συνδέονται με την καταστατική εξίσωση:

$$\boldsymbol{B} = \mu \cdot \boldsymbol{H} \tag{4.3}$$

όπου μ η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού.

Η παραπάνω εξίσωση ισχύει για γραμμικά υλικά. Στην περίπτωση που ένα υλικό είναι μη γραμμικό, η μαγνητική του διαπερατότητα ορίζεται ως εξής:

$$\mu = \frac{B}{H(B)} \tag{4.4}$$

Στην περίπτωση των μόνιμων μαγνητών η εξίσωση (4.3) λαμβάνει την εξής μορφή:

$$\boldsymbol{B} = \mu_0 \cdot \boldsymbol{H} + \boldsymbol{M} \tag{4.5}$$

όπου μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού και $\boldsymbol{M}$ η μαγνήτιση του υλικού.

Για την εύρεση του μαγνητικού πεδίου στο χώρο το οποίο ικανοποιεί τις εξισώσεις (4.1) – (4.3) το FEMM χρησιμοποιεί το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό $\boldsymbol{A}$ σε κάθε σημείο του χώρου. Η πυκνότητα της μαγνητικής ροής τότε εκφράζεται ως εξής:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \boldsymbol{A} \tag{4.6}$$

Ορίζοντας το $\mathbf{B}$ κατά αυτόν τον τρόπο, η εξίσωση (4.2) ικανοποιείται συνεχώς.

Η εξίσωση (4.1) γράφεται:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(B)} \cdot \nabla \times \boldsymbol{A} \right) = \boldsymbol{J} \tag{4.7}$$

Για ένα γραμμικό ισοτροπικό μέσο, με την παραδοχή πως ισχύει η συνθήκη του Coulomb $\nabla \cdot \boldsymbol{A} = 0$ η εξίσωση (4.7) μετατρέπεται σε:

$$-\frac{1}{\mu} \cdot \nabla^2 \cdot \boldsymbol{A} = \boldsymbol{J} \tag{4.8}$$

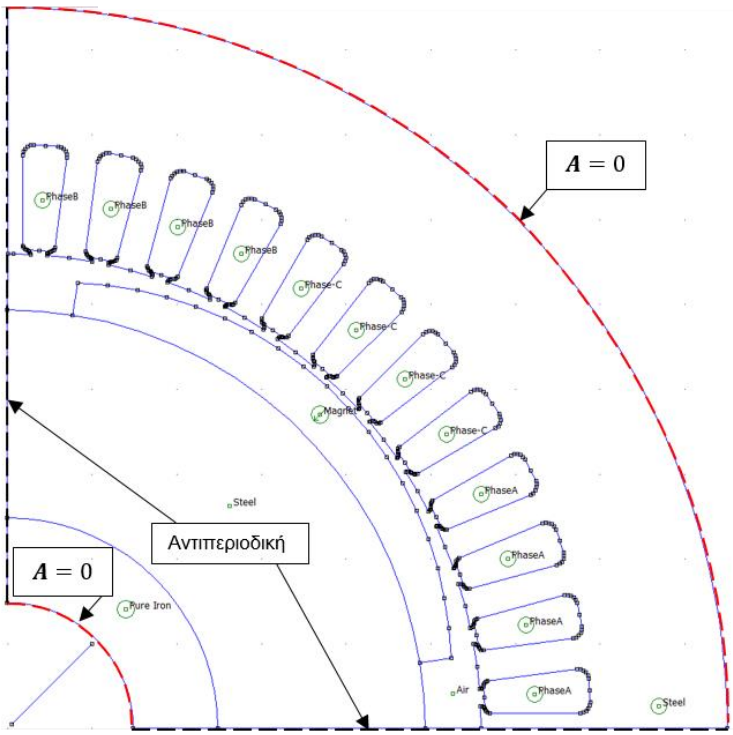
Το FEMM διατηρεί τη μορφή της εξίσωσης (4.7) επιτρέποντας την επίλυση μαγνητοστατικών προβλημάτων με μη γραμμική σχέση μεταξύ $\boldsymbol{H}$ και $\boldsymbol{B}$.

Το πλεονέκτημα της χρήσης του διανυσματικού δυναμικού $\boldsymbol{A}$ για την επίλυση του προβλήματος είναι πως όλες οι συνθήκες που πρέπει να πληροί το πρόβλημα συνοψίζονται σε μία μόνο εξίσωση. Έτσι, αν βρεθεί το $\boldsymbol{A}$ τότε είναι εύκολο να βρεθούν και τα $\boldsymbol{H}$ και $\boldsymbol{B}$, με παραγώγιση.

4.2.2 Οριακές Συνθήκες

Για την επίλυση του προβλήματος και την ύπαρξη μοναδικής λύσης είναι απαραίτητο να έχουν ορισθεί οι κατάλληλες οριακές συνθήκες. Για τα μαγνητοστατικά προβλήματα οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

- Συνθήκες Dirichlet: Σε αυτόν τον τύπο οριακής συνθήκης επιβάλλεται το μέτρο του δυναμικού $\boldsymbol{A}$ σε ένα σύνορο. Συνήθως στα προβλήματα που αφορούν πεδίο στο εσωτερικό ηλεκτρικών μηχανών εφαρμόζεται η ομογενής συνθήκη Dirichlet $A = 0$ στην εξωτερική επιφάνεια του στάτη και στην εσωτερική επιφάνεια του δρομέα, εκεί που ενώνεται με τον άξονα της μηχανής. Αυτή η συνθήκη επιβάλλει στο πεδίο να παραμένει εντός του μαγνητικού κυκλώματος της μηχανής, εμποδίζοντας τη μαγνητική ροή να περάσει στον άξονα ή στο περιβάλλον γύρω από το στάτη.
- Συνθήκες Neumann: Σε αυτόν τον τύπο οριακής συνθήκης επιβάλλεται το μέτρο της κάθετης παραγώγου του δυναμικού $\boldsymbol{A}$ σε ένα σύνορο. Στα μαγνητικά προβλήματα, η ομογενής συνθήκη Neumann $\frac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial n} = 0$ εφαρμόζεται στην επιφάνεια επαφής με ένα εξαιρετικά διαπερατό μέταλλο, εξαναγκάζοντας τη ροή να διασχίσει την επιφάνεια υπό γωνία 90°.
- Συνθήκες Robin: Πρόκειται για μία μίξη συνθηκών τύπου Dirichlet και Neumann, διατυπώνοντας μία σχέση μεταξύ του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού $\boldsymbol{A}$ και της κάθετης παραγώγου του σε ένα σύνορο.
- Περιοδική συνθήκη: Μία περιοδική οριακή συνθήκη συνδέει δύο όρια μεταξύ τους. Στα αντίστοιχα σημεία των δύο ορίων, οι τιμές του πεδίου είναι ίσες. Αυτή η συνοριακή συνθήκη χρησιμοποιείται στα άκρα του προβλήματος, όταν επιλύεται ένα ζεύγος πόλων της μηχανής.



Σχήμα 4.1 – Αποτύπωση Οριακών Συνθηκών στη Μηχανή

- Αντιπεριοδική συνθήκη: Μία αντιπεριοδική οριακή συνθήκη συνδέει επίσης δύο όρια μεταξύ τους. Στα αντίστοιχα σημεία των δύο ορίων, οι τιμές του πεδίου είναι αντίθετες (ίδιο μέτρο, αντίθετο πρόσημο). Αυτή η συνοριακή συνθήκη χρησιμοποιείται στα άκρα του προβλήματος, όταν επιλύεται ένας πόλος της μηχανής.

Στο σχήμα 4.1 φαίνεται η χρήση των οριακών συνθηκών κατά την ανάλυσή του προβλήματος. Καθώς αναλύεται κάθε φορά ένας πόλος της μηχανής, οι πλευρικές του συνθήκες ορίζονται αντιπεριοδικές, ενώ οι οριακές συνθήκες στην εξωτερική επιφάνεια του στάτη και στην εξωτερική επιφάνεια του άξονα είναι Ομογενείς Dirichlet.

4.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ

4.3.1 Εισαγωγή

Για την δυνατότητα προσομοίωσης διαφορετικών μηχανών είναι αναγκαία η παραμετροποίηση των χαρακτηριστικών της έτσι ώστε να μπορεί εύκολα, με τροποποίηση κάποιων παραμέτρων να παραχθεί οποιαδήποτε γεωμετρία μηχανής επιθυμούμε.

Σε αυτήν την κατεύθυνση, η διαδικασία εύρεσης των χαρακτηριστικών κάθε μηχανής χωρίζεται σε δύο στάδια:

- Πρώτα καθορίζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής της μηχανής, δηλαδή του στάτη και του δρομέα αυτής.
- Στη συνέχεια, καθορίζεται το ενεργό μήκος του μαγνητικού κυκλώματος της μηχανής και ο αριθμός των ενεργών ελιγμάτων στα αυλάκια του στάτη.

Ο παραπάνω διαχωρισμός της σχεδίασης γίνεται για τους εξής λόγους:

- Τα αποτελέσματα από την επίλυση του πεδίου για μία μονάδα μήκους του μαγνητικού κυκλώματος, μπορούν να αναχθούν σε οποιοδήποτε επιθυμητό ενεργό μήκος. Αυτό γίνεται καθώς το μαγνητικό πεδίο δεν αλλάζει μορφή κατά μήκος της μηχανής και τα μεγέθη που προκύπτουν από τη μετεπεξεργασία του πεδίου (όπως η ροπή) είναι ανάλογα του ενεργού μήκους της μηχανής.
- Το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων κατά τη διάρκεια της επίλυσης του μαγνητοστατικού προβλήματος δε λαμβάνει υπόψη τα ελίγματα στις αύλακες του στάτη, παρά μόνο την πυκνότητα του ρεύματος σε αυτές. Οπότε διατηρώντας σταθερή την πυκνότητα ρεύματος και μεταβάλλοντας τον αριθμό των αγωγών ανά αύλακα λαμβάνουμε διαφορετικές διαμορφώσεις μηχανών.

Η παραμετροποιημένη σχεδίαση επιτυγχάνεται με την ανάπτυξη λογισμικού σε περιβάλλον Matlab, το οποίο αλληλεπιδρά με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων για τη σχεδίαση της μηχανής.

4.3.2 Σχεδίαση Διατομής Μηχανής

4.3.2.1 Ανεξάρτητες Μεταβλητές Σχεδίασης

Για την επίτευξη της παραμετροποιημένης σχεδίασης της μηχανής καθορίζονται αρχικά οι ανεξάρτητες μεταβλητές (που δίνονται ως είσοδοι στο πρόγραμμα) και στη συνέχεια οι αναγκαίες για τη σχεδίαση εξαρτημένες μεταβλητές του στάτη και του δρομέα. Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται στο σύνολό τους οι ανεξάρτητες μεταβλητές σχεδίασης της μηχανής.

Ανεξάρτητες Μεταβλητές Γενικής Σχεδίασης Μηχανής	
Συμβολικό Όνομα	Φυσική Σημασία
m	Αριθμός φάσεων
P	Αριθμός πόλων
ag	Πάχος Διακένου
Ανεξάρτητες Μεταβλητές Σχεδίασης Στάτη	
Συμβολικό Όνομα	Φυσική Σημασία
R_{so}	Εξωτερική ακτίνα στάτη
q	Αριθμός αυλάκων ανά πόλο και φάση
$Tooth2SlotPercentage$	Ποσοστό επίκεντρης γωνίας δοντιού ως προς το άθροισμα των επίκεντρων γωνιών ενός δοντιού και μίας αύλακος
$ToothTips$	Ποσοστό της επίκεντρης γωνίας μίας αύλακας που καλύπτεται από το πέλμα των δύο γειτονικών σε αυτή δοντιών
$Yoke2Tooth$	Λόγος μεταξύ του σώματος του στάτη προς το πάχος ενός δοντιού
r_{edge}	Ακτίνα κύκλου για την εξομάλυνση των γωνιών στις αύλακες
Ανεξάρτητες Μεταβλητές Σχεδίασης Δρομέα	
Συμβολικό Όνομα	Φυσική Σημασία
$SplitRatio$	Λόγος εξωτερικής ακτίνας δρομέα προς εξωτερική ακτίνα στάτη
$InnerRatio$	Λόγος εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα δρομέα
$MagnetDC$	Ποσοστό επίκεντρης γωνίας μαγνήτη πρός τη γωνία ενός πόλου της μηχανής
$MagnetHeight$	Μέγιστο Ύψος επιφανειακού μαγνήτη
H_{endcap}	Ελάχιστο Ύψος επιφανειακού μαγνήτη
Ανεξάρτητες Μεταβλητές Σχεδίασης Τυλίγματος	
Συμβολικό Όνομα	Φυσική Σημασία
$Layers$	Αριθμός στρώσεων τυλίγματος
$Overlap$	Αριθμός επικαλυπτόμενων αυλάκων μεταξύ δύο στρώσεων

Πίνακας 4.2 – Ανεξάρτητες Μεταβλητές Σχεδίασης Διατομής Μηχανής

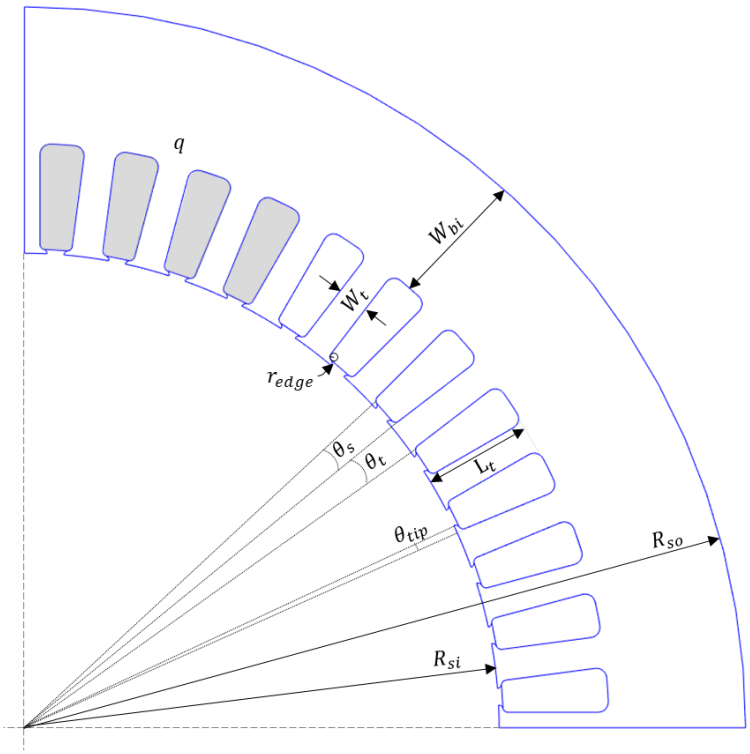
4.3.2.2 Σχεδίαση Στάτη

Οι βασικές εξαρτημένες μεταβλητές σχεδίασης του στάτη επεξηγούνται στον πίνακα 4.3. Οι μεταβλητές αυτές αφορούν τα κυριότερα σημεία στην παραμετρική σχεδίαση του στάτη.

Εξαρτημένες Μεταβλητές Σχεδίασης Στάτη	
Συμβολικό Όνομα	Φυσική Σημασία
R_{si}	Εσωτερική Ακτίνα Στάτη
W_t	Πάχος δοντιού
L_t	Μήκος δοντιού
W_{bi}	Πάχος σώματος
θ_s	Γωνία αύλακος
θ_t	Γωνία δοντιού
θ_{tip}	Γωνία πέλματος

Πίνακας 4.3 – Βασικές Εξαρτημένες Μεταβλητές Σχεδίασης Στάτη

Στο σχήμα 4.4 παρουσιάζονται οι μεταβλητές πάνω στο στάτη της μηχανής.



Σχήμα 4.4 – Απεικόνιση μεταβλητών σχεδίασης στάτη

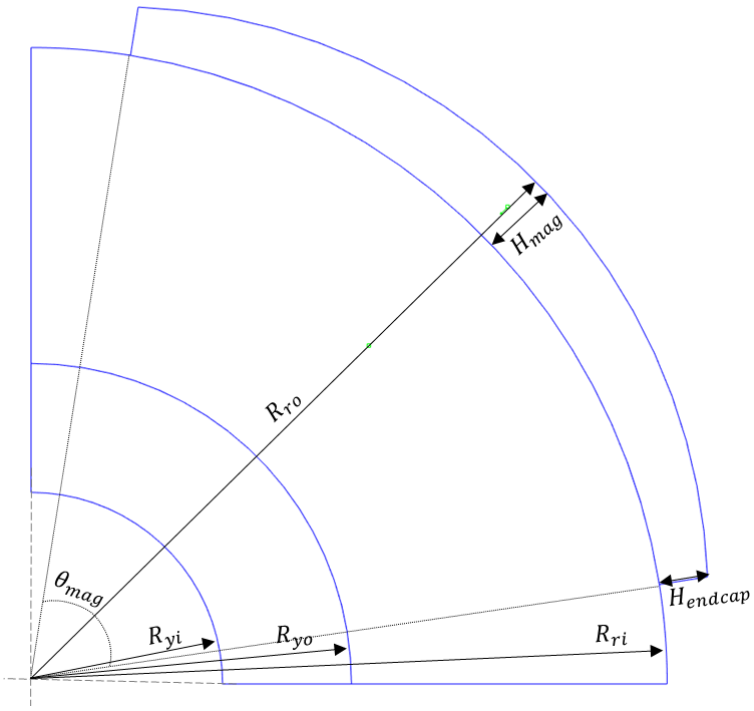
4.3.2.3 Σχεδίαση Δρομέα

Οι βασικές εξαρτημένες μεταβλητές σχεδίασης του δρομέα επεξηγούνται στον πίνακα 4.5. Οι μεταβλητές αυτές αφορούν τα κυριότερα σημεία στην παραμετρική σχεδίαση του δρομέα.

Εξαρτημένες Μεταβλητές Σχεδίασης Δρομέα	
Συμβολικό Όνομα	Φυσική Σημασία
R_{ri}	Εσωτερική Ακτίνα Δρομέα
R_{yo}	Εξωτερική Ακτίνα Σώματος Δρομέα
R_{yi}	Εσωτερική Ακτίνα Σώματος Δρομέα
θ_{mag}	Γωνία Επιφανειακού Μαγνήτη

Πίνακας 4.5 – Βασικές Εξαρτημένες Μεταβλητές Σχεδίασης Δρομέα

Στο σχήμα 4.6 παρουσιάζονται οι μεταβλητές πάνω στο δρομέα της μηχανής.



Σχήμα 4.6 – Απεικόνιση μεταβλητών σχεδίασης δρομέα

4.3.3 Επιλογή Υλικών Κατασκευής Μηχανής

4.3.3.1 Επιλογή Σιδήρου

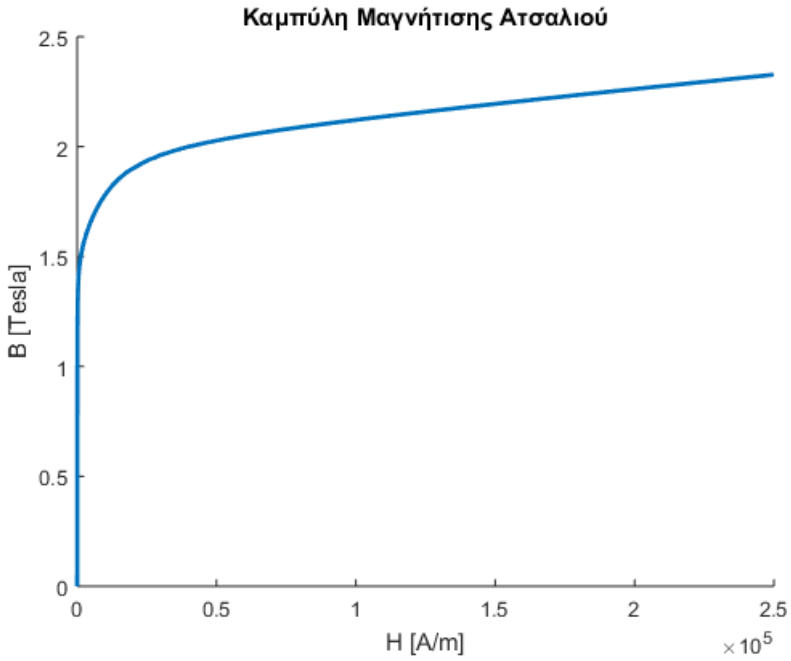
Για την προσομοίωση του πυρήνα τόσο του στάτη όσο και του δρομέα επιλέγεται ατσάλινη λαμαρίνα πάχους 0,25mm η οποία έχει καμπύλη μαγνήτισης την καμπύλη του σχήματος 4.7.

4.3.3.2 Επιλογή Μαγνήτη

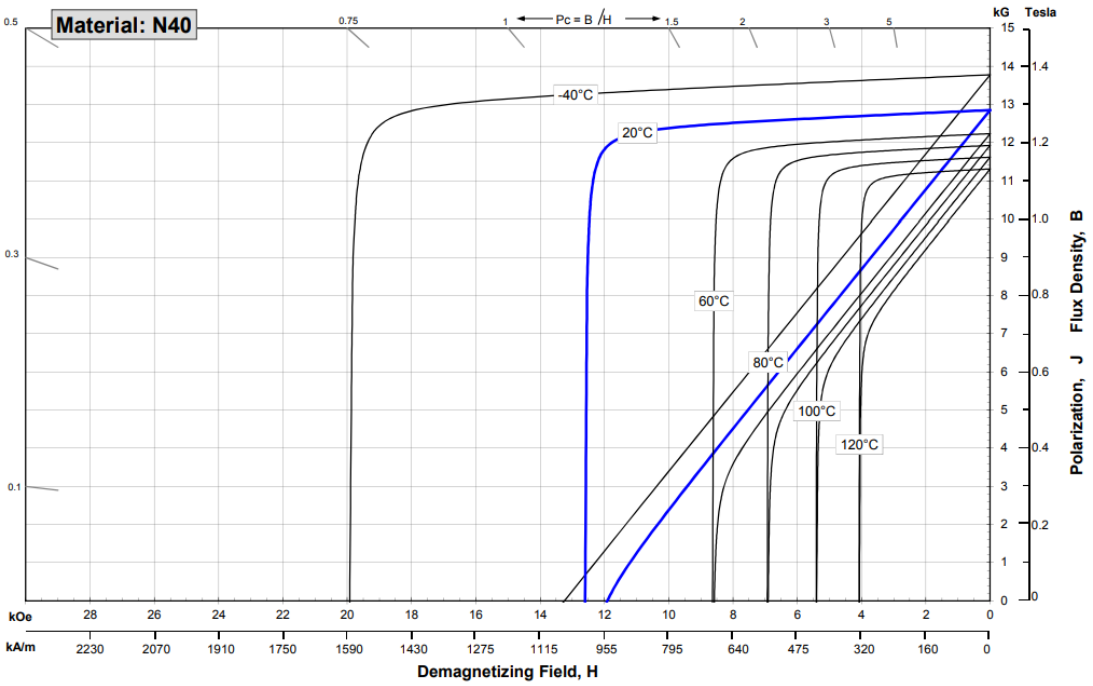
Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέγονται μαγνήτες Νεοδυμίου – Σιδήρου – Βορίου (NdFeB) τύπου N40. Οι γνωστοί ως «μαγνήτες Νεοδυμίου» είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι μαγνήτες σπάνιων γαιών, καθώς διαθέτουν τη μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας από τους εμπορικά διαθέσιμους μαγνήτες. Δεν επιδεικνύουν σημαντική αντοχή στην αύξηση της θερμοκρασίας, αλλά στην παρούσα εφαρμογή

που ο στόχος είναι η λειτουργία της μηχανής σε υψηλό βαθμό απόδοσης, δεν προβλέπεται να αυξηθεί σημαντικά η θερμοκρασία.

Στο σχήμα 4.8 παρουσιάζονται οι καμπύλες απομαγνήτισης των μαγνητών N40 για διαφορετικές τιμές θερμοκρασιών.



Σχήμα 4.7 – Καμπύλη Μαγνήτισης Ατσαλιού Σώματος Στάτη και Δρομέα



Σχήμα 4.8 – Καμπύλες Απομαγνήτισης μαγνητών NdFeB N40 (Arnold Magnetic Technologies)

4.3.4 Τελική Σχεδίαση Μηχανής

Αφού η διατομή της μηχανής έχει καθοριστεί πλήρως, ορίζουμε το ενεργό μήκος της μηχανής και τον αριθμό των ενεργών ελιγμάτων.

Το ενεργό μήκος της μηχανής είναι μέγεθος απαραίτητο, αφού από αυτό εξαρτάται η ροπή και κατ' επέκταση η ισχύς της μηχανής.

Ο αριθμός των ενεργών ελιγμάτων στις αύλακες του στάτη καθορίζει κυρίως το ρεύμα και την τάση στους ακροδέκτες της κάθε φάσης του τυλίγματος.

4.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

4.4.1 Επιλογή Κλάσματος Γεωμετρίας Μηχανής

Για την επίλυση του πεδίου στο εσωτερικό της μηχανής υπάρχουν τρείς επιλογές:

- Εισάγεται ολόκληρη η γεωμετρία της μηχανής στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων και λύνεται το μαγνητοστατικό πρόβλημα.
- Εισάγεται η γεωμετρία της μηχανής που αντιστοιχεί σε ένα ζεύγος πόλων του δρομέα και ορίζονται περιοδικές πλευρικές οριακές συνθήκες έτσι ώστε το αποτέλεσμα να παραμείνει το ίδιο, όπως στην επίλυση ολόκληρης της γεωμετρίας.
- Εισάγεται η γεωμετρία της μηχανής που αντιστοιχεί σε έναν πόλο του δρομέα και ορίζονται αντιπεριοδικές πλευρικές οριακές συνθήκες έτσι ώστε το αποτέλεσμα να παραμείνει το ίδιο, όπως στην επίλυση ολόκληρης της γεωμετρίας.

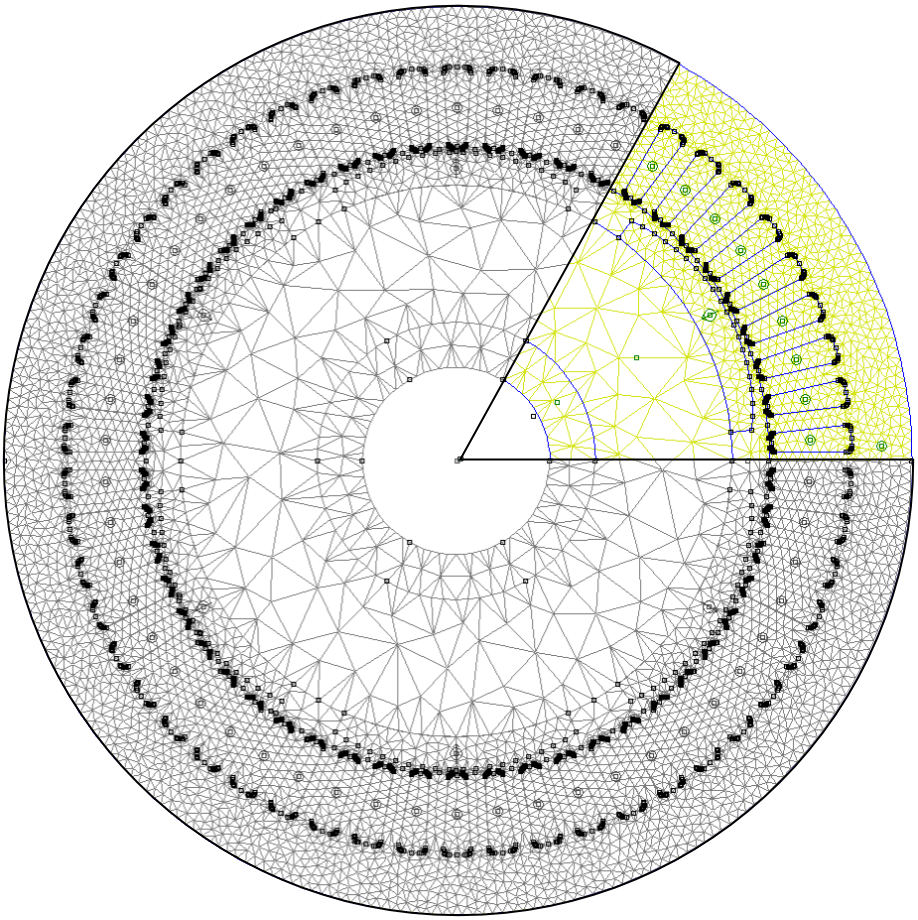
Στη συγκεκριμένη εργασία έχει προτιμηθεί η τρίτη επιλογή. Απομονώνεται το κλάσμα εκείνο της μηχανής που αντιστοιχεί σε έναν πόλο του δρομέα και τίθενται οι κατάλληλες οριακές συνθήκες. Αυτή η μεθοδολογία εξοικονομεί ένα σημαντικά μεγάλο μέρος του υπολογιστικού χρόνου που θα χρειαζόταν η ανάλυση ολόκληρης της μηχανής. Στο σχήμα 4.10 απεικονίζεται το μέρος εκείνο που αναλύεται από μία εξαπολική σύγχρονη μηχανή μονίμων μαγνητών. Με κίτρινο χρώμα απεικονίζεται το πλέγμα που επιλύεται, ενώ με γκρι το πλέγμα που θα έπρεπε να επιλυθεί αν δεν είχαμε απομονώσει έναν πόλο της μηχανής.

Ενδεικτικά, στον πίνακα 4.9 αναφέρονται οι χρόνοι που απαιτούνται για την επίλυση του προβλήματος αν αναλυθεί ολόκληρη η μηχανή ή ένα κλάσμα αυτής.

	Επίλυση Ολόκληρης Γεωμετρίας	Επίλυση Γεωμετρικού Κλάσματος ενός Πόλου	Διαφορά
Κόμβοι Πλέγματος	16536	2797	- 83,09%
Απαιτούμενος Χρόνος	24,96 s	4,06 s	- 83,73%

Πίνακας 4.9 – Σύγκριση Χρόνου Επίλυσης Ολόκληρης γεωμετρίας με Κλάσμα γεωμετρίας ενός πόλου

Παρατηρείται μείωση τόσο του αριθμού των κόμβων του πλέγματος, όσο και του χρόνου επίλυσης κατά περίπου -83%, δηλαδή αφαιρώντας τα $5/6$ (83,33%) της γεωμετρίας, ο χρόνος επίλυσης μειώνεται ανάλογα. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται για κάθε αριθμό πόλων.



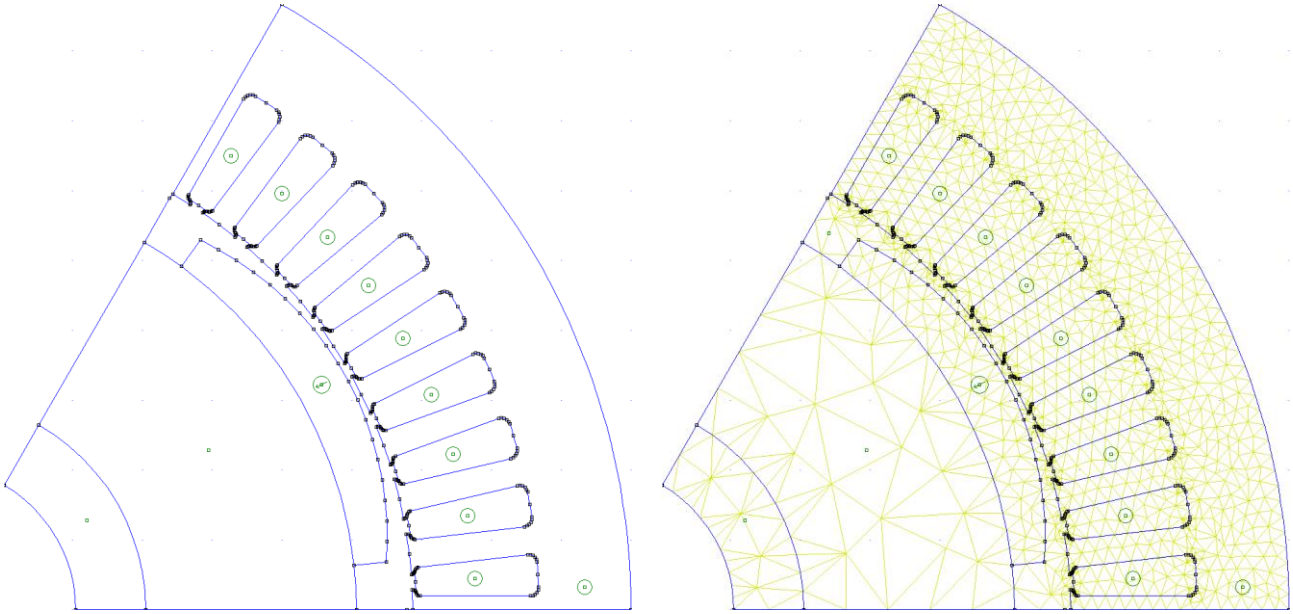
Σχήμα 4.10 – Αναπαράσταση του μέρους της μηχανής που αναλύεται, ως κλάσμα της συνολικής γεωμετρίας της μηχανής

4.4.2 Επίλυση Μαγνητοστατικού Προβλήματος για μία Λαμαρίνα σε μία Λειτουργική Κατάσταση

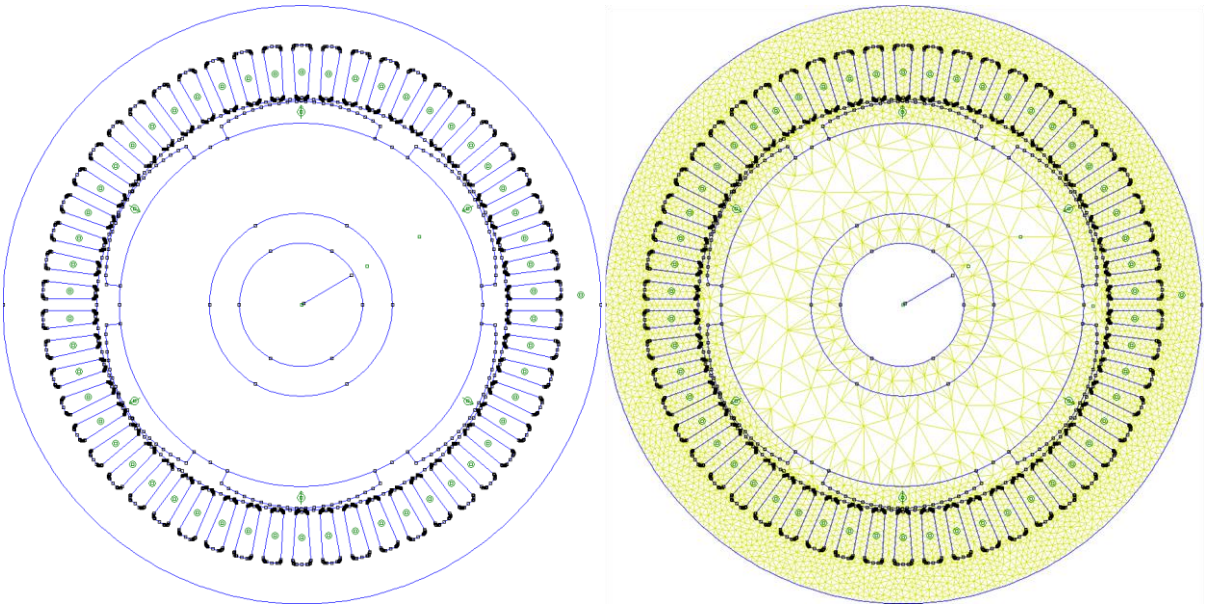
Η γεωμετρία της διατομής της μηχανής (στάτης και δρομέας) εισάγεται στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων. Ορίζονται τα υλικά σε όλες τις περιοχές της μηχανής και δημιουργείται το τριγωνικό πλέγμα.

Στο σχήμα 4.10 παρουσιάζονται μία γεωμετρία μηχανής εισηγμένη στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Femm και η δημιουργία του τριγωνικού πλέγματος για την επίλυση του μαγνητοστατικού προβλήματος.

Στο σχήμα 4.11 παρουσιάζονται κατά αντιστοιχία ολόκληρη η γεωμετρία της μηχανής πριν και μετά τη δημιουργία πλέγματος.



Σχήμα 4.10 – Αριστερά: Αναπαράσταση κλάσματος μηχανής στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Femm
Δεξιά: Τριγωνικό πλέγμα της ίδιας μηχανής με 8872 κόμβους

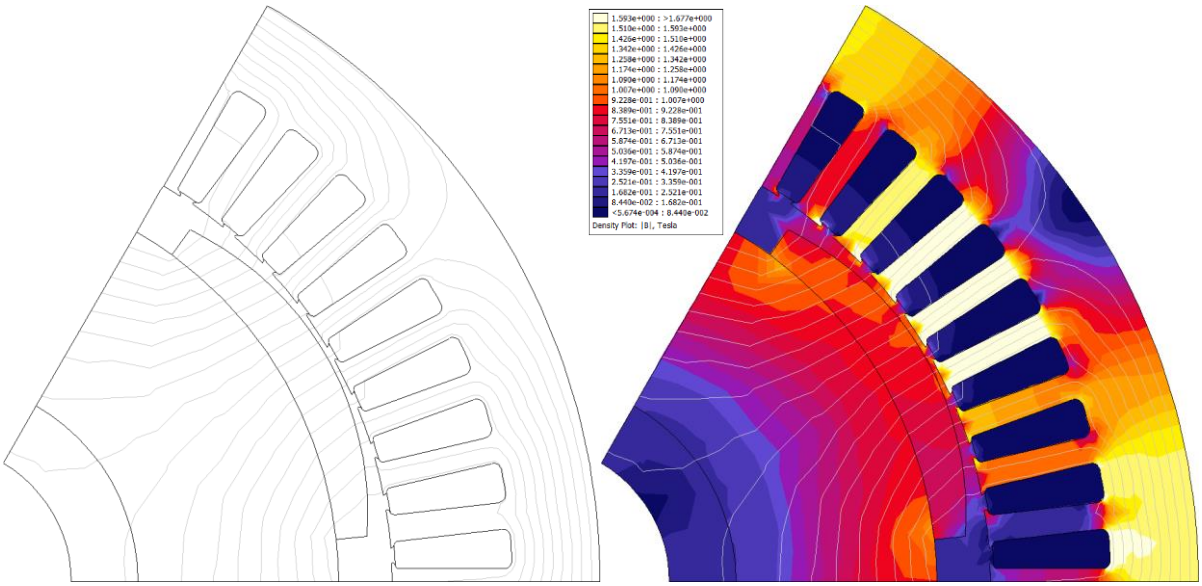


Σχήμα 4.11 – Αριστερά: Αναπαράσταση μηχανής στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Femm
Δεξιά: Τριγωνικό πλέγμα της ίδιας μηχανής με 8872 κόμβους

Στη συνέχεια, αφού ορισθούν πλήρως τα υλικά σε όλες τις περιοχές και οι οριακές συνθήκες στα σύνορα τα οποία χρειάζεται, λύνεται το μαγνητικό πρόβλημα.

Σε αυτό το επίπεδο, ορίζεται ως λειτουργική κατάσταση της μηχανής το ζεύγος (Πυκνότητα Ρεύματος στις αύλακες της φάσης Α, Εσωτερική Ηλεκτρική Γωνία ρεύματος της φάσης Α – Γωνία ροπής), συμβολικά: (J, δ). Ανάλογα με τη λειτουργική κατάσταση στην οποία επιθυμείται να ευρεθεί το πεδίο στη μηχανή, τροποποιούνται κατάλληλα τα υλικά που αντιστοιχούν στα ρεύματα των φάσεων.

Η λύση η οποία προκύπτει είναι η πλήρης πληροφορία για το μαγνητικό πεδίο σε κάθε σημείο του χώρου και επαρκεί για την υπόλοιπη ανάλυση της μηχανής.



Σχήμα 4.12 – Αριστερά: Μαγνητικό πεδίο εντός της μηχανής με ευδιάκριτες τις δυναμικές γραμμές του πεδίου
Δεξιά: Μαγνητικό πεδίο εντός της μηχανής με χρωματική απεικόνιση της έντασης του πεδίου

Στο σχήμα 4.12 απεικονίζεται το αποτέλεσμα από την ανάλυση της μηχανής του σχήματος 4.10 για μία λειτουργική κατάσταση.

4.4.3 Ορισμός Ενεργού Μήκους Μαγνητικού Κυκλώματος Μηχανής και Αριθμού Ενεργών Τυλιγμάτων Στάτη

Αφού το πρόβλημα επιλυθεί για τη διατομή στοιχειώδους μήκους, η λύση μπορεί να επεκταθεί για οποιοδήποτε ενεργό μήκος και αριθμό ενεργών τυλιγμάτων είναι επιθυμητό.

Η επέκταση αυτή γίνεται καθώς το πεδίο δεν αλλάζει μορφή κατά μήκος της μηχανής, και η ροπή, οι απώλειες και τα υπόλοιπα προς μελέτη χαρακτηριστικά της μηχανής εξαρτώνται γραμμικά από το ενεργό μήκος της μηχανής. Ακόμη, με την αλλαγή των ενεργών τυλιγμάτων στις αύλακες του στάτη της μηχανής, δεν επηρεάζεται το πεδίο του στάτη, αφού το μόνο που αλλάζει είναι το φασικό ρεύμα και τάση, και όχι η πυκνότητα ρεύματος στις αύλακες του στάτη.

4.4.4 Υπολογισμός Απωλειών Μηχανής

4.4.4.1 Υπολογισμός Απωλειών Σιδήρου

Για τον υπολογισμό των απωλειών σιδήρου στη μηχανή, λαμβάνεται υπ' όψιν ότι υπάρχουν δύο είδη απωλειών οι οποίες εμφανίζονται όταν ένα μαγνητικό υλικό διεγείρεται από ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο και συνθέτουν τις συνολικές απώλειες πυρήνα.

Οι απώλειες αυτές είναι οι απώλειες υστέρησης και οι απώλειες δινορρευμάτων. Τόσο οι απώλειες υστέρησης, όσο και οι απώλειες δινορρευμάτων αποτελούν απώλειες

Joule, οι οποίες πηγάζουν από τα δινορρεύματα που οφείλονται στην εναλλαγή της μαγνήτισης εντός των περιοχών του υλικού. Κάθε κομμάτι σιδηρομαγνητικού υλικού χωρίζεται σε τμήματα που ονομάζονται μαγνητικές περιοχές (αγγ: magnetic domains) στις οποίες τα μαγνητικά δίπολα είναι ομοιόμορφα πολωμένα κατά την ίδια κατεύθυνση. Οι περιοχές διαχωρίζονται από λεπτά τοιχώματα περιοχής (αγγ: domain walls).

Απώλειες Υστέρησης

Όταν εφαρμόζεται εξωτερικό πεδίο, τα τοιχώματα περιοχής κινούνται στην κατεύθυνση του πεδίου. Στη σιδηρομαγνητική λαμαρίνα όμως υπάρχουν μη-μαγνητικές δομικές ατέλειες, όπως άνθρακας και θείο. Αυτές οι δομικές ατέλειες λειτουργούν σαν εμπόδια κατά τη μετακίνηση των τοιχωμάτων περιοχής. Σε αυτήν την περίπτωση τα τοιχώματα περιοχής ξεπερνούν αυτά τα εμπόδια με αύξηση του πεδίου. Μετά από κάποια τιμή έντασης του πεδίου, τα τοιχώματα απότομα ξεπερνούν («πηδούν») τα εμπόδια. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται φαινόμενο Barkhausen.

Οι απώλειες υστέρησης πηγάζουν από το φαινόμενο Barkhausen και ουσιαστικά αντικατοπτρίζουν την επιπλέον ενέργεια που απαιτείται για την κίνηση των τοιχωμάτων περιοχής παρουσία μη μαγνητικών προσμίξεων.

Για την προσέγγιση των απωλειών υστέρησης, χρησιμοποιείται το ακόλουθο στατιστικό μοντέλο (τροποποιημένη εξίσωση Steinmetz) το οποίο δίνει την πυκνότητα απωλειών υστέρησης (απώλειες ανά μονάδα όγκου):

$$P_h = k_h \cdot \omega_s \cdot \hat{B}^{\beta} \tag{4.9}$$

όπου: k_h μία σταθερά που εξαρτάται από το υλικό και τη γεωμετρία του,
$\omega_s = 2\pi f$ η γωνιακή συχνότητα του πεδίου,
$\hat{B}$ η μέγιστη τιμή της πυκνότητας της μαγνητικής ροής και
β μία εκθετική σταθερά.

Η τιμή της σταθεράς k_h κυμαίνεται από 40 έως 55, ενώ της σταθεράς β από 1,8 έως 2,2.

Απώλειες Δινορρευμάτων

Οι απώλειες δινορρευμάτων οφείλονται στην ομοιόμορφη αλλαγή της μαγνήτισης σε ολόκληρο το υλικό και τα δινορρεύματα που παράγονται ως αποτέλεσμα της αλλαγής αυτής. Σε αντίθεση με τις απώλειες υστέρησης είναι εμφανές ότι οι απώλειες δινορρευμάτων εξαρτώνται από το μέγεθος και το σχήμα του σιδηρομαγνητικού υλικού.

Για την προσέγγιση των απωλειών δινορρευμάτων, χρησιμοποιείται το ακόλουθο στατιστικό μοντέλο (τροποποιημένη εξίσωση Steinmetz) το οποίο δίνει τις απώλειες δινορρευμάτων ανά μονάδα όγκου του υλικού:

$$P_{ec} = \frac{d^2}{6 \cdot \pi \cdot \rho} \cdot \omega_s^2 \cdot \hat{B}^2 \tag{4.10}$$

όπου: d το πάχος του υλικού κάθετα στην κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου και
ρ η ηλεκτρική ειδική αντίσταση του υλικού.

Οι συνολικές απώλειες σιδήρου – πυρήνα προκύπτουν ώς το άθροισμα των δύο προαναφερθεισών συνιστωσών, δηλαδή:

$$P_{Fe} = P_{ec} + P_h \tag{4.11}$$

4.4.4.2 Υπολογισμός Απωλειών Χαλκού

Για τον υπολογισμό των απωλειών χαλκού της μηχανής, και λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι οι απώλειες χαλκού σε μία σύγχρονη μηχανή μονίμων μαγνητών συνιστούν ωμικές απώλειες στα τυλίγματα του στάτη, χρησιμοποιείται το ακόλουθο μοντέλο:

$$P_{Cu} = 3 \cdot I^2 \cdot R_{Cu} \tag{4.12}$$

όπου: I το ρεύμα σε μία φάση και
R η ωμική αντίσταση των τυλιγμάτων κάθε φάσης.

Το ρεύμα σε κάθε φάση υπολογίζεται μέσω του εξής τύπου:

$$I = \frac{J \cdot ff \cdot A_{slot}}{N_s} \tag{4.13}$$

όπου: J η πυκνότητα ρεύματος στις αύλακες μίας φάσης,
ff ο συντελεστής πληρότητας της αύλακας με χαλκό,
A_{slot} η επιφάνεια της κάθς αύλακας και
N_s ο αριθμός των ελιγμάτων ανά αύλακα.

Η αντίσταση του τυλίγματος προσδιορίζεται με βάση τον εξής τύπο:

$$R_{Cu,1ph} = \frac{N_s \cdot Q \cdot l_{cu}}{3} \cdot \frac{1}{\sigma_{Cu}} \cdot \frac{1}{S_{Cu}} \tag{4.14}$$

όπου: Q ο συνολικός αριθμός αυλάκων στο στάτη,
σ_{Cu} η ηλεκτρική αγωγιμότητα του χαλκού και
S_{Cu} η διατομή του κάθε ελίγματος χαλκού.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του χαλκού εξαρτάται από τη θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται ανά πάσα στιγμή. Για τον υπολογισμό των απωλειών θεωρούμε ότι η θερμοκρασία λειτουργίας του χαλκού είναι $60°\mathrm{C}$. Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $\theta = 20°\mathrm{C}$, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του χαλκού είναι: $\sigma_{Cu,20} = 57 \cdot 10^6\, {}^{S}/_{m}$, και άρα η αντίστασή του είναι $r_{Cu,20} = 1{,}75 \cdot 10^{-8} \Omega^{-1} \cdot m$ Ο συντελεστής μεταβολής της αντίστασης του χαλκού ανάλογα με τη θερμοκρασία είναι $a_{Cu} = 3{,}81 \cdot 10^{-3}\, K^{-1}$.

Οπότε, για λειτουργία στους $60°\mathrm{C}$:

$$r_{Cu,60°C} = r_{Cu,20°C} \cdot \left(1 + a_{Cu} \cdot (T_{60°C} - T_{20°C})\right) \Rightarrow$$
$$\Rightarrow r_{Cu,60°C} = 2{,}0167 \cdot 10^{-8} \Omega^{-1} \cdot m \Rightarrow \sigma_{Cu,60°C} = 49{,}59 \cdot 10^{6}\, {}^{S}/_{m}$$

Για τον υπολογισμό του μήκους του αγωγού, λαμβάνεται υπ' όψιν το ενεργό μήκος της μηχανής, καθώς και η ευθεία γραμμή που ενώνει τις δύο αύλακες στις οποίες βρίσκεται ο ίδιος αγωγός. Η προσέγγιση γίνεται με τον εξής τύπο:

$$l_{cu} = al + 1{,}2 \cdot W \tag{4.15}$$

όπου: al το ενεργό μήκος της μηχανής και
W το μέσο μήκος μεταξύ δύο αυλάκων της ίδιας φάσης που έχουν τον ίδιο αγωγό.

4.4.5 Εξαγωγή Χαρακτηριστικής Καμπύλης Τ – ω

Ένα χαρακτηριστικό αποτέλεσμα που εξάγεται από την παρούσα μελέτη μίας μηχανής, είναι η χαρακτηριστική καμπύλη σημείων λειτουργίας Τ - ω, πάνω στην οποία στηρίζεται και ο σχηματισμός του χάρτη απόδοσης. Η επίλυση της κάθε μηχανής, πραγματοποιείται σε όλες τις λειτουργικές καταστάσεις που καθορίζονται από το ακόλουθο ζεύγος τιμών πυκνότητας ρεύματος J_{slot} και εσωτερικής γωνίας ροπής δ:

$$J_{slot}{}^{(rms)} = [0.001\,, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2, 3, 4, 5] \quad A/mm^2$$
$$\delta = 0{:}\,5{:}\,180 \;\; \eta\lambda\epsilon\kappa\tau\rho\iota\kappa\acute{\epsilon}\varsigma\ \mu o\acute{\iota}\rho\epsilon\varsigma$$

Σημειώνεται πως η μέγιστη τιμή πυκνότητας ρεύματος αύλακος αντιστοιχεί περίπου σε ενεργή πυκνότητα ρεύματος:

$$J_{eff}{}^{(rms)} = \frac{J_{slot}{}^{(rms)}}{ff} \cong 10\,\frac{A}{mm^2} \;\; ,\gamma\iota\alpha\ ff \cong 0.5$$

Η τιμή αυτή ξεπερνάει αρκετά το όριο των $4\,A/mm^2$, αλλά έχει επιλεγεί για λόγους πληρότητας, έτσι ώστε να εξετασθεί η συμπεριφορά της μηχανής σε περίπτωση έντονης υπερφόρτισης.

Επομένως, για κάθε λειτουργική κατάσταση που καθορίζεται από τα παραπάνω διανύσματα, είναι διαθέσιμα όλα τα χαρακτηριστικά της μηχανής, όπως ροπή, κυμάτωση ροπής, απώλειες, απόδοση, μέγιστη τιμή μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο κ.α. Το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία ενός πυκνότερου πλέγματος λειτουργικών καταστάσεων για την οποία θα είναι διαθέσιμα τα αντίστοιχα αποτελέσματα επίδοσης και απόδοσης, χωρίς την ανάγκη υπολογιστικού χρόνου για επίλυση. Αυτό επιτυγχάνεται με την μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής ως προς τις δύο διαστάσεις: πυκνότητας ρεύματος και ηλεκτρικής γωνίας. Σημειώνεται πως επειδή η μηχανή που εξετάζεται είναι επιφανειακών μαγνητών, επιλέχθηκε η γραμμικοποίηση ως προς τη γωνία ροπής να συμβεί μονάχα στο διάστημα $[90^o - 180^o]$, καθώς είναι γνωστό πως η γωνία μεγιστοποίησης της ροπής είναι ελαφρώς μεγαλύτερη απο 90 ηλεκτρικές μοίρες. Έτσι, σχηματίζεται το ακόλουθο πυκνότερο πλέγμα λειτουργικών καταστάσεων μέσω των αρχικών σημείων.

	Ελάχιστη Τιμή	Μέγιστη Τιμή	Αριθμός Σημείων
$J_{slot}{}^{(rms)}$	$0.001\ A/mm^2$	$5\ A/mm^2$	500
δ	90	180	300

Πίνακας 4.13 – Σημεία γραμμικοποίησης λειτουργικών καταστάσεων για πυκνότητα επίλυσης

Αναφορικά με το διάγραμμα T – ω, για την επίλυση έχουν καθοριστεί διακριτά σημεία ταχυτήτων για τα οποία υπολογίζονται μεγέθη όπως η επαγόμενη τάση, το φασικό ρεύμα κ.τ.λ. Επιπλέον, ορίζονται διακριτά σημεία ενδιαφέροντος για τη ροπή, σχηματίζοντας ζεύγη λειτουργικών σημείων (T, ω). Συγκεκριμένα, τα διανύσματα αυτά είναι:

- Ροπή: T_{em}: $[0{:}\,0.1{:}\,4 \quad 4.5{:}\,0.5{:}\,10 \quad 15{:}\,5{:}\,100]$ (A)
- Ταχύτητα: n: $[0.01\ 5\ 10\ 20\ 40\ 80\ 160\ 320\ 360\ 400\ 450{:}\,50{:}\,2000\ ]$ (B)

Άρα λοιπόν, για κάθε ένα σημείο λειτουργίας (T, ω) που ορίζεται από τα παραπάνω διανύσματα, αναζητείται η βέλτιστη λειτουργική κατάσταση (J, δ), το ζεύγος τιμών δηλαδή που ικανοποιεί την απαίτηση σε ροπή με τις μικρότερες δυνατές απώλειες, ικανοποιώντας ταυτόχρονα τους περιορισμούς ρεύματος (MTPA) και τάσης (MTPV).

<u>Maximum Torque Per Ampere (MTPA)</u>

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η αποδοτική λειτουργία της σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών, απαιτείται μία τεχνική ελέγχου που θα εξασφαλίζει την αποδοτικότερη ικανοποίηση των χαρακτηριστικών επίδοσης. Αυτό σημαίνει πως για δεδομένη απαίτηση σε ροπή, υπάρχει κάποια βέλτιστη λειτουργική κατάσταση για την οποία το πλάτος του ρεύματος είναι ελάχιστο.

Συγκεκριμένα, αυτό συμβαίνει καθώς μία συγκεκριμένη τιμή ροπής μπορεί να επιτευχθεί για πολλούς συνδυασμούς πλάτους ρεύματος και εσωτερικής γωνίας ροπής. Επομένως, όσο περισσότερο αξιοποιείται η ροπή λόγω βελτιστοποίησης της εσωτερικής γωνίας δ μεταξύ των αλληλεπιδρόντων πεδίων, τόσο μικρότερη είναι η απαίτηση σε ρεύμα και άρα μικρότερες οι απώλειες χαλκού. Ωστόσο, ανάλογα με την τιμή του πλάτους ρεύματος, η βέλτιστη γωνία ροπής διαφοροποιείται και ενώ αναμένεται να βρίσκεται στις 90 ηλεκτρικές μοίρες, αυτή αυξάνεται σε τιμή μεγαλύτερη.

Το φαινόμενο αυτό δεν είναι τόσο έντονο στις μηχανές επιφανειακών μαγνητών, καθώς οι αυτεπαγωγές ορθού και κάθετου άξονα δεν είναι τόσο διαφορετικές μεταξύ τους $(L_d \approx L_q)$, η ροπή εκτυπότητας είναι αρκετά μειώμενη και η αύξηση της βέλτιστης εσωτερικής γωνίας ροπής είναι αμελητέα με την αύξηση του ρεύματος.

Επομένως, η αναζήτηση της βέλτιστης εσωτερικής ηλεκτρικής γωνίας δ που αποδίδει την μέγιστη ροπή για κάθε επίπεδο ρεύματος, οδηγεί στο σχηματισμό της καμπύλης MTPA.

Maximum Torque Per Voltage (MTPV) – Field Weakening (FW)

Μία πολύ σημαντική παράμετρος στον έλεγχο της μηχανής είναι η επαγόμενη τάση που αναπτύσσεται στα τυλίγματα. Η στιγμιαία τιμή της φασικής αυτής τάσης δίνεται μάλιστα μέσω της πεπλεγμένης ροής Λ_φ στο τύλιγμα της φάσης ως εξής:

$$E_\varphi = \frac{d\Lambda_\varphi}{dt} = \frac{d\Lambda_\varphi}{d\theta_m} \cdot \omega_m \tag{4.16}$$

Διαφορετικά, η σχέση της ενεργού τιμής της επαγόμενης τάσης με την ταχύτητα και την πεπλεγμένη ροή είναι:

$$E_\varphi{}^{(rms)} = \frac{\Lambda_\varphi{}^{(\max)} \cdot \omega_m}{\sqrt{2}} \tag{4.17}$$

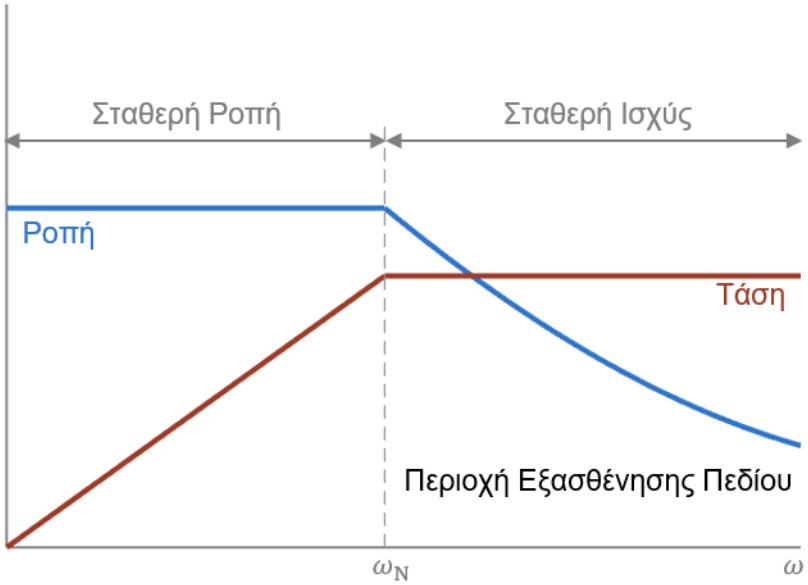
Άρα, όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα λειτουργίας, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η επαγόμενη τάση. Αυτό ωστόσο, εισάγει σημαντικούς περιορισμούς αφού σε περίπτωση που η τελευταία ξεπεράσει την επιβαλλόμενη τάση, θα δημιουργηθεί ανάστροφο ρεύμα και ο κινητήρας δεν θα μπορεί να οδηγηθεί πλέον.

Κατά κανόνα, η πεπλεγμένη ροή Λ_φ, προκύπτει από την επίλυση που οφείλεται στο ρεύμα (J, δ), σύμφωνα με τον περιορισμό MTPA που αναφέρθηκε νωρίτερα. Ωστόσο, σε περίπτωση που η ταχύτητα λειτουργίας ω_m, για την παραπάνω πεπλεγμένη ροή, προκαλεί επαγόμενη τάση μεγαλύτερη του ορίου, η λύση θα είναι να περιοριστεί η πεπλεγμένη ροή $\Lambda_\varphi{}^{(\max)}$, δηλαδή να προκληθεί η εξασθένηση του συνολικού πεδίου, μέσω εφαρμογής κατάλληλων ρευμάτων (field weakening). Αυτό φυσικά συνεπάγεται πως δεν είναι δυνατόν να παραχθεί η μέγιστη δυνατή ροπή για την ίδια ταχύτητα, αφού η συνολική φόρτιση και η μαγνητική επαγωγή θα είναι μικρότερη.

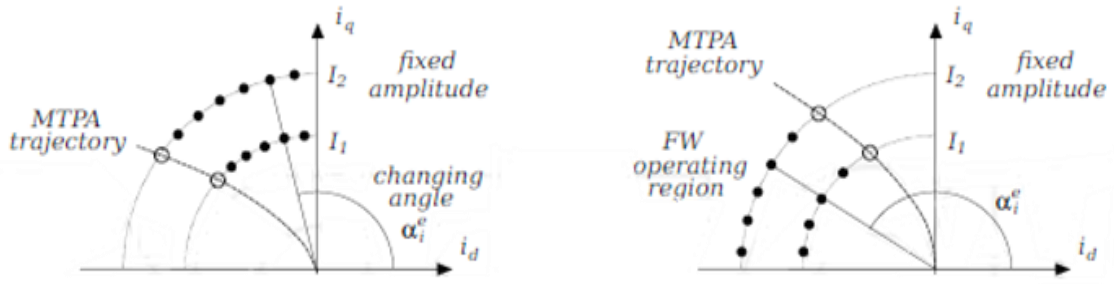
Η ταχύτητα για την οποία η επαγόμενη τάση γίνεται για πρώτη φορά ίση με την μέγιστη τάση που μπορεί να αποδώσει ο inverter, ονομάζεται ονομαστική ταχύτητα ή ταχύτητα βάσης (base speed) και αποτελεί μία πολύ κρίσιμη παράμετρο για τη σωστή σχεδίαση μίας μηχανής. Άρα λοιπόν, η παράμετρος αυτή καθορίζει τις δύο κύριες περιοχές λειτουργίας της μηχανής, την περιοχή σταθερής ροπής, πριν δηλαδή την ταχύτητα βάσης, και την περιοχή εξασθένησης πεδίου, όπου μπορεί να επιτευχθεί είτε η μέγιστη δυνατή ισχύς (με μειωμένη ικανότητα ροπής), είτε σταθερή ισχύς εξόδου $P=T\cdot\omega$ εάν είναι επιθυμητό, μέσω μείωσης της ροπής και αύξησης της ταχύτητας. Η παραπάνω συμπεριφορά απεικονίζεται συνοπτικά στο σχήμα 4.14.

Ένας τρόπος απεικόνισης του περιορισμού τάσης φαίνεται στο σχήμα 4.15, όπου απεικονίζεται η καμπύλη MTPA και η περιοχή εξασθένησης πεδίου πάνω στο πεδίο ρευμάτων d-q. Σύμφωνα με την θεωρία του μετασχηματισμού Park ή d-q για τις σύγχρονες μηχανές, η d συνιστώσα του ρεύματος (I_d) σχετίζεται άμεσα με τη διέγερση και τη μαγνητική ροή, ενώ η q συνιστώσα ρεύματος (I_q) σχετίζεται με την ανάπτυξη ηλεκτρομαγνητικής ροπής, σε αντιστοιχία με τη λειτουργία μηχανών συνεχούς ρεύματος. Άρα λοιπόν, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, διατηρώντας το πλάτος του ρεύματος, αλλά μεταβάλλοντας την εσωτερική γωνία δ (ή a_i^e) , δηλαδή αυξάνοντας κατά μέτρο τη συνιστώσα d ρεύματος (προς τις αρνητικές τιμές) και μειώνοντας την q συνιστώσα, μειώνεται η συνολική πεπλεγμένη ροή (λόγω μείωσης I_d) αλλά

ταυτόχρονα μειώνεται και η ικανότητα ανάπτυξης ροπής (μείωση I_q), αφού η ηλεκτρική γωνία δ δεν είναι πια βέλτιστη. Η περιοχή αυτή όπου η εσωτερική γωνία δεν είναι βέλτιστη ονομάζεται περιοχή εξασθένησης πεδίου.



Σχήμα 4.14 – Χαρακτηριστικές καμπύλες ροπής και τάσης ως προς την ταχύτητα περιστροφής



Σχήμα 4.15 – Απεικόνιση MTPA και MTPV
(Bianchi - Electromagnetic and Thermal Analysis of Permanent Magnet Synchronous Machines)

Το όριο της επιβαλλόμενης τάσης το οποίο δεν θα πρέπει να ξεπεραστεί καθορίζεται από την εκάστοτε DC τιμή της τάσης στη μπαταρία. Για τους σκοπούς της συγκεκριμένης εφαρμογής, έχει θεωρηθεί $V_{DC} = 48\,V$, σύμφωνα με τους κανονισμούς του διαγωνισμού. Άρα, θεωρώντας ως μέγιστο συντελεστή διαμόρφωσης $m_a^{(\max)} = 0{,}9$, η μέγιστη τιμή της επιβαλλόμενης τάσης την οποία δεν θα πρέπει να ξεπεράσει η επαγόμενη τάση είναι:

$$V_{\varphi,ac}^{(max)} = m_a \cdot \frac{V_{dc}}{2} = 21.6\,V$$

Αρχικά, για τον σχηματισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης Τ-ω, αναζητάται η μέγιστη δυνατή ροπή που μπορεί να αναπτυχθεί συναρτήσει της ταχύτητας ω_m του κινητήρα. Για το διάστημα ταχυτήτων όπου ικανοποιείται ο περιορισμός τάσης, αρκεί να επιβληθεί το μέγιστο εξεταζόμενο πλάτος ρεύματος ή ισοδύναμα πυκνότητα ρεύματος

($J_{slot}{}^{(rms)} = 5\ A/mm^2$) υπό την βέλτιστη εσωτερική γωνία δ, σύμφωνα με μέθοδο ελέγχου MTPA. Ο υπολογισμός αυτός είναι ιδιαίτερα απλός στην περίπτωση που αγνοούσαμε το μέγεθος της επαγόμενης τάσης. Προκειμένου όμως να ληφθεί υπ' όψιν και ο περιορισμός τάσης για τις υψηλές ταχύτητες, για κάθε σημείο λειτουργίας (T, ω) επιλέγονται όλοι οι συνδυασμοί λειτουργικών καταστάσεων (J, δ) οι οποίοι μπορούν να αποδόσουν την επιθυμητή ροπή. Στη συνέχεια, εφαρμόζοντας τον περιορισμό τάσης, απορρίπτονται οι φορτίσεις (J, δ) για τις οποίες η επαγόμενη τάση ξεπερνάει την μέγιστη επιβαλλόμενη. Από τους εναπομείναντες συνδυασμούς (J, δ), σύμφωνα με την λογική ελέγχου MTPA, επιλέγεται εκείνος που αποφέρει τις ελάχιστες δυνατές απώλειες.

Με αυτό τον τρόπο, για κάθε λειτουργικό σημείο (T, ω) που καθορίζεται από τα διανύσματα (A), (B) έχει επιλεχθεί ο βέλτιστος τρόπος τροφοδότησης των τυλιγμάτων με ρεύμα (πλάτος ρεύματος και εσωτερική γωνία δ). Αναζητώντας για κάθε ταχύτητα την μέγιστη δυνατή ροπή, σχηματίζεται η χαρακτηριστική καμπύλη μέγιστης ροπής.

Όπως είναι αναμενόμενο, για πολύ υψηλές ταχύτητες, ο περιορισμός τάσης παραβιάζεται και άρα η επίτευξη κάποιων τιμών ροπής δεν θα είναι εφικτή. Έτσι λοιπόν, ενώ η καμπύλη είναι οριζόντια ευθεία μέχρι μία συγκεκριμένη τιμή ταχύτητας, θα παρουσιάζει απο εκεί και έπειτα μείωση με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής.

4.4.6 Υπολογισμός Χαρτών Απωλειών και Απόδοσης Μηχανής

Με βάση τη μεθοδολογία που αναλύθηκε στην παράγραφο 4.4.4, υπολογίζονται οι συνολικές απώλειες της μηχανής σε κάθε σημείο λειτουργίας. Σε αυτό το επίπεδο, ορίζεται ως σημείο λειτουργίας το ζεύγος ηλεκτρομαγνητικής ροπής (T) και γωνιακής ταχύτητας περιστροφής (ω) της μηχανής. Επιλέγεται να παρουσιαστούν οι απώλειες και η απόδοση της μηχανής πάνω στη χαρακτηριστική καμπύλη $T - \omega$.

Οι απώλειες παρουσιάζονται με τη μορφή ισχύος ως εξής:

$$P_{loss} = P_{Fe} + P_{Cu} \tag{4.18}$$

Η απόδοση παρουσιάζεται με τη μορφή ποσοστού ως εξής:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \cdot 100\% \tag{4.19}$$

4.4.7 Υπολογισμός Μάζας Μηχανής

Για τον υπολογισμό της μάζας της μηχανής ακολουθείται μία διαδικασία κατά την οποία πρώτα υπολογίζονται οι όγκοι των υλικών που αποτελούν το ενεργό μέρος της μηχανής και στη συνέχεια, ανάλογα με την εκάστοτε πυκνότητα του υλικού, υπολογίζεται η μάζα του.

Για την εύρεση του όγκου κάθε υλικού, εκτός των τυλιγμάτων, υπολογίζεται το εμβαδόν του από τη διατομή της μηχανής και αυτό πολλαπλασιάζεται με το ενεργό μήκος της. Για τον όγκο των τυλιγμάτων, υπολογίζεται το συνολικό μήκος τους σύμφωνα με την

εξίσωση (4.15) και πολλαπλασιάζεται με τον όρο $\pi \cdot (d_{Cu}/2)^2$, όπου d_{Cu} η διατομή του αγωγού, η οποία λαμβάνεται ίση με $0{,}579mm$ για χρήση καλωδίου AWG23.

Στον πίνακα 4.16 παρουσιάζονται το υλικό κατασκευής και η πυκνότητα για κάθε δομικό στοιχείο του ενεργού μέρους της μηχανής.

Στοιχείο Μηχανής	Υλικό κατασκευής	Πυκνότητα $[{}^{kg}/_{m^3}]$
Σώμα στάτη	Σίδηρος	7870
Σώμα δρομέα	Σίδηρος	7870
Τύλιγμα	Χαλκός	8930
Μαγνήτης	NdFeB	7650
Άξονας	Ανοξείδωτος χάλυβας	7750

Πίνακας 4.16 – Σημεία γραμμικοποίησης λειτουργικών καταστάσεων για πυκνότητα επίλυσης

4.4.8 Ενεργειακή Αξιολόγηση Συστήματος Κίνησης

Σύμφωνα με την παράγραφο 3.3.3, για τον υπολογισμό των δυνάμεων που ασκούνται στο όχημα, μπορεί να βρεθεί η απαιτούμενη ροπή ανά kg για την κίνηση του οχήματος σε οποιαδήποτε κατάσταση. Συγκεκριμένα, όλες οι δυνάμεις που ασκούνται στο όχημα είναι εξαρτώμενες από την μάζα του με εξαίρεση την αεροδυναμική αντίσταση, η οποία είναι συνάρτηση μονάχα της πυκνότητας του αέρα, της ταχύτητας του αυτοκινήτου καθώς και των αεροδυναμικών του χαρακτηριστικών. Επομένως, η τελευταία δύναμη δεν μπορεί να καθορίσει την ενεργειακή ανάλυση που θα ακολουθήσει για την αξιολόγηση της απόδοσης και της μάζας που προσφέρει το επιλεγμένο κινητήριο σύστημα.

Η σχέση που δίνει την απαιτούμενη δύναμη πρόωσης από τον κινητήρα, δίνεται από την εξίσωση (3.16):

$$F_{\kappa\iota\nu} = m \cdot g \cdot (sin\theta + \mu \cdot cos\theta) + m \cdot a + \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \qquad (3.16)$$

Απομονώνοντας τον τελευταίο όρο που αντιστοιχεί στην αεροδυναμική αντίσταση, υπάρχουν δύο διαφορετικές συνιστώσες ροπής. Μία συνιστώσα ροπής χρησιμοποιείται για την μετακίνηση της μάζας του οχήματος και μία για την κάλυψη της αντίστασης του αέρα:

$$T_{\tau\rho o\chi o\acute{\upsilon}}{}^{(\mu\acute{\alpha}\zeta\alpha)} = [m \cdot g \cdot (sin\theta + \mu \cdot cos\theta) + m \cdot a] \cdot R_{\tau\rho o\chi o\acute{\upsilon}} \qquad (4.20)$$

και:

$$T_{\tau\rho o\chi o\acute{\upsilon}}{}^{(c_d)} = \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot R_{\tau\rho o\chi o\acute{\upsilon}} \qquad (4.21)$$

Όπως εξηγήθηκε λοιπόν, η δεύτερη συνιστώσα είναι σταθερή και ανεξάρτητη από τη μάζα που θα προσθέσει στο σύνολο το κινητήριο σύστημα. Άρα λοιπόν, ισχύει:

$$T_{\tau\rho o\chi o\acute{\upsilon}}{}^{(\mu\acute{\alpha}\zeta\alpha\ \alpha\nu\acute{\alpha}\ kg)} = [g \cdot (sin\theta + \mu \cdot cos\theta) + a] \cdot R_{\tau\rho o\chi o\acute{\upsilon}} \qquad (4.22)$$

Στη μόνιμη κατάσταση, η απαίτηση ισχύος ανά kg είναι:

$$P_n^{(\mu\acute{\alpha}\zeta\alpha\ \alpha\nu\acute{\alpha}\ kg)} = T_{\tau\rho o\chi o\acute{\upsilon}}^{(\mu\acute{\alpha}\zeta\alpha\ \alpha\nu\acute{\alpha}\ kg)} \cdot \omega_n \tag{4.23}$$

Εάν το όχημα πρέπει να διανύσει απόσταση d χιλιομέτρων, με μέση ονομαστική ταχύτητα $\bar{u} = 35\ km/h$, χρειάζεται το ακόλουθο ποσό ενέργειας:

$$E^{(\mu\acute{\alpha}\zeta\alpha\ \alpha\nu\acute{\alpha}\ kg)} = P_n^{(\mu\acute{\alpha}\zeta\alpha\ \alpha\nu\acute{\alpha}\ kg)} \cdot \Delta t = T_{\tau\rho o\chi o\acute{\upsilon}}^{(\mu\acute{\alpha}\zeta\alpha\ \alpha\nu\acute{\alpha}\ kg)} \cdot \omega_n \cdot \frac{d}{\bar{u}} \tag{4.24}$$

Τελικά, εάν το όχημα έχει μάζα m, η συνολική ενέργεια που απαιτείται προκειμένου το όχημα να διναύσει την απόσταση d, θα είναι:

$$E_{\varepsilon\xi\acute{o}\delta o\upsilon}^{(tot)} = m \cdot E^{(\mu\acute{\alpha}\zeta\alpha\ \alpha\nu\acute{\alpha}\ kg)} + E^{(c_d)} \tag{4.25}$$

Όπου:

$$E^{(c_d)} = T_{\tau\rho o\chi o\acute{\upsilon}}^{(c_d)} \cdot \omega_n \cdot \frac{d}{\bar{u}} \tag{4.26}$$

Ωστόσο, λαμβάνοντας υπ' όψιν τις απώλειες του συνολικού συστήματος (περιεχομένων των μηχανολογικών μερών), η συνολική ενέργεια που απαιτείται στην είσοδο για βαθμό απόδοσης η_{tot}, είναι:

$$E_{\varepsilon\iota\sigma\acute{o}\delta o\upsilon}^{(tot)} = \frac{1}{\eta_{tot}} \cdot E_{\varepsilon\xi\acute{o}\delta o\upsilon}^{(tot)} \tag{4.27}$$

Σημειώνεται πως για την σύγκριση των μηχανών για μία δεδομένη σχέση μετάδοσης, δηλαδή για κοινό ονομαστικό σημείο λειτουργίας, στον βαθμό απόδοσης λαμβάνεται υπ' όψιν μονάχα η απόδοση του κινητήρα αφού αυτή είναι αρκετή για τη σύγκριση. Έτσι λοιπόν:

$$\eta_{tot} = \eta_{\kappa\iota\nu} \tag{4.28}$$

Στην περίπτωση όμως που συγκρίνονται οι υποψήφιες μηχανές από τις δύο εξεταζόμενες σχέσεις μετάδοσης, απαιτείται η θεώρηση ενός ενδεικτικού βαθμού απόδοσης των μηχανολογικών μερών, δηλαδή:

$$\eta_{tot} = \eta_{\kappa\iota\nu} \cdot \eta_{K.T} \tag{4.29}$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5
ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΧΑΝΩΝ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάλυση των μηχανών που παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο ακολουθεί τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4. Η μεθοδολογία αυτή εφαρμόζεται σε καθεμία μηχανή που αναλύεται και στη συνέχεια συγκρίνονται τα αποτελέσματα.

5.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΧΑΝΩΝ

5.2.1 Καθορισμός Παραμέτρων Σχεδίασης

5.2.1.1 Εισαγωγή

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.1, δημιουργούνται αρχικά διαφορετικές διατομές μηχανών και στη συνέχεια διαφορετικές μηχανές βασισμένες σε αυτές τις διατομές, με μεταβολή του ενεργού μήκους και των ενεργών ελιγμάτων στα αυλάκια του στάτη της καθεμίας.

5.2.1.2 Καθορισμός Παραμέτρων Σχεδίασης Διατομών

Για την παραμετροποιημένη σχεδίαση των μηχανών, καθορίζονται οι βασικές παράμετροι που μεταβάλλονται έτσι ώστε να δημιουργηθούν οι διαφορετικές διατομές. Αυτές οι παράμετροι αναφέρονται αναλυτικά στην παράγραφο 4.2.2.1. Οι τιμές που είναι κοινές για όλες τις μηχανές είναι οι εξής:

- $m = 3$
- $ag = 0{,}7mm$
- $Tooth2SlotPercentage = 50\%$
- $ToothTips = 46\%$
- $Yoke2Tooth = 110\%$
- $InnerRatio = 40\%$
- $MagnetHeight = 8mm$
- $H_{endcap} = 5mm$
- $Layers = 1$
- $Overlap = 0$

Στη συνέχεια, ανάλογα με τον αριθμό των πόλων, ορίζονται οι υπόλοιπες παράμετροι της γεωμετρίας ως εξής:

- Για τις μηχανές με $P = 4$, ορίζονται $q = 4$, $spl = 0{,}65$ και μελετώνται εξωτερικές ακτίνες στάτη (R_{so}) από $55mm$ έως $110mm$ με βήμα $5mm$ (12 γεωμετρίες).
- Για τις μηχανές με $P = 6$, ορίζονται $q = 3$, $spl = 0{,}68$ και μελετώνται εξωτερικές ακτίνες στάτη (R_{so}) από $55mm$ έως $110mm$ με βήμα $5mm$ (12 γεωμετρίες).
- Για τις μηχανές με $P = 8$, ορίζονται $q = 2$, $spl = 0{,}68$ και μελετώνται εξωτερικές ακτίνες στάτη (R_{so}) από $95mm$ έως $110mm$ με βήμα $5mm$ (4 γεωμετρίες).
- Για τη μηχανή με $P = 10$, ορίζονται $q = 2$, $spl = 0{,}72$ και $R_{so} = 110mm$.

Συνολικά εξετάζονται 29 διαφορετικές γεωμετρίες διατομής μηχανών, οι οποίες παρατίθενται στο παράρτημα Α.

5.2.1.3 Καθορισμός Ενεργού Μήκους και Ενεργών Ελιγμάτων

Αφότου έχουν καθοριστεί όλες οι παράμετροι που περιγράφουν τη γεωμετρία της διατομής της μηχανής σύμφωνα με την παράγραφο 5.2.1.2, καθορίζεται το ενεργό της μήκος και τα ενεργά ελίγματα στις αύλακες του στάτη της. Αυτές οι τιμές επιλέγονται με βάση δύο κύρια χαρακτηριστικά της κάθε διατομής: την εξωτερική ακτίνα στάτη και τον αριθμό των αυλάκων ανά πόλο και φάση.

Συγκεκριμένα γίνεται ο εξής διαχωρισμός ανάλογα με την εξωτερική ακτίνα στάτη της κάθε μηχανής:

Εξωτερική Ακτίνα Στάτη $R_{so}(mm)$	Ενεργό μήκος $l(mm)$
55	$\{100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240, 260, 280\}$
60	$\{90, 110, 130, 150, 170, 190, 210, 230, 250, 270\}$
65	$\{80,100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240, 260\}$
$70, 75$	$\{70,90, 110, 130, 150, 170, 190, 210, 230, 250\}$
$80, 85$	$\{50,70,90, 110, 130, 150, 170, 190, 210, 230, 250\}$
$90, 95$	$\{50,70,90, 110, 130, 150, 170, 190, 210, 230\}$
$100, 105,110$	$\{40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220\}$

Ακόμη, ανάλογα με τον αριθμό των αυλάκων ανά πόλο και φάση q και το λόγο μετάδοσης του κιβωτίου ταχυτήτων προσδιορίζονται τα ενεργά εν σειρά ελίγματα N_φ κάθε μηχανής

q	N_φ (K/T 1:1)	N_φ (K/T 3:1)
$2, 4$	$\{40, 44, 48, 52, 56, 60, 64, 68, 72,76\}$	$\{8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 44\}$
3	$\{47, 50, 53, 56, 59, 62, 65, 68,71,74\}$	$\{12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36, 39\}$

Για τους σκοπούς της συγκεκριμένης ανάλυσης, προτιμάται κατανεμημένο τύλιγμα παράλληλης συνδεσμολογίας. Συνολικά εξετάζονται 2.613 διαφορετικές μηχανές για κάθε διαμόρφωση κιβωτίου ταχυτήτων.

5.2.2 Μεθοδολογία Ανάλυσης

Για την ανάλυση των 2.613 μηχανών που εξετάζονται, ακολουθείται η μεθοδολογία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4. Αρχικά αναλύεται καθεμία από τις 29 διαφορετικές διατομές και στη συνέχεια τα αποτελέσματα προσαρμόζονται σε καθεμία από τις 2.613 τελικές μηχανές για κάθε κιβώτιο ταχυτήτων, τροποποιώντας κατάλληλα το ενεργό μήκος και τα ενεργά εν σειρά ελίγματα της.

Η ανάλυση μπορεί να γίνει κατά αυτόν τον τρόπο, καθώς η μορφή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου δεν αλλάζει κατά μήκος της μηχανής. Έτσι, η ροπή υπολογίζεται ανά χιλιοστό και πολλαπλασιάζεται με το ενεργό μήκος της μηχανής για να ληφθεί η συνολική ροπή της. Ακόμη, με την αλλαγή του αριθμού των εν σειρά ελιγμάτων στις αύλακες του στάτη δεν αλλάζει η πυκνότητα του ρεύματος εντός της μηχανής, αλλά μόνο το φασικό ρεύμα που ρέει στους ακροδέκτες των πηνίων. Η αλλαγή αυτή επηρεάζει το ρεύμα στην έξοδο του αντιστροφέα.

5.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

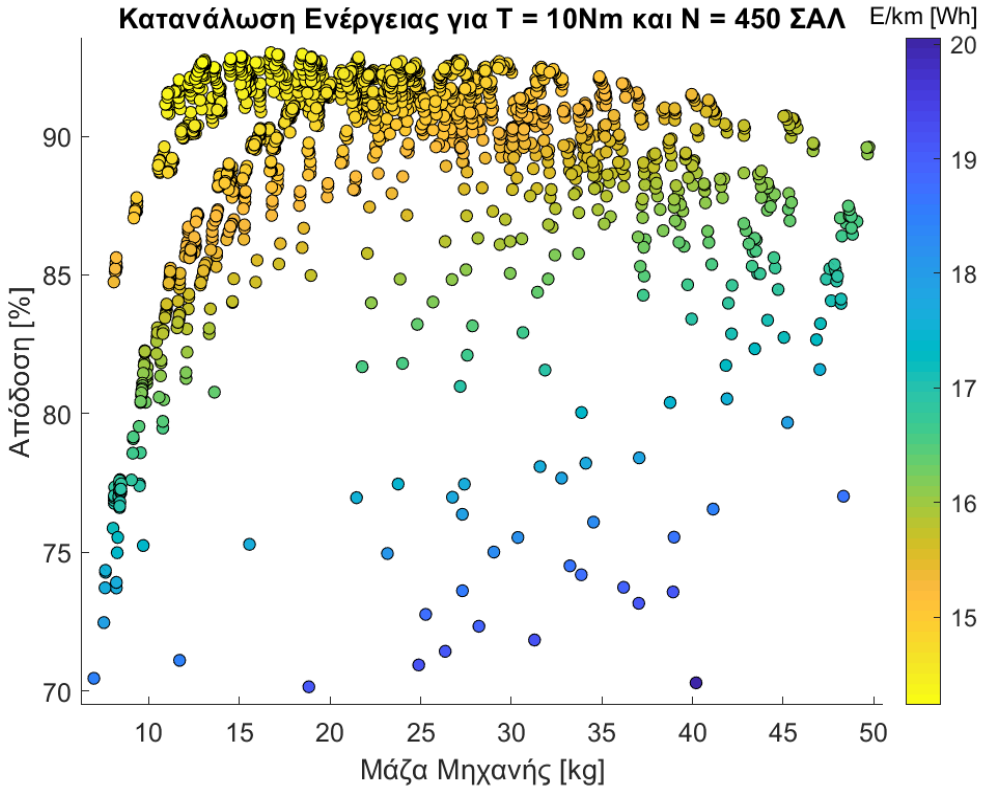
5.3.1 Εισαγωγή

Από την ανάλυση λαμβάνεται η πλήρης πληροφορία για την απόδοση, την επίδοση και τη γενική συμπεριφορά της κάθε μηχανής σε όλες τις λειτουργικές καταστάσεις της. Ως λειτουργική κατάσταση ορίζεται το ζεύγος της μηχανικής ροπής στον άξονα της μηχανής, T και της ταχύτητάς του, N.

Η ανάλυση γίνεται με σκοπό την εύρεση της βέλτιστης μηχανής για την εφαρμογή που μελετάται. Ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα αυτής παρουσιάζονται σε δύο σκέλη. Πρώτα, επιλέγεται η βέλτιστη μηχανή για λειτουργία χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων με κριτήριο τη μέγιστη απόδοσή στη λειτουργική κατάσταση που έχει ορισθεί ως ονομαστική. Στη συνέχεια, επιλέγεται η βέλτιστη μηχανή για λειτουργία με κιβώτιο ταχυτήτων λόγου 3:1 με το ίδιο κριτήριο.

5.3.2 Επιλογή Μηχανής με Κριτήριο την Ελάχιστη Μάζα με το Μέγιστο Βαθμό Απόδοσης στη Λειτουργία: $T = 10\ Nm$ και $N = 450\ ΣΑΛ$

5.3.2.1 Ανάλυση Μηχανών

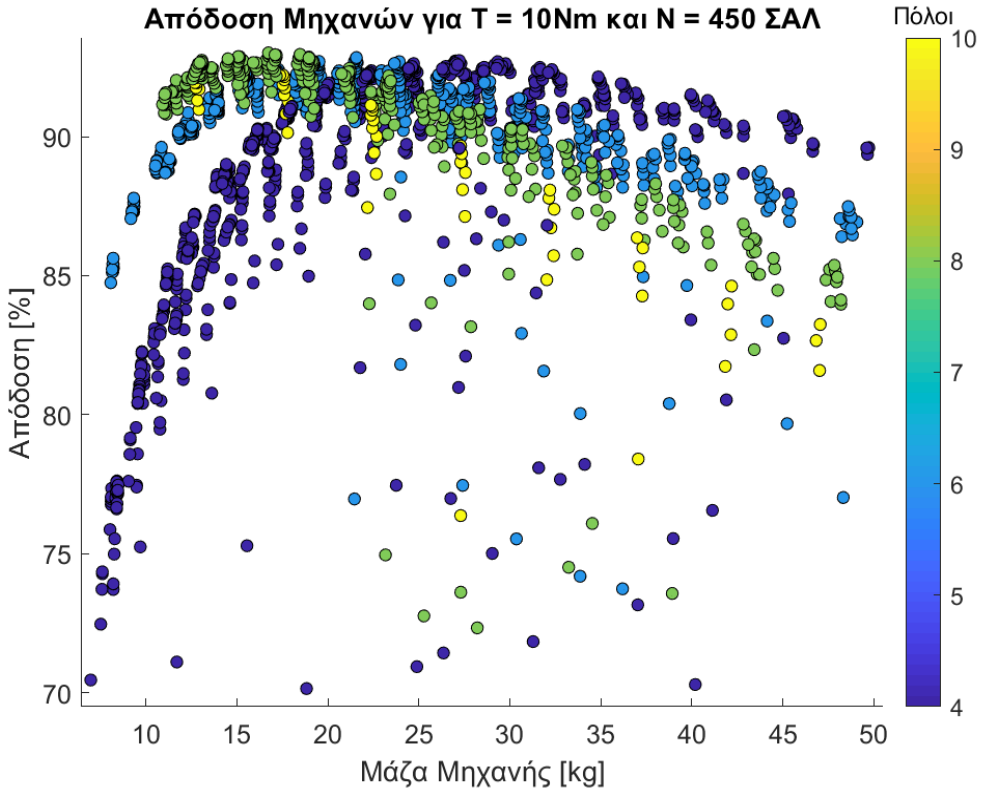


Σχήμα 5.1 – Γραφική αναπαράσταση Βαθμού Απόδοσης μηχανών στη λειτουργία με T = 10Nm και N = 450 ΣΑΛ

Στο σχήμα 5.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα απόδοσης – μάζας για τις 2.613 μηχανές που αναλύθηκαν και βρέθηκαν να έχουν απόδοση πάνω από 70%, καθώς αυτό θεωρήθηκε το ελάχιστο αποδεκτό όριο για τη σύγκριση των μηχανών. Απεικονίζονται δηλαδή 1.773 μηχανές. Ο χρωματικός άξονας υποδηλώνει την απαιτούμενη ενέργεια από τη μπαταρία, για να διανύσει το όχημα (με την εκάστοτε μηχανή) ένα χιλιόμετρο.

Κάθε σημείο αντιστοιχεί σε μία μηχανή μάζας m και βαθμού απόδοσης η για τη λειτουργία $T = 10\ Nm$ και $N = 450\ \Sigma A\Lambda$.

Καθώς πρόκειται για αρκετά διαφορετικές μηχανές αφού κατά τη σχεδίασή τους μεταβλήθηκαν αρκετά χαρακτηριστικά, παρουσιάζεται η κατανομή των μηχανών σε άξονες μάζας και απόδοσης με τον χρωματικό άξονα να υποδηλώνει τον αριθμό των πόλων κάθε μηχανής στο σχήμα 5.2.



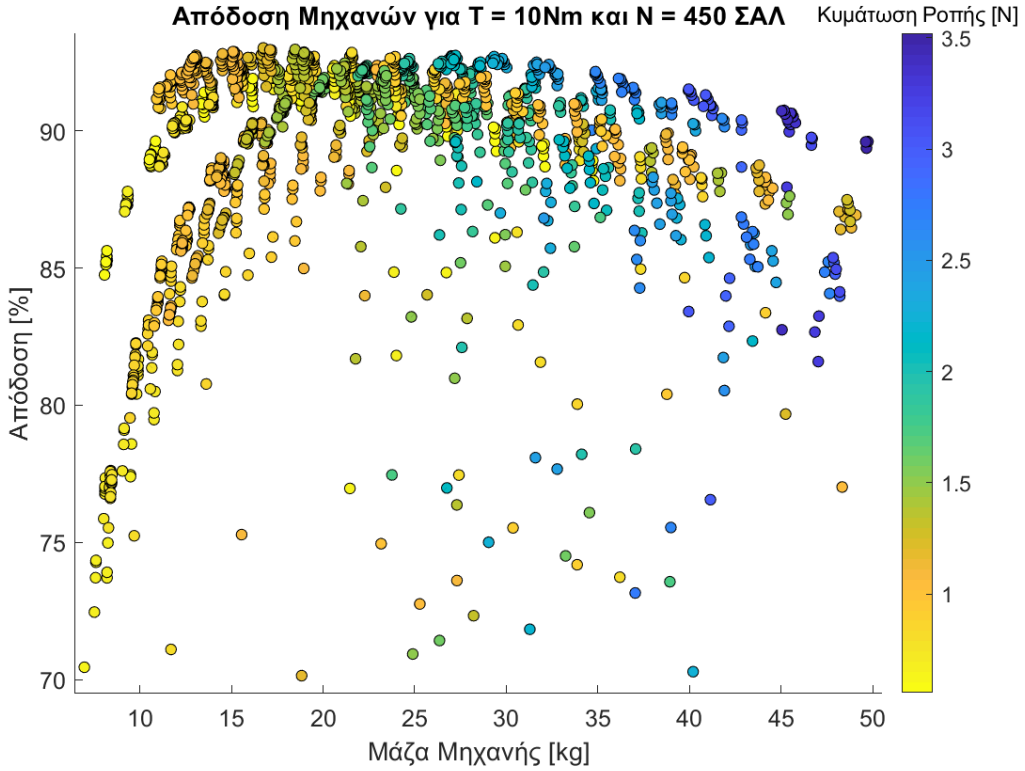
Σχήμα 5.2 – Γραφική αναπαράσταση Βαθμού Απόδοσης μηχανών στη λειτουργία με T = 10Nm και N = 450 ΣΑΛ με εμφανή τον αριθμό των πόλων καθεμίας

Από το σχήμα 5.2 φαίνεται πως οι υποψήφιες μηχανές είναι οκταπολικές καθώς είναι αυτές που παρουσιάζουν τους μεγαλύτερους βαθμούς απόδοσης έχοντας τη λιγότερη μάζα. Ακόμη γίνονται οι εξής παρατηρήσεις:

- Για τις μηχανές με $P = 4$ ο βαθμός απόδοσης φαίνεται να αυξάνεται με την αύξηση της μάζας της μηχανής (μεγαλύτερες ακτίνες διακένου και μεγαλύτερα ενεργά μήκη).
- Για τις μηχανές με $P = 6$ ο βαθμός απόδοσης φαίνεται να αυξάνεται αρχικά με την αύξηση της μάζας της μηχανής (μεγαλύτερες ακτίνες διακένου και μεγαλύτερα ενεργά μήκη) ενώ από κάποιο σημείο και μετά παρουσιάζει μείωση.
- Για τις μηχανές με $P = 8$ και $P = 10$ ο βαθμός απόδοσης φαίνεται να μειώνεται με την αύξηση της μάζας της μηχανής.

Από την κατανομή των μηχανών στο σχήμα 5.2 φαίνεται πως επικρατέστερες για τη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι οι οκταπολικές μηχανές που μελετήθηκαν καθώς είναι εκείνες με τους μεγαλύτερους βαθμούς απόδοσης στις μικρές μάζες.

Σημαντικό επίσης στοιχείο για την επιλογή της κατάλληλης μηχανής είναι η κυμάτωση της ροπής που εμφανίζει στη συγκεκριμένη λειτουργική κατάσταση. Στο σχήμα 5.3 παρουσιάζεται η κυμάτωση ροπής των μηχανών για τη λειτουργία τους με ροπή 10Nm. Παρατηρείται ότι η κυμάτωση ροπής στις επικρατέστερες ως βέλτιστες μηχανές δεν υπερβαίνει το 1N που αντιστοιχεί στο 10% της μέσης ροπής.

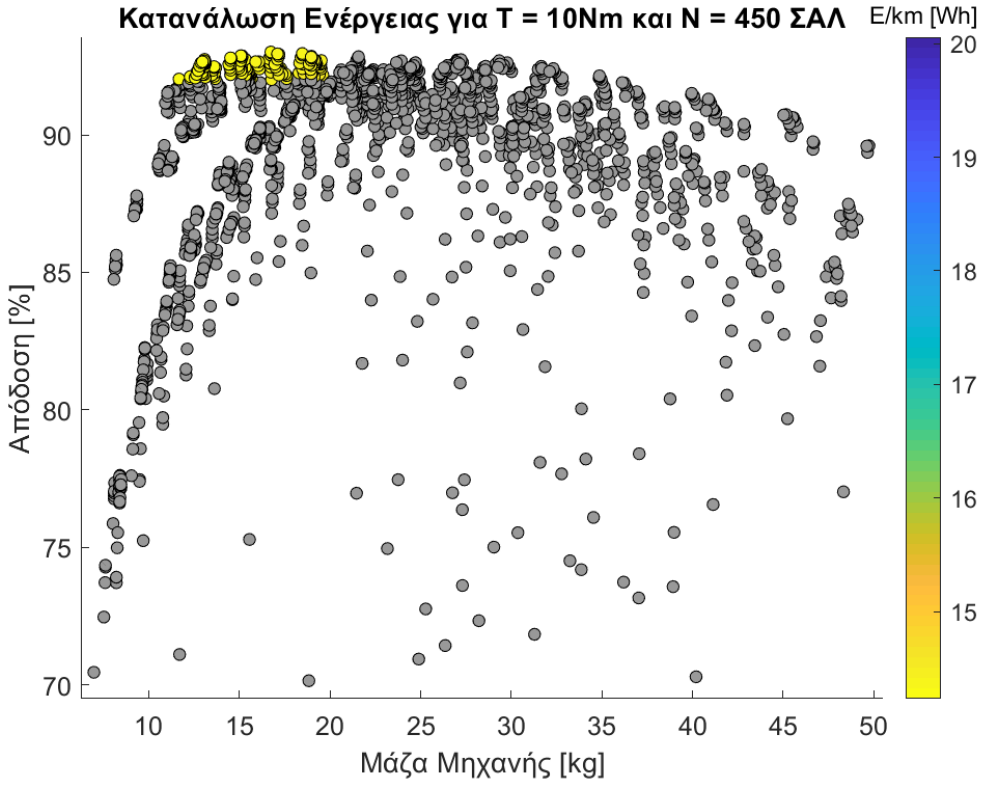


Σχήμα 5.3 – Γραφική αναπαράσταση Βαθμού Απόδοσης μηχανών στη λειτουργία με T = 10Nm και N = 450 ΣΑΛ με εμφανή την κυμάτωση ροπής της καθεμίας

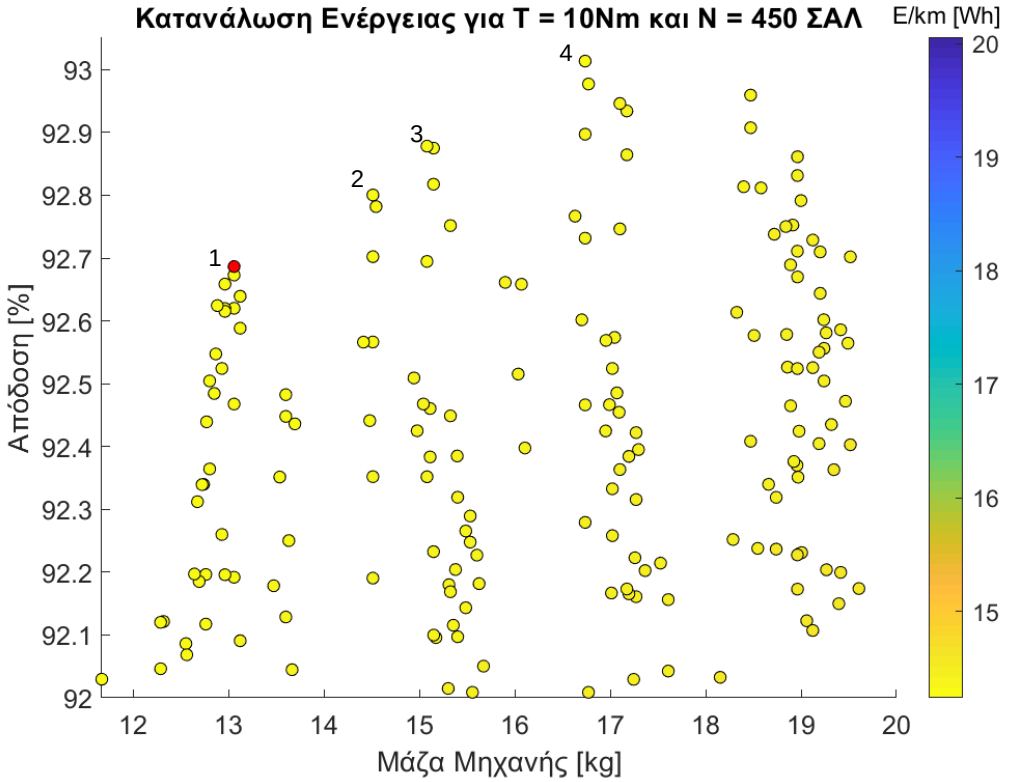
Από το σχήμα 5.1, παρατηρείται μία αρκετά υψηλή συγκέντρωση μηχανών με βαθμούς απόδοσης πάνω από 90%. Για το λόγο αυτό, επιλέγεται να συκριθούν μόνο μηχανές οι οποίες έχουν βαθμό απόδοσης πάνω από 92% και μάζα μικρότερη των $20\ kg$. Ακόμη, επιβάλλεται ως περιορισμός οι μηχανές να μπορούν να καλύψουν τη μέγιστη απαίτηση ροπής όπως αυτή καθορίστηκε στην παράγραφο 3.3.3.3, δηλαδή $50\ Nm$.

Οι τελικές προς σύγκριση μηχανές παρουσιάζονται στο σχήμα 5.4 το οποίο επιτρέπει τη σύγκριση των μηχανών αυτών που μελετώνται τελικά με τις συνολικές αναλυθείσες μηχανές. Οι πρώτες παρουσιάζονται έγχρωμες ενώ οι δεύτερες με γκρι χρώμα. Από τις 2.613 αναλυθείσες μηχανές, εκείνες που πληρούν τα κριτήρια είναι 179.

Το σχήμα 5.5 αποτελεί μία μεγέθυνση του σχήματος 5.4 και παρατίθεται για λόγους ευκρίνειας. Στο σχήμα 5.5 παρουσιάζονται αριθμημένες οι τέσσερις υποψήφιες μηχανές και ανάμεσά τους η επιλεγμένη μηχανή με κόκκινο χρώμα. Η επιλογή της έγινε με βάση το μέγιστο βαθμό απόδοσης και την ελάχιστη μάζα, έτσι ώστε να επιτευχθεί η ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας.



Σχήμα 5.4 – Γραφική αναπαράσταση Βαθμού Απόδοσης μηχανών που ικανοποιούν τα κριτήρια μάζας, απόδοσης και μέγιστης ροπής



Σχήμα 5.5 – Γραφική αναπαράσταση (σε μεγέθυνση) Βαθμού Απόδοσης μηχανών που ικανοποιούν τα κριτήρια μάζας, απόδοσης και μέγιστης ροπής

Σημειώνεται πως ουσιαστικά στο παραπάνω διάγραμμα, ξεχωρίζουν οι μηχανές με μικρότερη μάζα, καθώς το κέρδος σε απόδοση είναι σημαντικά μικρότερο σε σχέση με την έντονη μείωση της μάζας.

Η επιλογή της μηχανής «1» έγινε καθώς, όπως φαίνεται από την κατανομή της καταναλισκόμενης ενέργειας ανά χιλιόμετρο, παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ισορροπία στον συμβιβασμό μεταξύ μικρότερης μάζας και μεγαλύτερης απόδοσης. Επιπλέον, ανάμεσα στις μηχανές που εμφανίζουν περίπου την ίδια τιμή μάζας, προφανώς επικρατεί εκείνη με το μέγιστο βαθμό απόδοσης. Υπενθυμίζεται επίσης ότι για τη συγκεκριμένη εφαρμογή όπου απαιτείται εξοικονόμηση ενέργειας στο όχημα, η ονομαστική λειτουργία της μηχανής θα πρέπει να βρίσκεται στην «καρδιά» της απόδοσής της, για να εξασφαλίζεται ταυτόχρονα η βέλτιστη χρησιμοποίηση της διαθέσιμης τάσης. Αυτό το κριτήριο πληροί μόνον η μηχανή «1» ανάμεσα στις υποψήφιες μηχανές της ίδιας περίπου μάζας. Τέλος, για λόγους πληρότητας παρουσιάζεται αναλυτική σύγκριση μεταξύ των τεσσάρων επικρατέστερων γεωμετριών για τέσσερις διαφορετικές τιμές μάζας, έτσι ώστε να γίνει εμφανής η συσχέτιση μεταξύ μειωμένης μάζας και αυξημένης απόδοσης.

Συγκεκριμένα, τα χαρακτηριστικά απαιτούμενης ενέργειας ανά χιλιόμετρο, μέγιστης ροπής, μάζας και απόδοσης των τεσσάρων μηχανών είναι:

	Μάζα	Απόδοση	Μέγιστη Ροπή	Ενέργεια ανά km
Μηχανή 1	**13,06 kg**	**92,69%**	**68 Nm**	**14,24 Wh**
Μηχανή 2	14,54 kg	92,78%	79 Nm	14,28 Wh
Μηχανή 3	15,15 kg	92,82%	81 Nm	14,31 Wh
Μηχανή 4	17,17 kg	92,93%	95 Nm	14,33 Wh

Πίνακας 5.6 – Σύγκριση βασικών χαρακτηριστικών των υποψήφιων μηχανών

Οι παραπάνω μέγιστες τιμές ροπής αντιστοιχούν στη μέγιστη πυκνότητα ρεύματος, για την οποία πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις ($J_{slot} = 5\ A/mm^2$). Ένας επιπλέον λόγος για τον οποίο επιλέγεται η συγκεκριμένη μηχανή, είναι το γεγονός ότι καλύπτει την προδιαγραφή της μέγιστης ροπής, η οποία καθορίστηκε νωρίτερα ($50\ Nm$), χωρίς να είναι υπερβολικά διαστασιολογημένη. Το περιθώριο αυτό ασφαλείας στην μέγιστη ροπή, θα οδηγήσει και σε αποδοτικότερη λειτουργία ακόμα και σε καταστάσεις εκκίνησης. Έτσι λοιπόν, χωρίς να θυσιάζεται μεγάλο ποσό μάζας, επιτυγχάνεται αποδοτική λειτουργία σε μόνιμη κατάσταση και ταυτόχρονα καλύπτεται πλήρως η απαίτηση σε ροπή με τον αποδοτικότερο επίσης τρόπο.

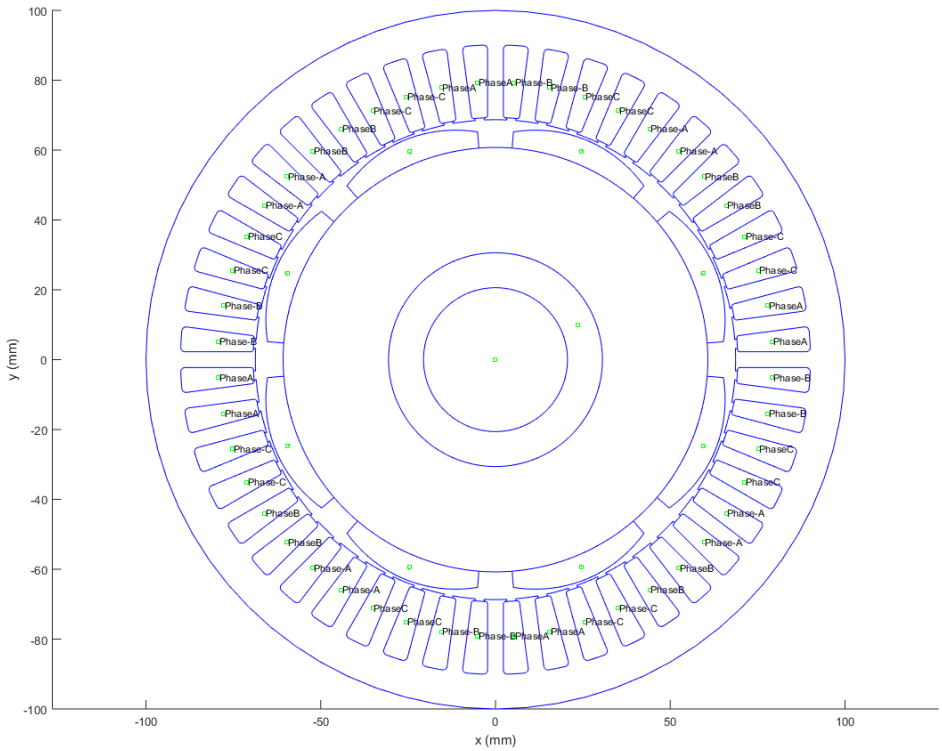
5.3.2.2 Επιλογή Βέλτιστης Μηχανής

Η μηχανή που επιλέγεται ως βέλτιστη λοιπόν έχει μάζα $13{,}06\ kg$ και έχει βαθμό απόδοσης $92{,}69\%$ στη λειτουργία που θεωρήθηκε ονομαστική. Αναλυτικότερα χαρακτηριστικά της επιλεγμένης μηχανής παρουσιάζονται στον πίνακα 5.7.

Παράμετρος	Τιμή
Πόλοι	$P = 8$
Αύλακες ανά πόλο και φάση	$q = 2$
Πάχος διακένου	$ag = 0{,}7\ mm$
Ύψος μαγνήτη	$H_{mag} = 8\ mm$
Εύρος μαγνήτη	$\theta_{mag} = 36°$
Εξωτερική ακτίνα στάτη	$R_{so} = 100\ mm$
Εξωτερική ακτίνα δρομέα	$R_{ro} = 68\ mm$
Ενεργά εν σειρά ελίγματα	$N_{\varphi} = 72\ ελίγματα$
Ενεργό μήκος	$l = 50\ mm$

Πίνακας 5.7 – Χαρακτηριστικά επιλεγμένης μηχανής

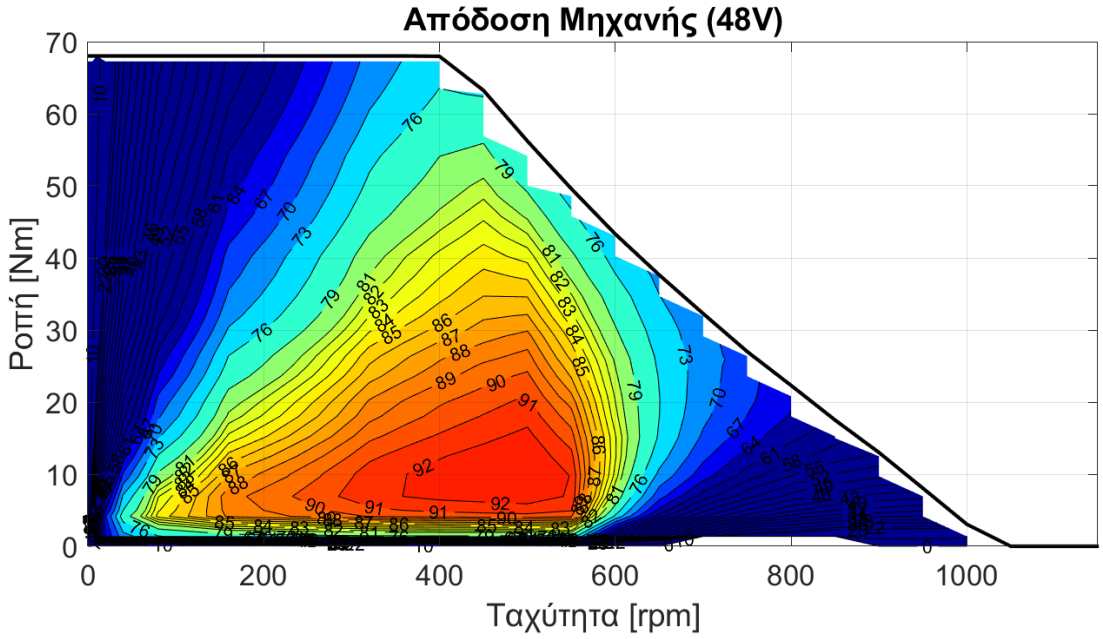
Στο σχήμα 5.8 παρουσιάζεται η διατομή της επιλεγμένης μηχανής.



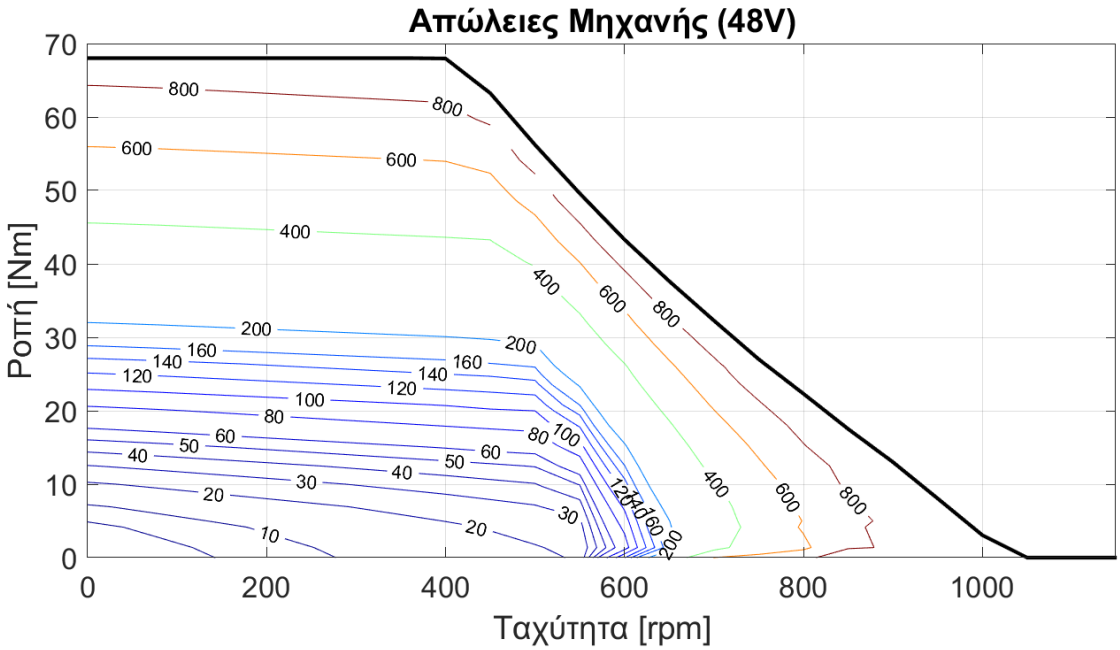
Σχήμα 5.8 – Διατομή επιλεγμένης μηχανής

Για την παραπάνω μηχανή και σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4, παράγεται ο χάρτης απόδοσης της, ο οποίος παρουσιάζεται στο σχήμα 5.9. Ο χάρτης απόδοσης παράγεται για DC τάση $48\ V$ στην είσοδο του αντιστροφέα. Η ονομαστική ροπή των $10\ Nm$ είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με τη μέγιστη ροπή των $68\ Nm$ που μπορεί να πετύχει αυτή η μηχανή με μικρή υπερφόρτιση. Η ροπή των $10\ Nm$ επιτυγχάνεται με πυκνότητα ρεύματος $1{,}6\ A/mm^2$ στις αύλακες του στάτη γεγονός που επιτρέπει την επίτευξη περαιτέρω ροπής χωρίς να υπερφορτιστεί πολύ η μηχανή. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η λειτουργία της μηχανής στα ονομαστικά της μεγέθη να είναι αρκετά αποδοτική.

Απόδοση και Απώλειες Μηχανής



Σχήμα 5.9 – Χάρτης απόδοσης επιλεγμένης μηχανής



Σχήμα 5.10 – Χάρτης απωλειών επιλεγμένης μηχανής

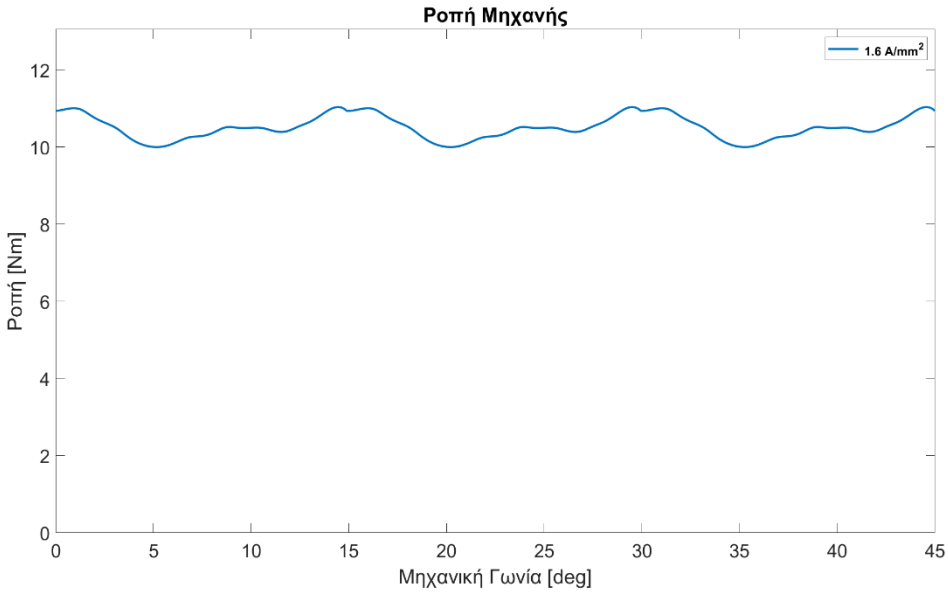
Στο σχήμα 5.9 παρουσιάζεται ο χάρτης απόδοσης της μηχανής. Η μηχανή στη λειτουργία $T = 10\ Nm$, $N = 450\ \Sigma A\Lambda$ λειτουργεί στην «καρδιά» του χάρτη απόδοσής της, δηλαδή στην περιοχή εκείνη που παρουσιάζει τη μέγιστη απόδοση από όλες τις λειτουργικές καταστάσεις της. Αυτό εξασφαλίζει τη βέλτιστη χρησιμοποίηση της τάσης εισόδου (με αποτέλεσμα την ορθότερη διαστασιολόγηση και την αποδοτικότερη λειτουργία του αντιστροφέα) αλλά και τη βέλτιστη χρησιμοποίηση της μηχανής γενικότερα.

Στο σχήμα 5.10 παρουσιάζεται ο χάρτης συνολικών απωλειών της μηχανής. Καθώς η μηχανή λειτουργεί μακριά από τη μέγιστη δυνατότητά της, οι απώλειες είναι σημαντικά λιγότερες, γεγονός που οφείλεται κυρίως στις μειωμένες απώλειες χαλκού που προκαλεί η μικρότερη από την ονομαστική πυκνότητα ρεύματος.

Οι συνολικές απώλειες της μηχανής στη λειτουργική κατάσταση $T = 10\,Nm$, $N = 450\,\Sigma A\Lambda$ είναι $34{,}46\,W$ εκ των οποίων $15{,}15\,W$ είναι απώλειες πυρήνα και $19{,}31\,W$ είναι απώλειες χαλκού. Οι μειωμένες απώλειες σιδήρου οφείλονται στο γεγονός ότι η μηχανή λειτουργεί σε χαμηλές στροφές και δεν ευνοείται η ανάπτυξη απωλειών πυρήνα. Σε αυτό συμβάλλει και η χρήση κατανεμημένου τυλίγματος.

Κυμάτωση Ροπής Μηχανής

Η κυματομορφή της ροπής στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας φαίνεται στο σχήμα 5.11. Η κυμάτωση της ροπής είναι $9{,}89\%$ ενώ η πυκνότητα του ρεύματος στις αύλακες του στάτη είναι $1{,}6\,A/mm^2$.



Σχήμα 5.11 – Κυματομορφή Ροπής συναρτήσει της μηχανικής γωνίας του δρομέα

5.3.2.3 Ανάλυση Μικρογεωμετρίας Επιλεγμένης Μηχανής

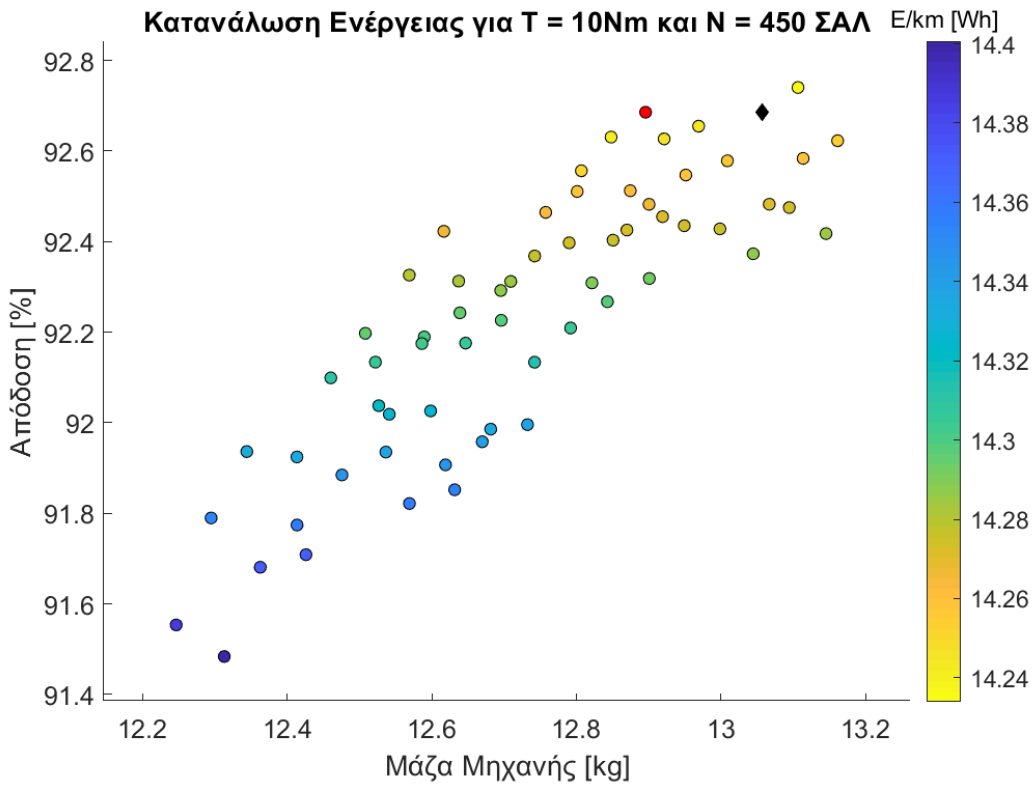
Η επιλεγμένη μηχανή προέκυψε ως η βέλτιστη ανάμεσα στις 2.613 μηχανές που αναλύθηκαν. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν αφορούσαν κυρίως τα κύρια χαρακτηριστικά της διατομής των μηχανών, θέτοντας ως κοινές κάποιες παραμέτρους οι οποίες αφορούσαν στοιχειώδεις παραμέτρους της γεωμετρίας των διατομών. Για την περαιτέρω βελτιστοποίηση της μηχανής και την εύρεση μίας ακόμη καλύτερης γεωμετρίας επιλέγεται να μεταβληθούν οι εξής παράμετροι του στάτη:

Παράμετρος	Εξεταζόμενες Τιμές
Λόγος δοντιού – αύλακας στο στάτη	$Tooth2SlotPercentage = [45\ \mathbf{50}\ 55]$
Εύρος μαγνήτη ως ποσοστό του πολικού βήματος	$MagnetDC = [75\ \mathbf{80}\ 85]$
Ποσοστό «σώματος» σιδήρου ως προς το πλάτος των δοντιών	$Yoke2ToothPercentage = [100\ \mathbf{110}\ 120]$
Λόγος εξωτερικής ακτίνας δρομέα προς εξωτερική ακτίνα στάτη	$spl = [0{,}66\ \mathbf{0{,}68}\ 0{,}70]$

Πίνακας 5.12 – Εξεταζόμενες παράμετροι για την ανάλυση μικρογεωμετρίας της επιλεγμένης μηχανής

Στον πίνακα 5.12 σημειώνονται με bold οι τιμές που αντιστοιχούν στην επιλεγμένη μηχανή, η οποία χρησιμοποιείται ως βάση για την μετέπειτα ανάλυση. Συνολικά αναλύονται 81 νέες μηχανές.

Στο σχήμα 5.13 παρουσιάζεται το διάγραμμα απόδοσης – μάζας για τις 81 μηχανές που αναλύθηκαν. Κάθε σημείο αντιστοιχεί σε μία μηχανή μάζας m και βαθμού απόδοσης η για τη λειτουργία $T = 10\ Nm$ και $N = 450\ \Sigma A\Lambda$.



Σχήμα 5.13– Γραφική αναπαράσταση Βαθμού Απόδοσης μηχανών στη λειτουργία με T = 10Nm και N = 450 ΣΑΛ

5.3.2.4 Επιλογή Βέλτιστης Μηχανής

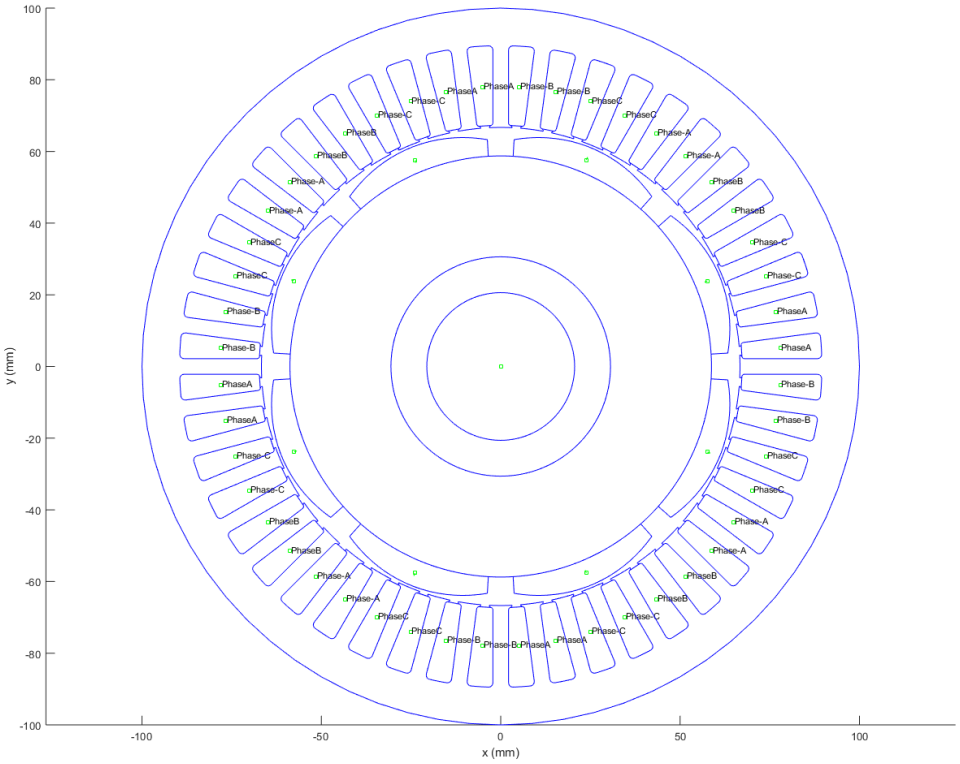
Στο σχήμα 5.13 με μαύρο ρόμβο σημειώνεται η αρχική γεωμετρία, ενώ με κόκκινο κύκλο η τελική επιλογή, η οποία θεωρήθηκε η βέλτιστη ανάμεσα στις 81 μηχανές. Η μηχανή που επιλέγεται ως βέλτιστη έχει μάζα $12{,}90\ kg$ και έχει βαθμό απόδοσης $92{,}69\%$ στην λειτουργία που θεωρήθηκε ονομαστική. Τα χαρακτηριστικά της επιλεγμένης μηχανής παρουσιάζονται στον πίνακα 5.14.

Παράμετρος	Επιλεγόμενες Τιμές
Λόγος δοντιού – αύλακας στο στάτη	$Tooth2SlotPercentage = 50$
Εύρος μαγνήτη ως ποσοστό του πολικού βήματος	$MagnetDC = 85$
Ποσοστό «σώματος» σιδήρου ως προς το πλάτος των δοντιών	$Yoke2ToothPercentage = 120$
Λόγος εξωτερικής ακτίνας δρομέα προς εξωτερική ακτίνα στάτη	$spl = 0{,}66$

Πίνακας 5.14 – Επιλεγόμενες παράμετροι για την τελική μηχανή

Σημειώνεται ότι η αρχική μηχανή βρίσκεται ανάμεσα στις καλύτερες μεταξύ αυτών που αναλύθηκαν και δεν παρατηρείται ιδιαίτερη βελτίωση από την αρχική στην τελική μηχανή. Η βελτιστοποίηση που έγινε αφορά τη μείωση της μάζας κατά $1{,}23\%$ διατηρώντας τον ίδιο βαθμό απόδοσης στην ονομαστική λειτουργία. Ακόμη, από την ανάλυση βρίσκεται μία μηχανή με μάζα $13{,}11\ kg$ και βαθμό απόδοσης $92{,}74\%$, η οποία δε θεωρήθηκε καλύτερη από την επιλεγμένη, καθώς δεν προσφέρει ουσιαστική βελτίωση στο βαθμό απόδοσης, ενώ το ονομαστικό σημείο λειτουργίας δε βρίσκεται πλέον στην καρδιά απόδοσης της μηχανής.

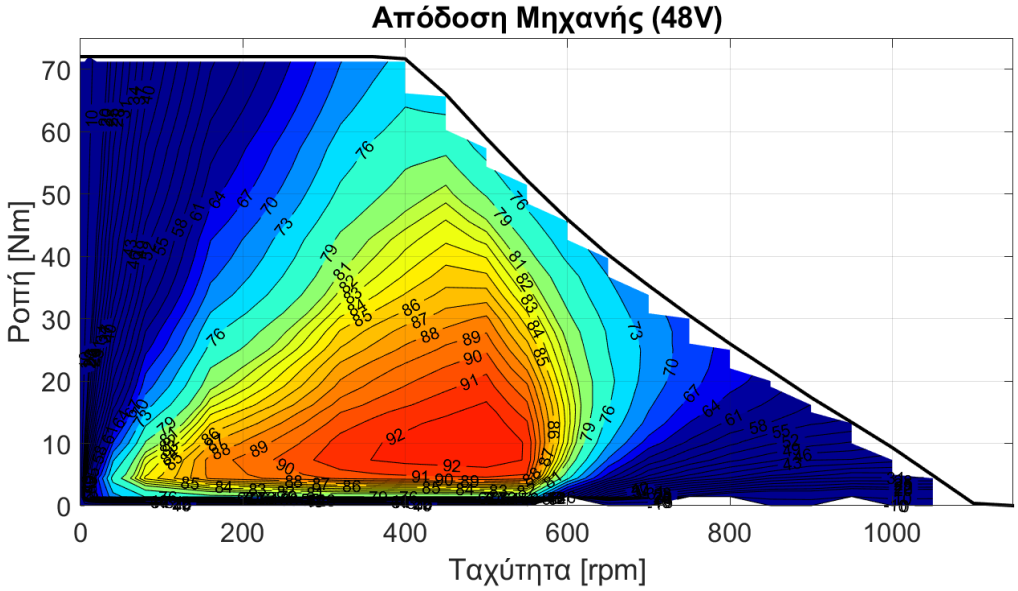
Στο σχήμα 5.15 παρουσιάζεται η διατομή της επιλεγμένης μηχανής.



Σχήμα 5.15 – Διατομή τελικής επιλεγμένης μηχανής

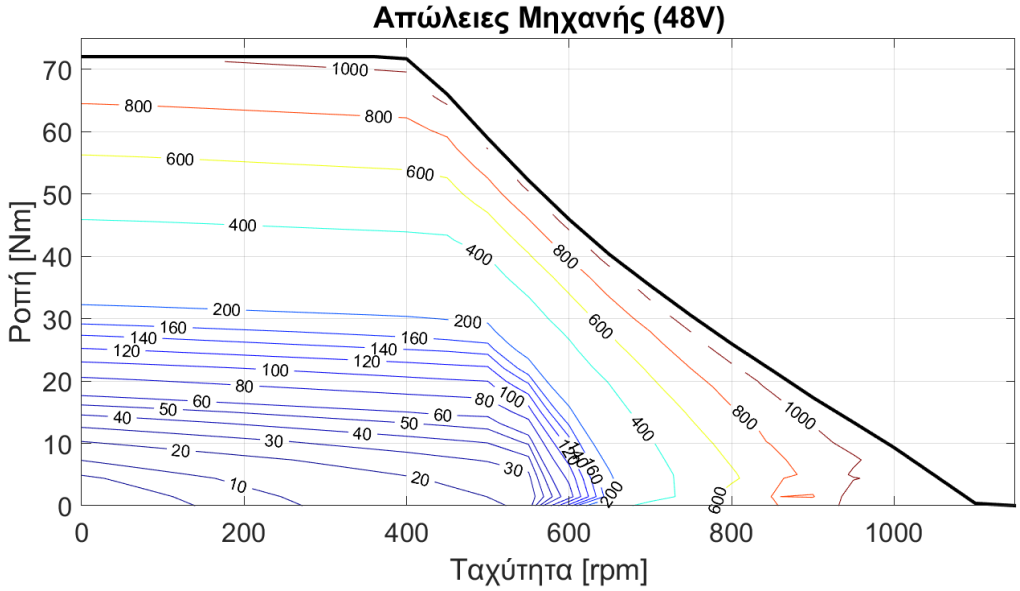
Απόδοση και Απώλειες Μηχανής

Για την παραπάνω μηχανή και σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3, παράγεται ο χάρτης απόδοσης της, ο οποίος παρουσιάζεται στο σχήμα 5.16. Ο χάρτης απόδοσης παράγεται για DC τάση $48\ V$ στην είσοδο του αντιστροφέα.



Σχήμα 5.16 – Χάρτης απόδοσης επιλεγμένης μηχανής

Στο σχήμα 5.17 παρουσιάζεται ο χάρτης συνολικών απωλειών της μηχανής. Όπως και η αρχική μηχανή, η επιλεγμένη μηχανή λειτουργεί μακριά από τη μέγιστη δυνατότητά της. Οι απώλειες είναι σημαντικά λιγότερες, γεγονός που οφείλεται κυρίως στις μειωμένες απώλειες χαλκού που προκαλεί η μικρότερη από την ονομαστική πυκνότητα ρεύματος.



Σχήμα 5.17 – Χάρτης απωλειών επιλεγμένης μηχανής

Οι συνολικές απώλειες της μηχανής στη λειτουργική κατάσταση $T = 10\,Nm$, $N = 450\,\Sigma A\Lambda$ είναι $34{,}46\,W$ εκ των οποίων $15{,}75\,W$ είναι απώλειες πυρήνα και $18{,}71\,W$ είναι απώλειες χαλκού.

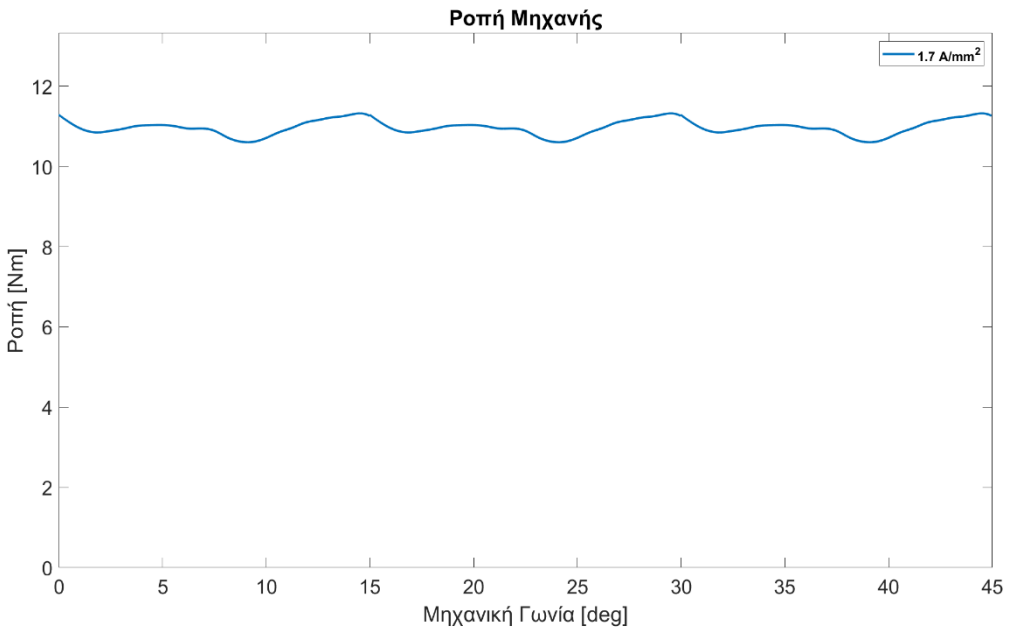
Αξίζει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο, πως η συγκεκριμένη μηχανή αξιοποιείται κατά το βέλτιστο δυνατό τρόπο, αφού ο πυρήνας της «καρδιάς» της απόδοσης εμφανίζεται για ελάχιστα υψηλότερο αριθμό στροφών. Συγκεκριμένα, στον πίνακα 5.18 παρουσιάζονται ενδεικτικά το σημείο λειτουργίας για την προς μελέτη εφαρμογή καθώς και το βέλτιστο σημείο που θα μπορούσε ιδανικά η μηχανή να λειτουργήσει:

	Προδιαγραφή	Βέλτιστη λειτουργία
Ροπή	10 Nm	10 Nm
Ταχύτητα	450 ΣΑΛ	500 ΣΑΛ
Απόδοση	92,69%	92,94%

Πίνακας 5.18 – Σύγκριση βέλτιστου με επιθυμητό σημείο λειτουργίας

<u>Κυμάτωση Ροπής Μηχανής</u>

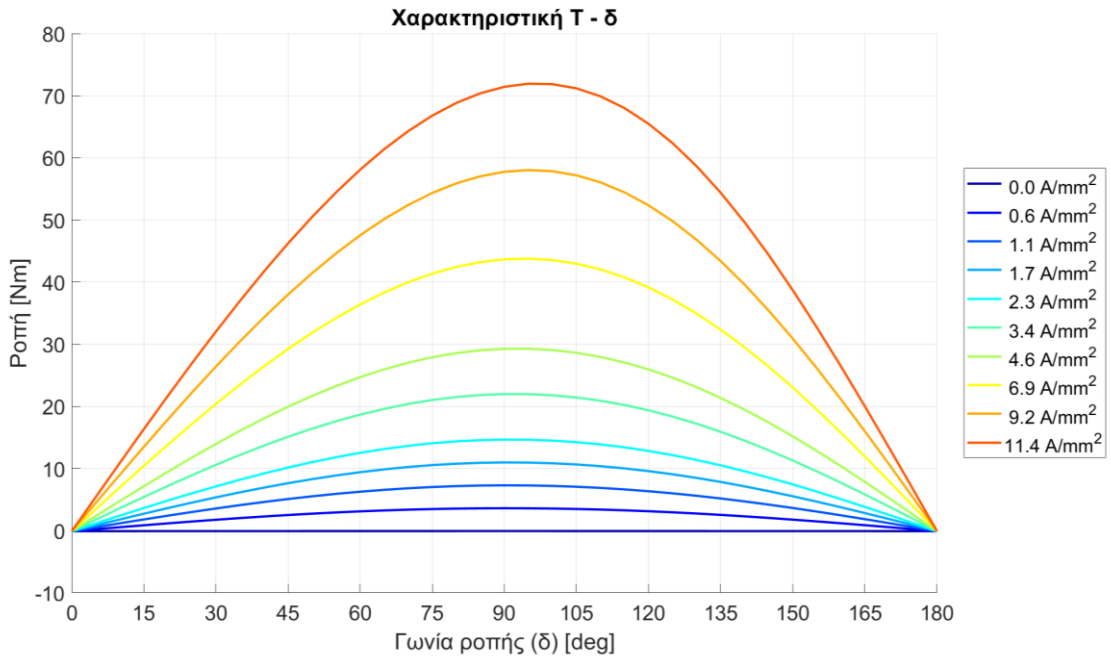
Η κυματομορφή της ροπής στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας φαίνεται στο σχήμα 5.19. Η κυμάτωση της ροπής είναι $6{,}57\%$ ενώ η πυκνότητα του ρεύματος στις αύλακες του στάτη είναι $1{,}7\ A/mm^2$.



Σχήμα 5.19 – Κυματομορφή Ροπής συναρτήσει της μηχανικής γωνίας του δρομέα

Η βελτίωση στην κυμάτωση της ροπής μέσω της μεταβολής των παραμέτρων μικρογεωμετρίας είναι εμφανής συγκρίνοντας τα σχήματα 5.11 και 5.19. Συγκεκριμένα, παρατηρείται μείωση της κυμάτωσης ροπής κατά 0,33 Nm.

Χαρακτηριστική Καμπύλη Ροπής – Γωνίας Ροπής (Τ – δ)



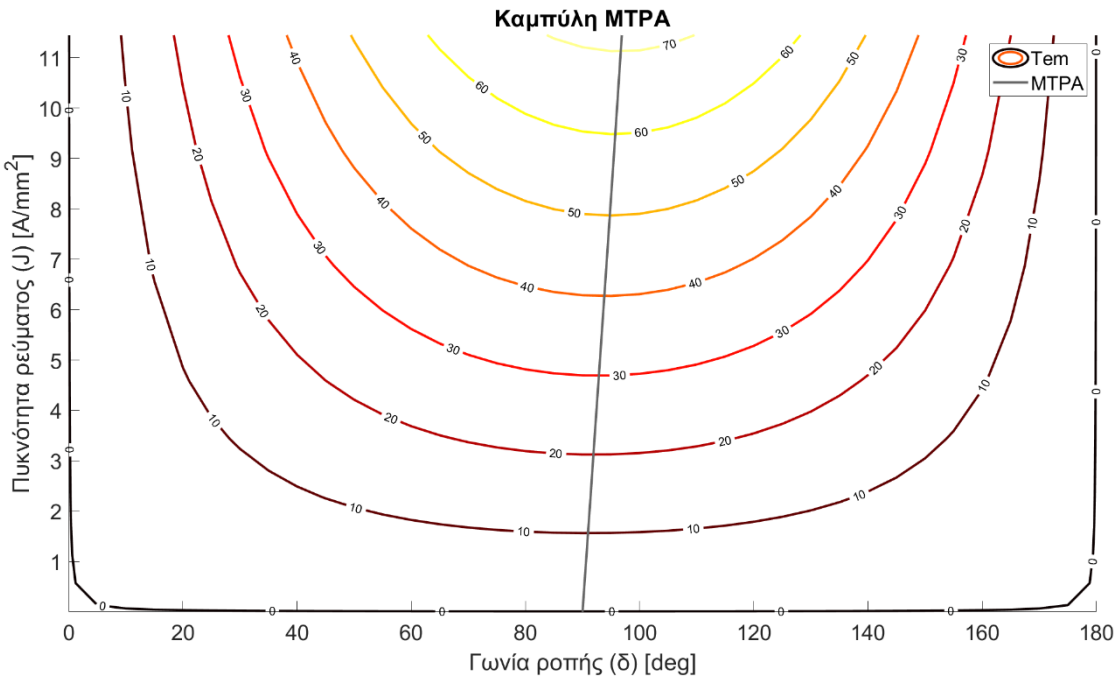
Σχήμα 5.20 – Χαρακτηριστικές καμπύλες Τ – δ

Στο σχήμα 5.20 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες ροπής – γωνίας ροπής (Τ – δ) για διαφορετικές πυκνότητες ρεύματος στις αύλακες του στάτη. Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν αφορούν ρεύματα πυκνότητας μέχρι και $J_{slot} = 5\,{}^{A}/_{mm^2}$.

Η ονομαστική ροπή των $10\,Nm$ επιτυγχάνεται για $J = 1{,}7\,{}^{A}/_{mm^2}$. Η μέγιστη ροπή που απαιτείται στην εκκίνηση, δηλαδή αυτή των $33{,}85\,Nm$ επιτυγχάνεται με μία μικρή υπερφόρτιση η οποία είναι εφικτή, καθώς οι μηχανές επιφανειακών μαγνητών είναι ανεκτικές σε υπερφορτίσεις για μικρό χρονικό διάστημα.

Στο σχήμα 5.21 παρουσιάζεται με γκρι χρώμα η καμπύλη μέγιστης ροπής ανά τιμή ρεύματος – “Maximum Torque Per Ampere” (MTPA), η οποία δείχνει την τιμή της γωνίας ροπής η οποία μεγιστοποιεί τη ροπή για δεδομένη πυκνότητα ρεύματος.

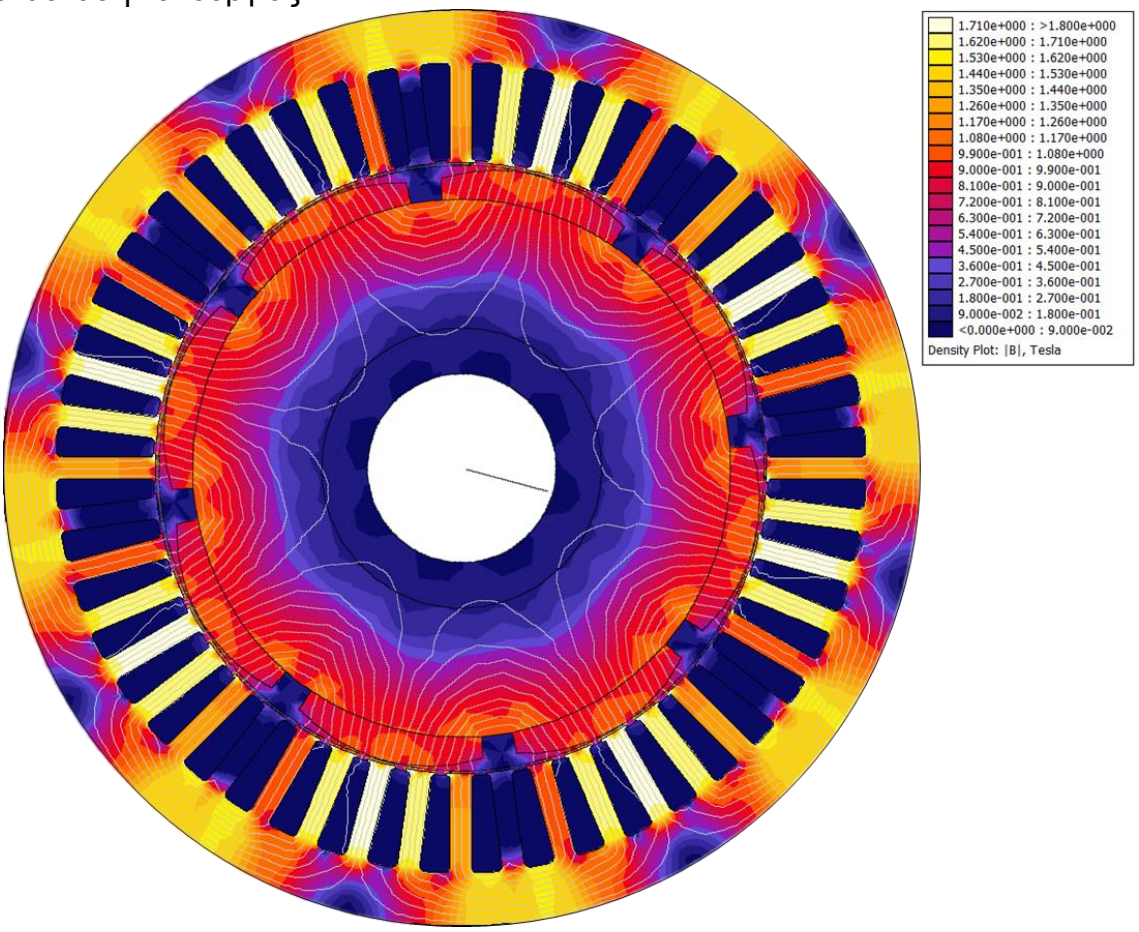
Με την αύξηση της πυκνότητας ρεύματος το σημείο μεγιστοποίησης της ροπής μετακινείται προς μεγαλύτερες γωνίες ροπής από την αναμενόμενη των $90°$, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στο φαινόμενο του κορεσμού. Ωστόσο, η κυριότερη αιτία στην οποία αποδίδεται το φαινόμενο αυτό είναι το γεγονός ότι ο δρομέας δεν είναι εντελώς κυλινδρικός, αλλά λόγω των επιφανειακών μαγνητών διαμορφώνεται μια ανομοιομορφία στην επιφάνειά του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι αυτεπαγωγές ορθού (L_d) και κάθετου (L_q) άξονα να μην είναι ακριβώς ίσες και να προκαλείται μία μικρή ροπή εκτυπότητας (αγγ.: reluctance torque). Έτσι, το σημείο μεγιστοποίησης της ροπής μετακινείται σε γωνίες μεγαλύτερες των $90°$. Η διαφορά όμως των δύο αυτεπαγωγών είναι πολύ μικρή στη συγκεκριμένη μηχανή, οπότε το φαινόμενο δεν είναι τόσο έντονο.



Σχήμα 5.21 – Καμπύλη MTPA

<u>Πεδίο στο Εσωτερικό της Μηχανής</u>

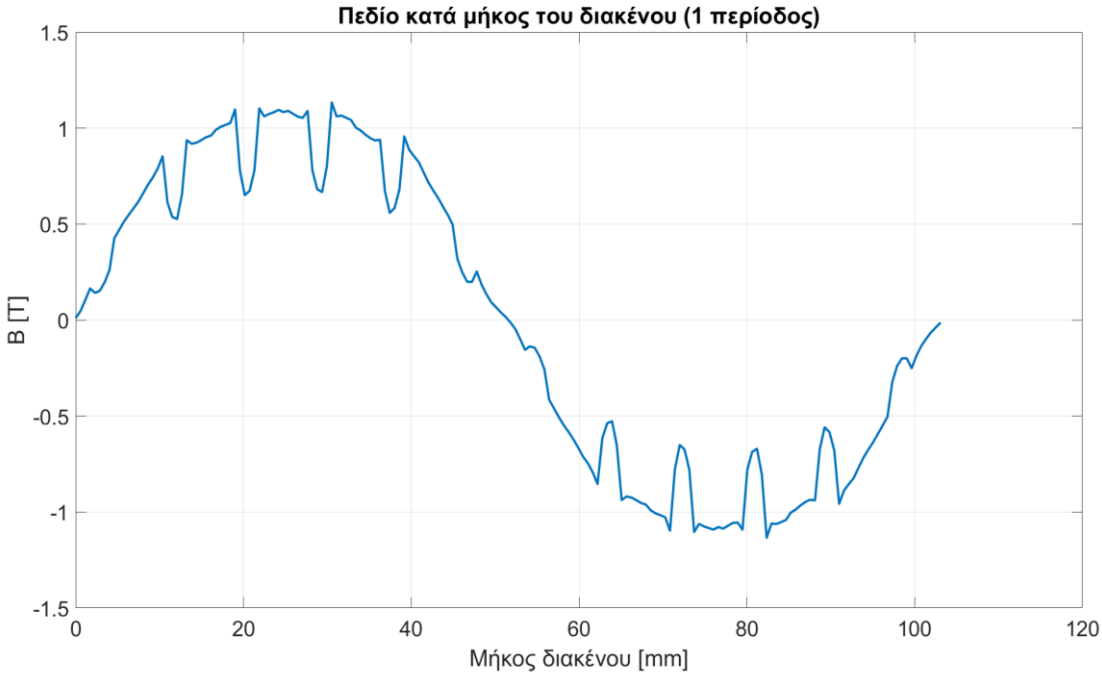
Στο σχήμα 5.22 παρουσιάζεται το πεδίο στο διάκενο της μηχανής στην ονομαστική κατάσταση λειτουργίας.



Σχήμα 5.22 – Πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής για ονομαστικό φορτίο

Το πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής δεν ξεπερνά τα 1,8T, γεγονός που σημαίνει ότι η μηχανή δε λειτουργεί σε κανένα σημείο της στον κορεσμό. Υψηλότερες τιμές του πεδίου συγκεντρώνονται στα δόντια του στάτη που βρίσκονται ακριβώς πάνω από τους μαγνήτες, γεγονός λογικό, αφού από εκεί περνά η περισσότερη ροή. Το αριστερότερο δόντι πάνω από κάθε μαγνήτη παρουσιάζει μεγαλύτερη πυκνότητα μαγνητικής ροής από το αντίστοιχο δεξιότερο, γεγονός που δικαιολογεί και δικαιολογείται από την ύπαρξη ροπής στη μηχανή.

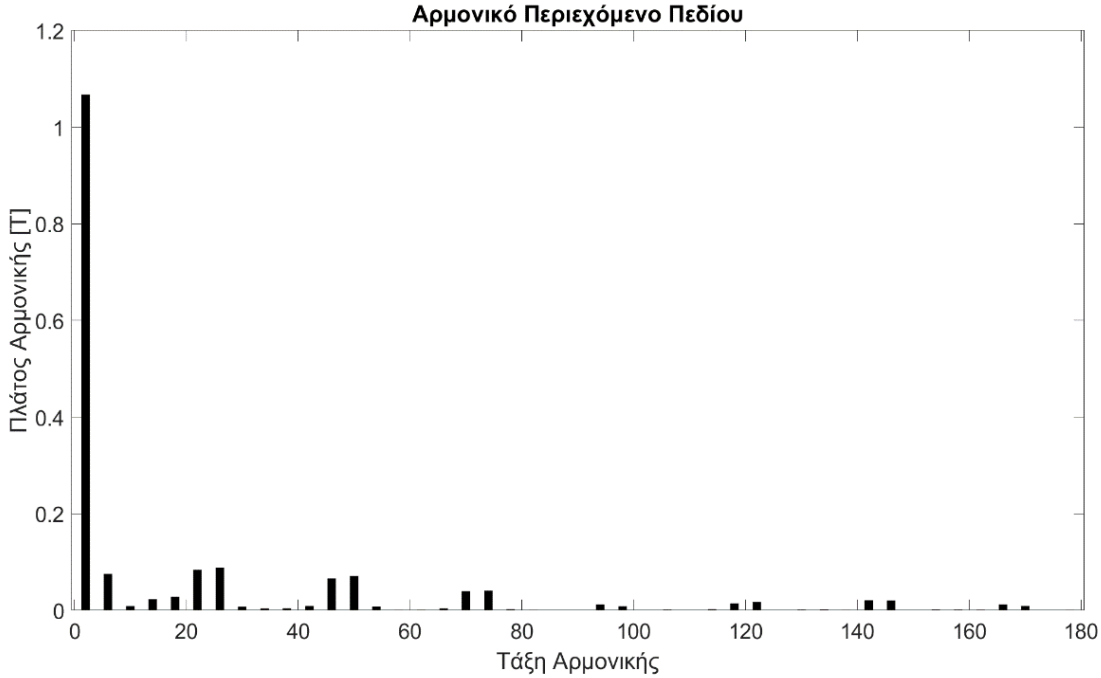
Στο Σχήμα 5.23 παρουσιάζεται η ακτινική συνιστώσα της έντασης του πεδίου κατά μήκος του διακένου. Παρουσιάζεται μία περίοδος του πεδίου, δηλαδή το πεδίο που αντιστοιχεί σε μήκος διακένου που καλύπτει ένα ζεύγος πόλων. Το πεδίο παρουσιάζει κάποια ημιτονικότητα έχοντας πλήθος αρμονικών συνιστωσών. Αυτές οι αρμονικές συνιστώσες οφείλονται κυρίως σε δύο παράγοντες. Αφενός το διανεμημένο τύλιγμα του στάτη εισάγει κάποιο αρμονικό περιεχόμενο και αφετέρου η αλληλουχία δοντιού – αύλακας στο στάτη εισάγει επίσης κάποιες αρμονικές που εμφανίζονται στην αγγλική βιβλιογραφία ως «tooth – slot harmonics».



Σχήμα 5.23 – Πεδίο στο διάκενο της μηχανής κατά μήκος αυτού (απεικόνιση μίας περιόδου)

Στο σχήμα 5.24 φαίνεται το αρμονικό περιεχόμενο του πεδίου, όπως αυτό προέκυψε από ανάλυση Fourier της κυματομορφής του σχήματος 5.23.

Η αρμονική συνιστώσα που κυριαρχεί είναι η θεμελιώδης, ενώ οι υπόλοιπες αρμονικές δεν παρουσιάζουν συγκρίσιμα με της αρμονικής πλάτη. Αυτό είναι και ένα από τα πλεονεκτήματα από τη χρήση κατανεμημένου τυλίγματος, το οποίο βοηθά σημαντικά στην ημιτονικότητα του πεδίου. Από το πεδίο απουσιάζουν οι ζυγές αρμονικές, καθώς υπάρχει περιοδικότητα ημίσεος κύματος.



Σχήμα 5.24 – Αρμονικό περιεχόμενο πεδίου στο διάκενο της μηχανής

<u>Σύγκριση Μηχανών</u>

Στον πίνακα 5.25 παρουσιάζεται η σύγκριση της τελικής γεωμετρίας με την αρχική. Αξιολογούνται ο βαθμός απόδοσης, η μάζα των μηχανών και η κυμάτωση της ροπής για $T = 10\ Nm$. Η μεγαλύτερη βελτίωση γίνεται στην κυμάτωση ροπής, η οποία μειώθηκε στα $^{2}/_{3}$ της αρχικής. Πρακτικά, μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας αυτής επετεύχθη η εύρεση μίας νέας γεωμετρίας η οποία έχει μικρότερη μάζα και την ίδια απόδοση με την αρχική γεωμετρία.

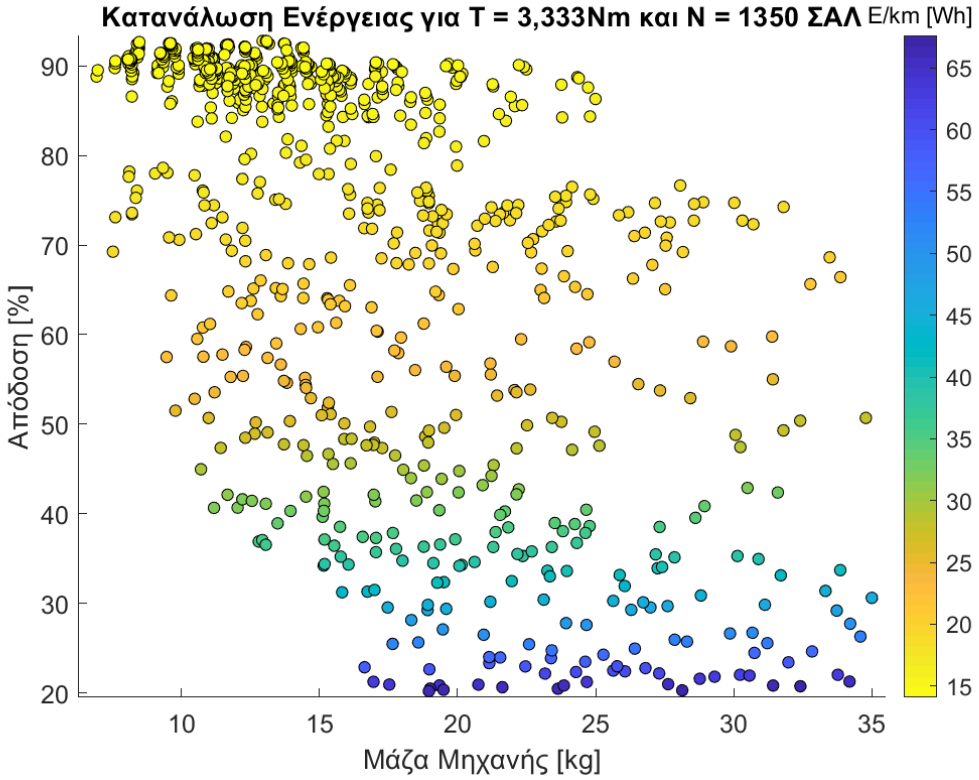
	Αρχική Επιλογή	Τελική Επιλογή	Διαφορά
Βαθμός Απόδοσης	92,69%	92,69%	-
Μάζα Μηχανής	13,06 kg	12,90 kg	-1,22%
Κυμάτωση Ροπής	9,89%	6,3%	-33,57%

Πίνακας 5.25 – Σύγκριση μηχανών

5.3.3 Επιλογή Μηχανής με Κριτήριο την Ελάχιστη Μάζα με το Μέγιστο Βαθμό Απόδοσης στη Λειτουργία: $T = 3,333\ Nm$ και $N = 1350\ ΣΑΛ$

5.3.3.1 Ανάλυση Μηχανών

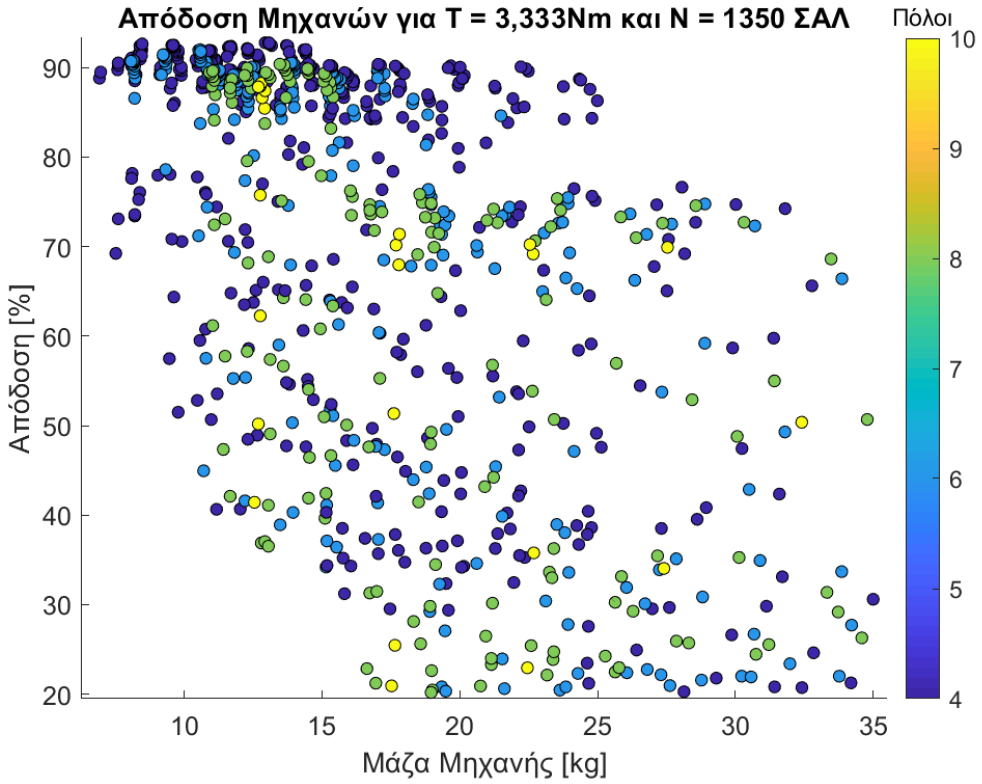
Στο σχήμα 5.26 παρουσιάζεται το διάγραμμα απόδοσης – μάζας για τις 2.613 μηχανές που αναλύθηκαν. Ο χρωματικός άξονας υποδηλώνει την απαιτούμενη ενέργεια από τη μπαταρία, για να διανύσει το όχημα (με την εκάστοτε μηχανή) ένα χιλιόμετρο. Κάθε σημείο αντιστοιχεί σε μία μηχανή μάζας m και βαθμού απόδοσης η για τη λειτουργία $T = 3{,}333\ Nm$ και $N = 1350\ ΣΑΛ$.



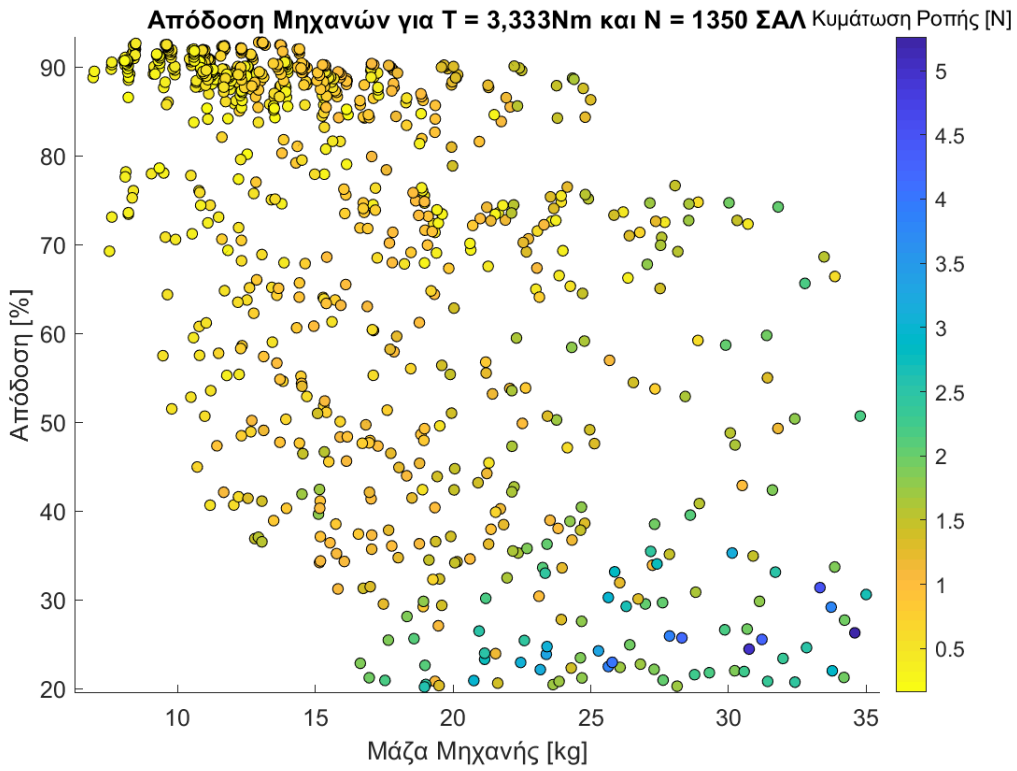
Σχήμα 5.26 – Γραφική αναπαράσταση Βαθμού Απόδοσης μηχανών στη λειτουργία με T = 3,333Nm και N = 1350 ΣΑΛ

Καθώς πρόκειται για αρκετά διαφορετικές μηχανές αφού κατά τη σχεδίασή τους μεταβλήθηκαν αρκετά χαρακτηριστικά, παρουσιάζεται η κατανομή των μηχανών σε άξονες μάζας και απόδοσης με τον χρωματικό άξονα να υποδηλώνει τον αριθμό των πόλων κάθε μηχανής στο σχήμα 5.27.

Από το σχήμα 5.27 φαίνεται πως οι υποψήφιες μηχανές είναι τετραπολικές καθώς είναι αυτές που παρουσιάζουν τους μεγαλύτερους βαθμούς απόδοσης έχοντας τη λιγότερη μάζα. Σε αντίθεση με τη λειτουργία σε $T = 10\ Nm$ και $N = 450\ ΣΑΛ$, εδώ δεν προκύπτει κάποια συσχέτιση του αριθμού των πόλων με την απόδοση των μηχανών καθώς η μάζα μεταβάλλεται. Σαν γενική παρατήρηση επισημαίνεται ότι για οποιονδήποτε αριθμό πόλων, η απόδοση της μηχανής φαίνεται να μειώνεται με την αύξηση της μάζας.



Σχήμα 5.27 – Γραφική αναπαράσταση Βαθμού Απόδοσης μηχανών στη λειτουργία με T = 3,333Nm και N = 1350 ΣΑΛ με εμφανή τον αριθμό των πόλων καθεμίας

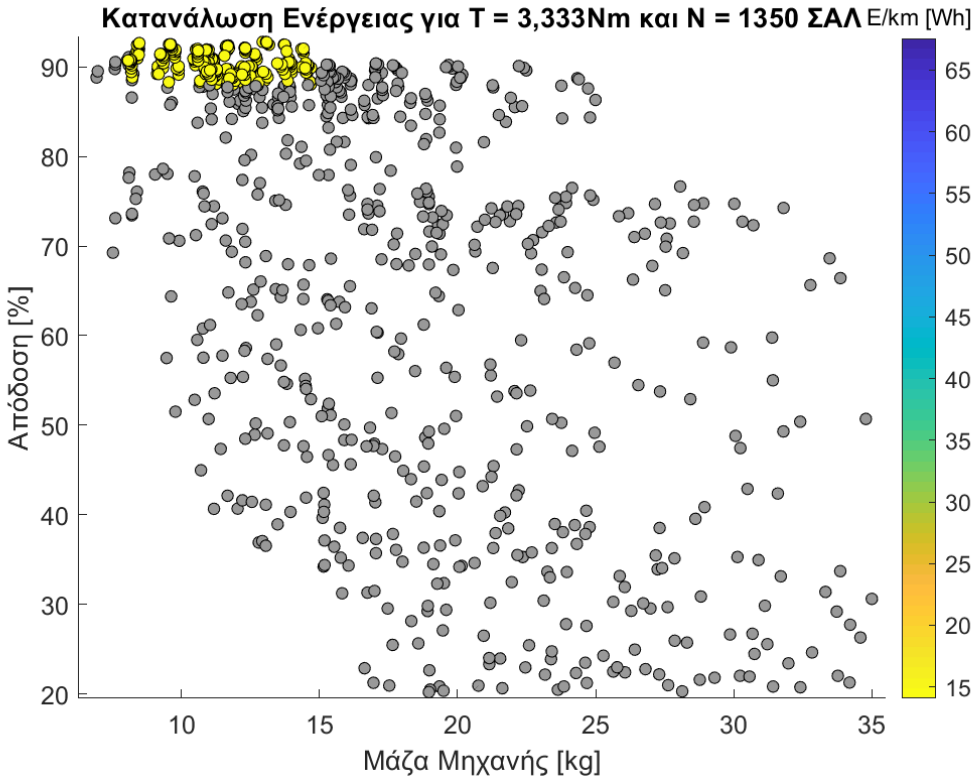


Σχήμα 5.28 – Γραφική αναπαράσταση Βαθμού Απόδοσης μηχανών στη λειτουργία με με T = 3,333Nm και N = 1350 ΣΑΛ με εμφανή την κυμάτωση ροπής της καθεμίας

Σημαντικό επίσης στοιχείο για την επιλογή της κατάλληλης μηχανής είναι η κυμάτωση της ροπής που εμφανίζει στη συγκεκριμένη λειτουργική κατάσταση. Στο σχήμα 5.28 παρουσιάζεται η κυμάτωση ροπής των μηχανών για τη λειτουργία τους με ροπή $3{,}333\ Nm$. Παρατηρείται ότι η κυμάτωση ροπής στις επικρατέστερες ως βέλτιστες μηχανές δεν υπερβαίνει το $0{,}5\ Nm$ που αντιστοιχεί στο 15% της μέσης ροπής.

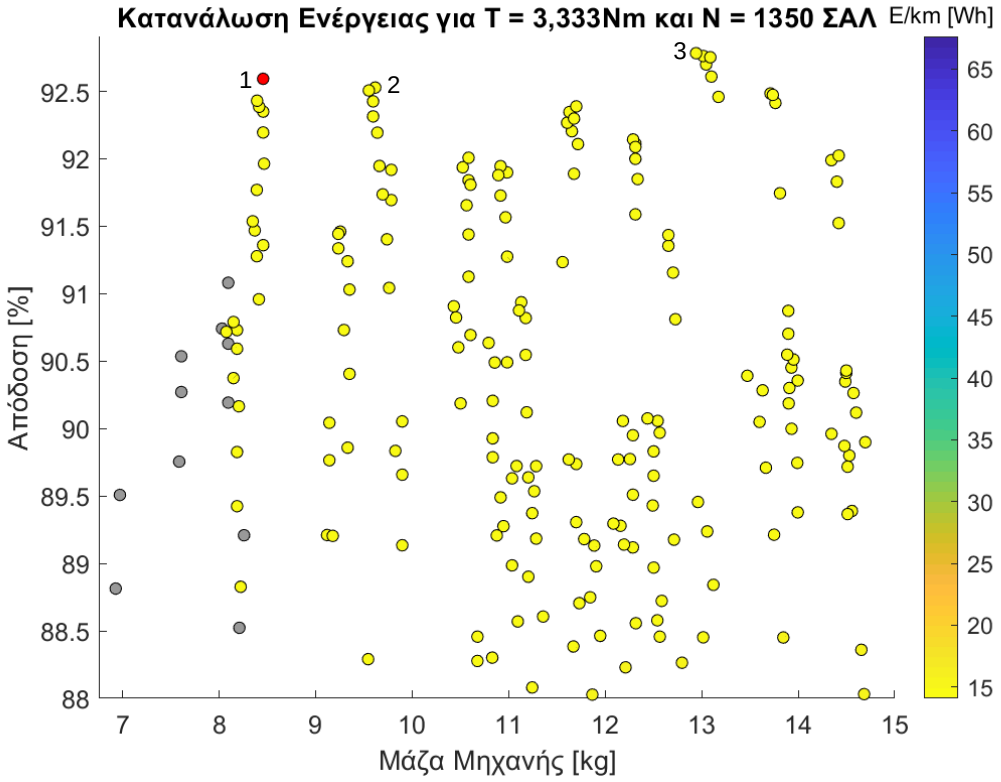
Από το σχήμα 5.26, παρατηρείται μία αρκετά υψηλή συγκέντρωση μηχανών με βαθμούς απόδοσης πάνω από 85%. Για το λόγο αυτό, επιλέγεται να συκριθούν μόνο μηχανές οι οποίες έχουν βαθμό απόδοσης πάνω από 85% και μάζα μικρότερη των $20\ kg$. Ακόμη, επιβάλλεται ως περιορισμός, οι μηχανές να μπορούν να καλύψουν τη μέγιστη απαίτηση ροπής όπως αυτή καθορίστηκε στην παράγραφο 3.3.3.3, δηλαδή $16{,}667\ Nm$.

Οι τελικές προς σύγκριση μηχανές παρουσιάζονται στο σχήμα 5.29 το οποίο επιτρέπει τη σύγκριση των μηχανών αυτών που μελετώνται τελικά με τις συνολικές αναλυθείσες μηχανές. Οι πρώτες παρουσιάζονται έγχρωμες ενώ οι δεύτερες με γκρι χρώμα. Από τις 2.613 αναλυθείσες μηχανές, εκείνες που πληρούν τα κριτήρια είναι 191.



Σχήμα 5.29 – Γραφική αναπαράσταση Βαθμού Απόδοσης μηχανών που ικανοποιούν τα κριτήρια μάζας, απόδοσης και μέγιστης ροπής

Το σχήμα 5.30 αποτελεί μία μεγέθυνση του σχήματος 5.29 και παρατίθεται για λόγους ευκρίνειας. Στο σχήμα 5.30 παρουσιάζονται αριθμημένες οι τρεις υποψήφιες μηχανές και ανάμεσά τους η επιλεγμένη μηχανή με κόκκινο χρώμα. Η επιλογή της έγινε με βάση το μέγιστο βαθμό απόδοσης και την ελάχιστη μάζα, έτσι ώστε να επιτευχθεί η ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας.



Σχήμα 5.30 – Γραφική αναπαράσταση (σε μεγέθυνση) Βαθμού Απόδοσης μηχανών που ικανοποιούν τα κριτήρια μάζας, απόδοσης και μέγιστης ροπής

Σημειώνεται πως σε αντίθεση με την παράγραφο 5.3.2.1 τώρα ξεχωρίζουν τρείς υποψήφιες μηχανές στις οποίες η επιλογή είναι πιο ξεκάθαρη, καθώς κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα απόδοσης, αλλά έχουν σημαντική διαφορά στη μάζα.

Συγκεκριμένα, τα χαρακτηριστικά μέγιστης ροπής, μάζας και απόδοσης των τριών μηχανών είναι:

	Μάζα	Απόδοση	Μέγιστη Ροπή	Ενέργεια ανά km
Μηχανή 1	**8,456 kg**	**92,59%**	**20,1 Nm**	**14,09 Wh**
Μηχανή 2	9,617 kg	92,53%	24,6 Nm	14,18 Wh
Μηχανή 3	12,94 kg	92,78%	37,7 Nm	14,29 Wh

Πίνακας 5.31 – Σύγκριση βασικών χαρακτηριστικών των υποψήφιων μηχανών

Η επιλογή της μηχανής «1» είναι προφανής από τη στιγμή που υπερτερεί ως προς τη μάζα, με την ίδια περίπου απόδοση, και παρουσιάζει ικανοποιητική επάρκεια ροπής ώστε να καλύπτεται οποιοδήποτε σφάλμα στην εκτίμηση απαίτησης ροπής αλλά και να απαιτείται μικρότερη υπερφόρτιση (πυκνότητα ρεύματος) σε περίπτωση μέγιστης ροπής ($16{,}667\ Nm$). Ακόμη, παρουσιάζει την ελάχιστη απαίτηση ενέργειας από τη μπαταρία.

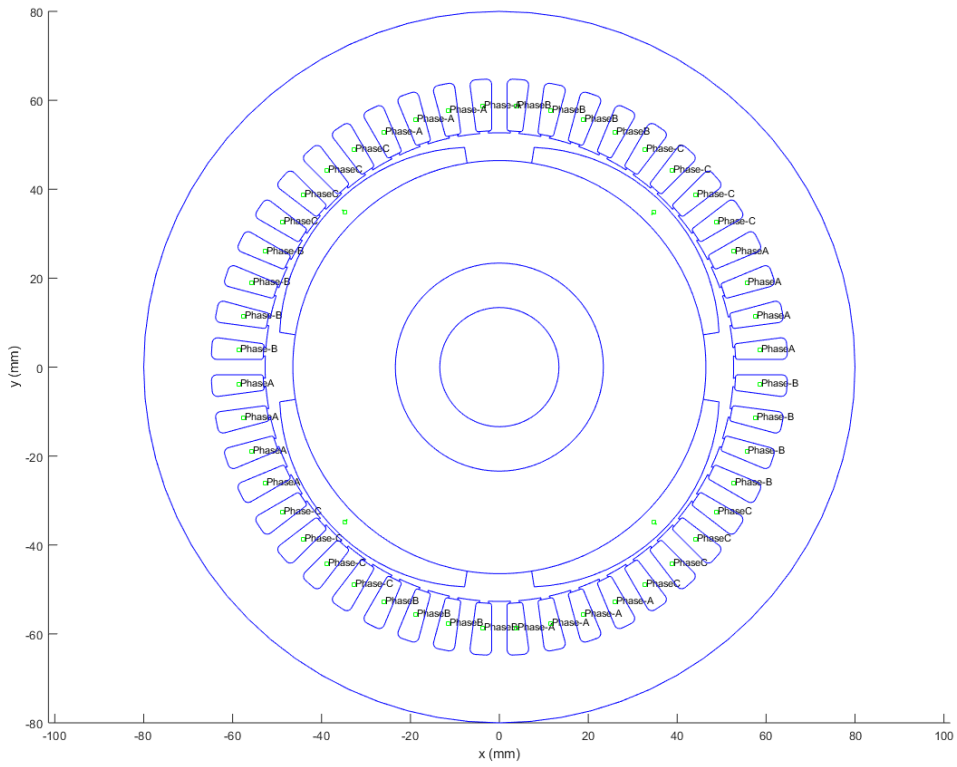
5.3.3.2 Επιλογή Βέλτιστης Μηχανής

Η μηχανή που επιλέγεται ως βέλτιστη έχει μάζα $8{,}456\ kg$ και έχει βαθμό απόδοσης $92{,}59\%$ στην λειτουργία που θεωρήθηκε ονομαστική. Τα χαρακτηριστικά της επιλεγμένης μηχανής παρουσιάζονται στον πίνακα 5.32.

Παράμετρος	Τιμή
Πόλοι	$P = 4$
Αύλακες ανά πόλο και φάση	$q = 4$
Πάχος διακένου	$ag = 0{,}7\ mm$
Ύψος μαγνήτη	$H_{mag} = 8\ mm$
Εύρος μαγνήτη	$\theta_{mag} = 72°$
Εξωτερική ακτίνα στάτη	$R_{so} = 80\ mm$
Εξωτερική ακτίνα δρομέα	$R_{ro} = 52\ mm$
Ενεργά εν σειρά ελίγματα	$N_{\varphi} = 32\ \varepsilon\lambda\acute{\iota}\gamma\mu\alpha\tau\alpha$
Ενεργό μήκος	$l = 50\ mm$

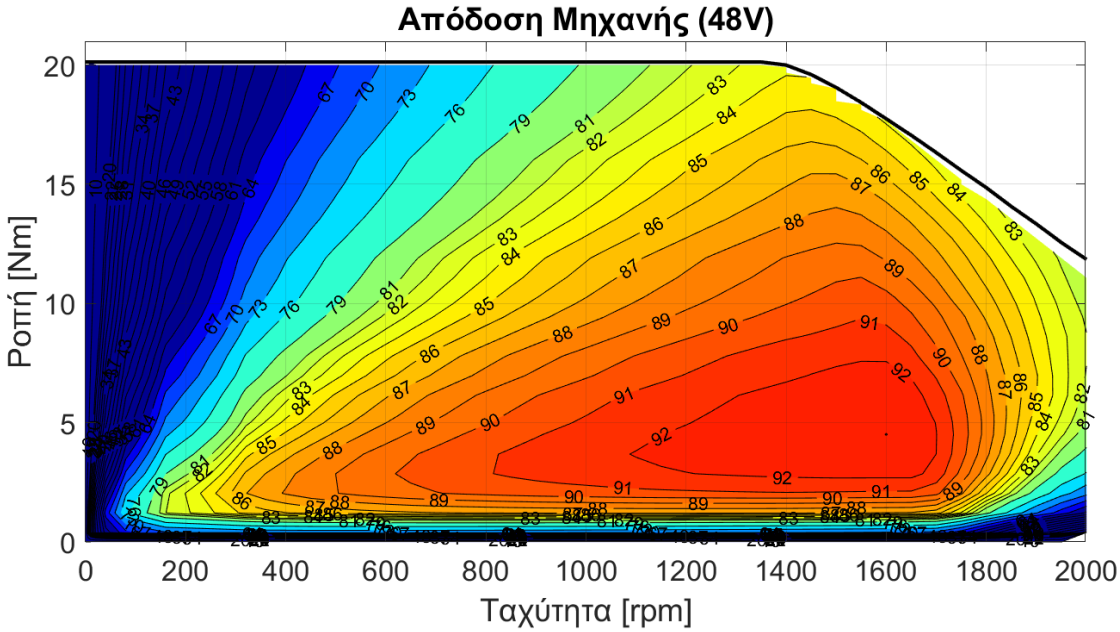
Πίνακας 5.32 – Χαρακτηριστικά επιλεγμένης μηχανής

Στο σχήμα 5.33 παρουσιάζεται η διατομή της επιλεγμένης μηχανής.



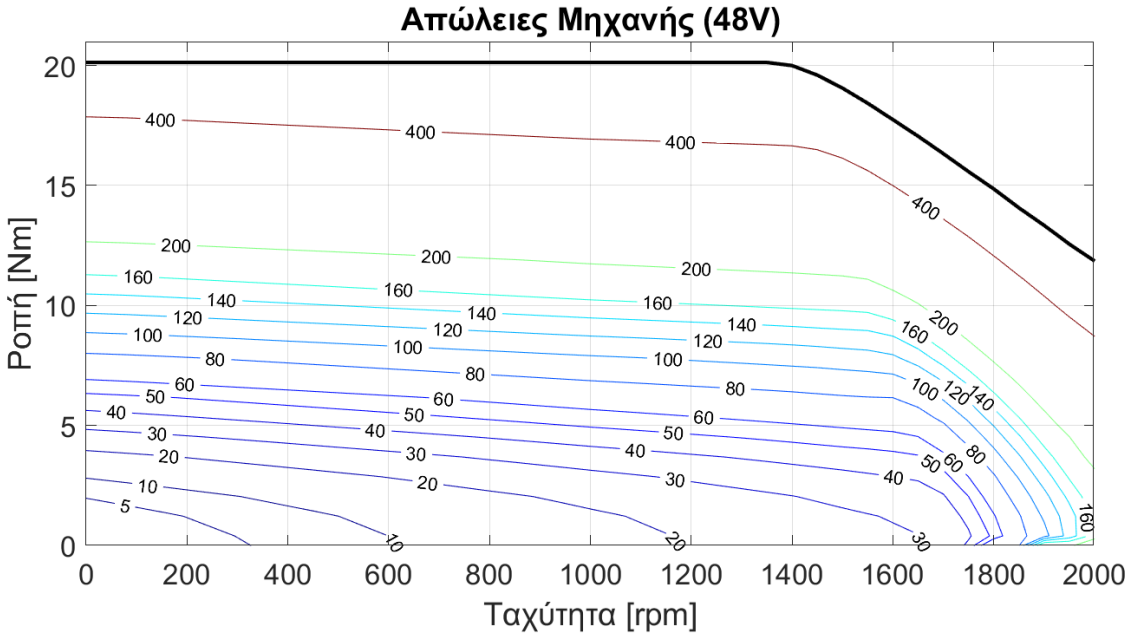
Σχήμα 5.33 – Διατομή τελικής επιλεγμένης μηχανής

Απόδοση και Απώλειες Μηχανής



Σχήμα 5.34 – Χάρτης απόδοσης επιλεγμένης μηχανής

Στο σχήμα 5.34 παρουσιάζεται ο χάρτης απόδοσης της μηχανής. Η μηχανή στη λειτουργία $T = 3{,}333\ Nm$, $N = 1350\ \Sigma A\Lambda$ λειτουργεί στην «καρδιά» του χάρτη απόδοσής της, δηλαδή στην περιοχή εκείνη που παρουσιάζει τη μέγιστη απόδοση από όλες τις λειτουργικές καταστάσεις της. Αυτό εξασφαλίζει τη βέλτιστη χρησιμοποίηση της τάσης εισόδου (μικρότερο ρεύμα) αλλά και τη βέλτιστη χρησιμοποίηση της μηχανής γενικότερα.



Σχήμα 5.35 – Χάρτης απωλειών επιλεγμένης μηχανής

Η ονομαστική ροπή των $3{,}333\ Nm$ είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με τη μέγιστη ροπή των $20{,}39\ Nm$ που μπορεί να πετύχει αυτή η μηχανή με μικρή υπερφόρτιση. Η

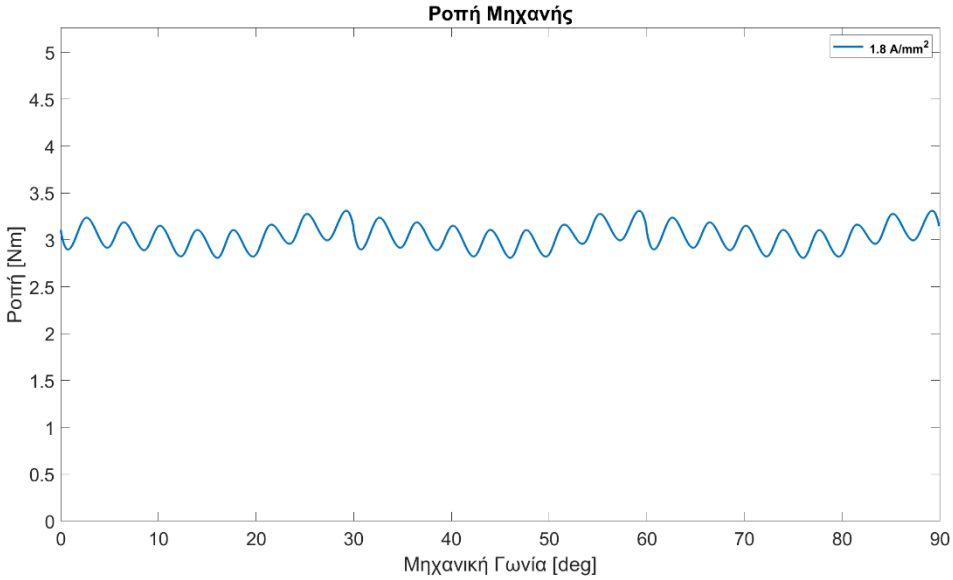
ροπή των $3{,}333\ Nm$ επιτυγχάνεται με πυκνότητα ρεύματος $1{,}8\ A/mm^2$ στις αύλακες του στάτη γεγονός που επιτρέπει την επίτευξη περαιτέρω ροπής χωρίς να υπερφορτιστεί πολύ η μηχανή. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η λειτουργία της μηχανής στα ονομαστικά της μεγέθη να είναι αρκετά αποδοτική.

Στο σχήμα 5.35 παρουσιάζεται ο χάρτης συνολικών απωλειών της μηχανής. Καθώς η μηχανή λειτουργεί μακριά από τη μέγιστη δυνατότητά της, οι απώλειες είναι σημαντικά λιγότερες, γεγονός που οφείλεται κυρίως στις μειωμένες απώλειες χαλκού που προκαλεί η μικρότερη από την ονομαστική πυκνότητα ρεύματος.

Οι συνολικές απώλειες της μηχανής στη λειτουργική κατάσταση $T = 3{,}333\ Nm$, $N = 1350\ \Sigma A\Lambda$ είναι $34{,}90\ W$ εκ των οποίων $19{,}93\ W$ είναι απώλειες πυρήνα και $14{,}97\ W$ είναι απώλειες χαλκού. Η ισότητα των σταθερών απωλειών με τις μεταβλητές που προβλέπεται από τη θεωρία δεν ισχύει, αφού η μηχανή δε λειτουργεί στο σημείο μέγιστης απόδοσης. Αυτό εξηγείται ακόμη και απο το γεγονός ότι η μηχανή λειτουργεί σε σχετικά υψηλή ταχύτητα με χαμηλή πυκνότητα ρεύματος, οπότε είναι αναμενόμενο οι απώλειες πυρήνα να είναι μεγαλύτερες από τις απώλειες χαλκού.

<u>Κυμάτωση Ροπής Μηχανής</u>

Η κυματομορφή της ροπής στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας φαίνεται στο σχήμα 5.36. Η κυμάτωση της ροπής είναι $16{,}34\%$ ενώ η πυκνότητα του ρεύματος στις αύλακες του στάτη είναι $1{,}8\ A/mm^2$.



Σχήμα 5.36 – Κυματομορφή Ροπής συναρτήσει της μηχανικής γωνίας του δρομέα

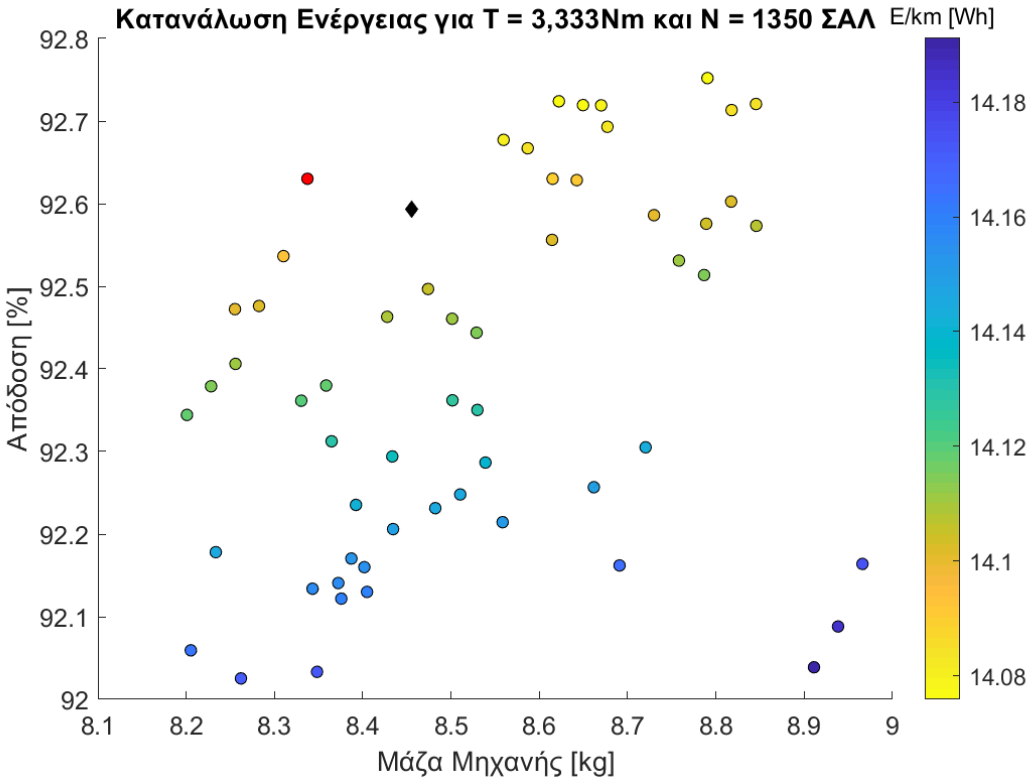
5.3.3.3 Ανάλυση Μικρογεωμετρίας επιλεγμένης μηχανής

Η επιλεγμένη μηχανή προέκυψε ως η βέλτιστη ανάμεσα στις 2.613 μηχανές που αναλύθηκαν. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν αφορούσαν κυρίως τα κύρια χαρακτηριστικά της διατομής των μηχανών, θέτοντας ως κοινές κάποιες παραμέτρους οι οποίες αφορούσαν στοιχειώδεις παραμέτρους της γεωμετρίας των διατομών. Για την περαιτέρω βελτιστοποίηση της μηχανής και την εύρεση μίας ακόμη καλύτερης γεωμετρίας επιλέγεται να μεταβληθούν οι εξής παράμετροι του στάτη:

Παράμετρος	Εξεταζόμενες Τιμές
Λόγος δοντιού – αύλακας στο στάτη	$Tooth2SlotPercentage = [45\ \mathbf{50}\ 55]$
Εύρος μαγνήτη ως ποσοστό του πολικού βήματος	$MagnetDC = [75\ \mathbf{80}\ 85]$
Ποσοστό «σώματος» σιδήρου ως προς το πλάτος των δοντιών	$Yoke2ToothPercentage = [100\ \mathbf{110}\ 120]$
Λόγος εξωτερικής ακτίνας δρομέα προς εξωτερική ακτίνα στάτη	$spl = [0{,}63\ \mathbf{0{,}65}\ 0{,}67]$

Πίνακας 5.37 – Εξεταζόμενες παράμετροι για την ανάλυση μικρογεωμετρίας της επιλεγμένης μηχανής

Στον πίνακα 5.37 σημειώνονται με bold οι τιμές που αντιστοιχούν στην επιλεγμένη μηχανή, η οποία χρησιμοποιείται ως βάση για την μετέπειτα ανάλυση. Συνολικά αναλύονται 81 νέες μηχανές.



Σχήμα 5.38– Γραφική αναπαράσταση Βαθμού Απόδοσης μηχανών στη λειτουργία με T = 3,333Nm και N = 1350 ΣΑΛ

Στο σχήμα 5.38 παρουσιάζεται το διάγραμμα απόδοσης – μάζας για τις 81 μηχανές που αναλύθηκαν. Κάθε σημείο αντιστοιχεί σε μία μηχανή μάζας m και βαθμού απόδοσης η για τη λειτουργία $T = 3{,}333\ Nm$ και $N = 1350\ \Sigma A\Lambda$.

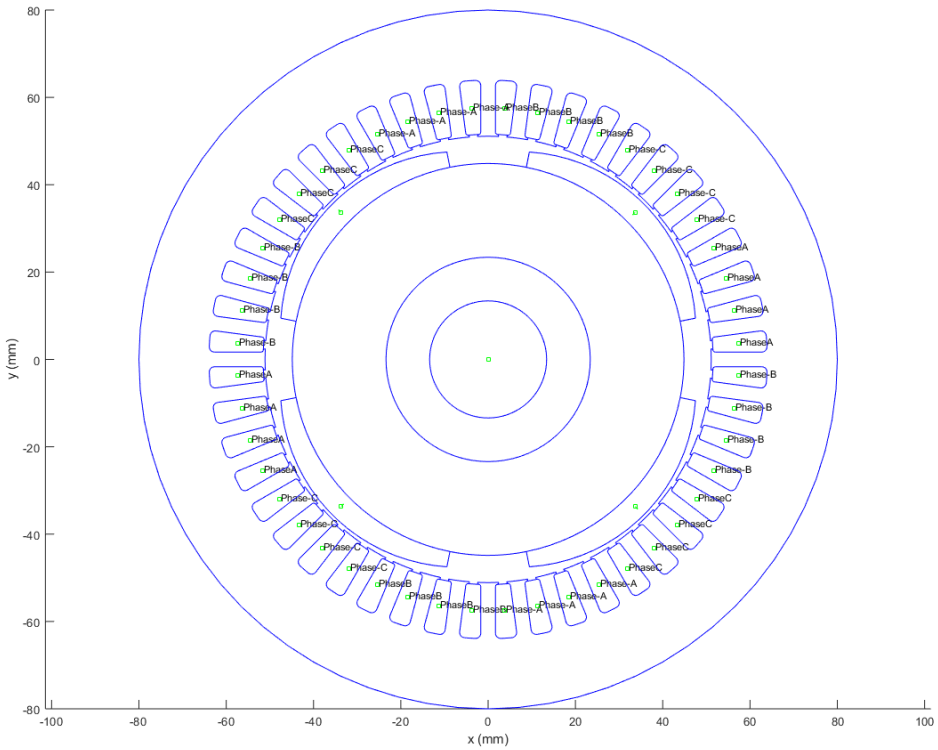
5.3.3.4 Επιλογή Βέλτιστης Μηχανής

Στο σχήμα 5.38 με μαύρο ρόμβο σημειώνεται η αρχική γεωμετρία, ενώ με κόκκινο κύκλο η τελική επιλογή, η οποία θεωρήθηκε η βέλτιστη ανάμεσα στις 81 μηχανές. Η μηχανή που επιλέγεται ως βέλτιστη έχει μάζα $8{,}34\ kg$ και έχει βαθμό απόδοσης $92{,}63\%$ στην λειτουργία που θεωρήθηκε ονομαστική. Τα χαρακτηριστικά της επιλεγμένης μηχανής παρουσιάζονται στον πίνακα 5.39.

Παράμετρος	Επιλεγόμενες Τιμές
Λόγος δοντιού – αύλακας στο στάτη	$Tooth2SlotPercentage = 50$
Εύρος μαγνήτη ως ποσοστό του πολικού βήματος	$MagnetDC = 75$
Ποσοστό «σώματος» σιδήρου ως προς το πλάτος των δοντιών	$Yoke2ToothPercentage = 120$
Λόγος εξωτερικής ακτίνας δρομέα προς εξωτερική ακτίνα στάτη	$spl = 0{,}63$

Πίνακας 5.39 – Επιλεγόμενες παράμετροι για την τελική μηχανή

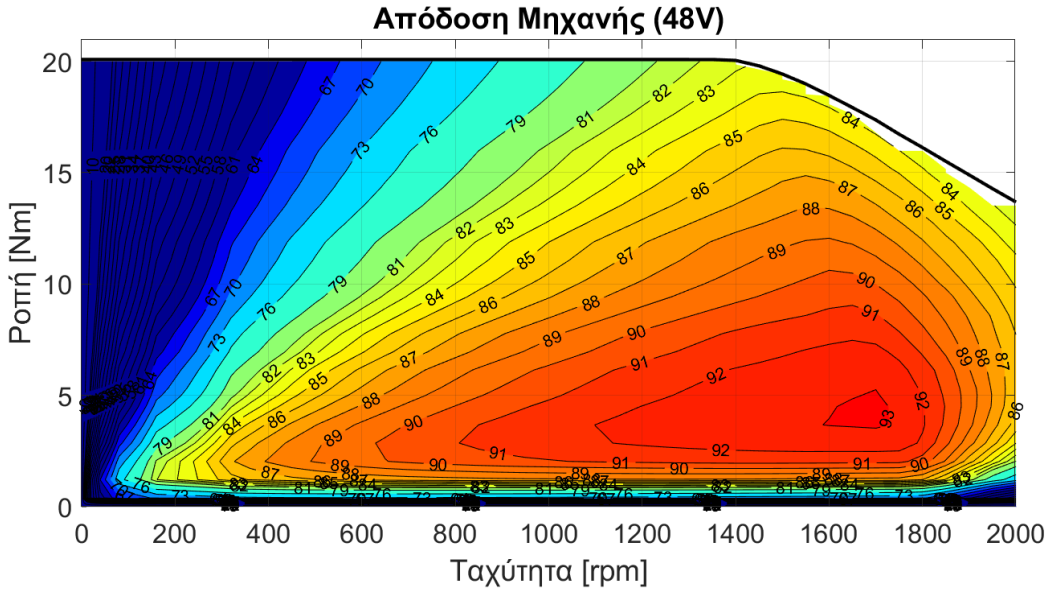
Παρατηρείται μία μικρή βελτίωση από την αρχική στην τελική μηχανή. Η βελτιστοποίηση που έγινε αφορά κυρίως τη μείωση της μάζας κατά $1{,}41\%$ με ταυτόχρονη αύξηση του βαθμού απόδοσης στην ονομαστική λειτουργία κατά $0{,}04\%$.



Σχήμα 5.40 – Διατομή τελικής επιλεγμένης μηχανής

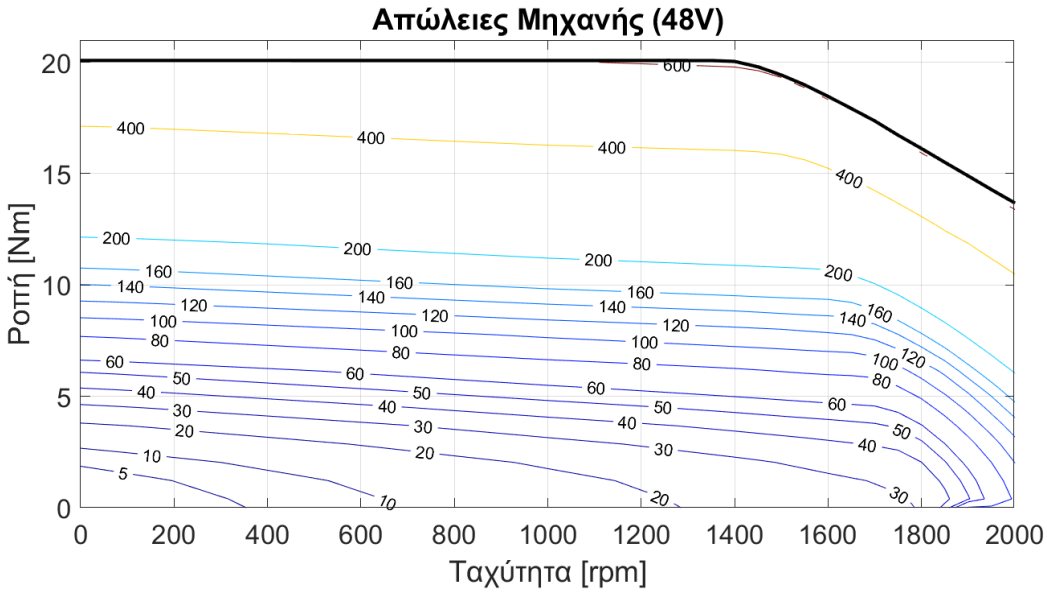
Στο σχήμα 5.40 παρουσιάζεται η διατομή της επιλεγμένης μηχανής.

Απόδοση και Απώλειες Μηχανής



Σχήμα 5.41 – Χάρτης απόδοσης επιλεγμένης μηχανής

Για την παραπάνω μηχανή και σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3, παράγεται ο χάρτης απόδοσης της, ο οποίος παρουσιάζεται στο σχήμα 5.41. Ο χάρτης απόδοσης παράγεται για DC τάση $48\ V$ στην είσοδο του αντιστροφέα. Στο σχήμα 5.42 παρουσιάζεται ο χάρτης συνολικών απωλειών της μηχανής. Όπως και η αρχική μηχανή, η επιλεγμένη μηχανή λειτουργεί μακριά από τη μέγιστη δυνατότητά της. Οι απώλειες είναι σημαντικά λιγότερες, γεγονός που οφείλεται κυρίως στις μειωμένες απώλειες χαλκού που προκαλεί η μικρότερη από την ονομαστική πυκνότητα ρεύματος.



Σχήμα 5.42 – Χάρτης απωλειών επιλεγμένης μηχανής

Οι συνολικές απώλειες της μηχανής στη λειτουργική κατάσταση $T = 3{,}333\ Nm$, $N = 1350\ \Sigma A\Lambda$ είναι $39{,}32\ W$ εκ των οποίων $17{,}87\ W$ είναι απώλειες πυρήνα και $19{,}70\ W$ είναι απώλειες χαλκού. Η ισότητα των σταθερών απωλειών με τις

μεταβλητές που προβλέπεται από τη θεωρία δεν ισχύει ακριβώς, αφού η μηχανή δε λειτουργεί στο σημείο μέγιστης απόδοσης.

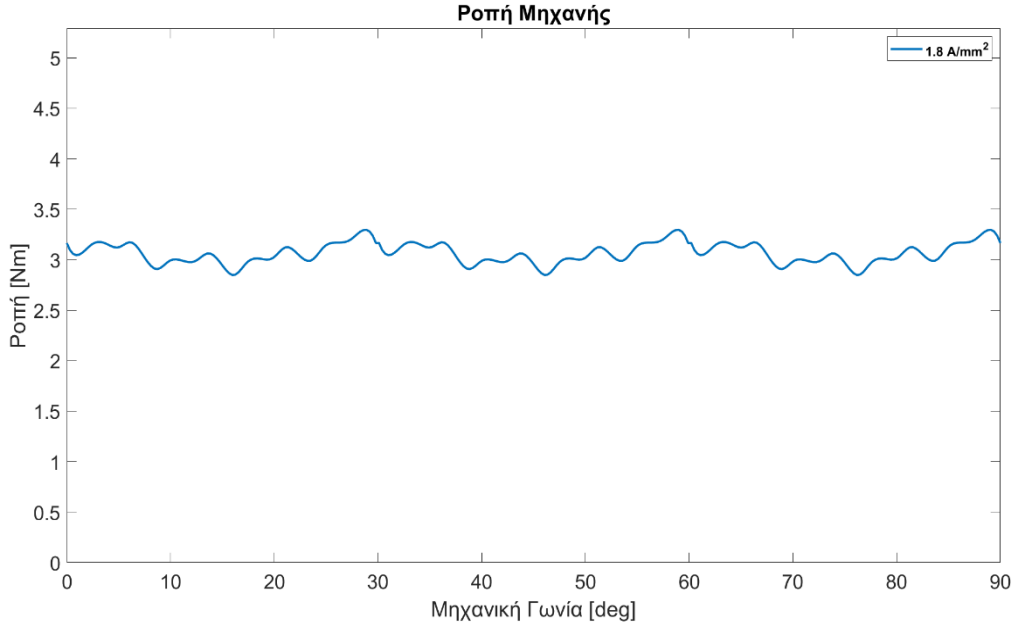
Σημειώνεται πως η συγκεκριμένη μηχανή δεν αξιοποιείται κατά το βέλτιστο δυνατό τρόπο, αφού ο πυρήνας της «καρδιάς» της απόδοσης εμφανίζεται για υψηλότερο αριθμό στροφών και μεγαλύτερη ροπή. Στον πίνακα 5.43 παρουσιάζονται ενδεικτικά το σημείο λειτουργίας για την προς μελέτη εφαρμογή καθώς και το βέλτιστο σημείο που θα μπορούσε ιδανικά η μηχανή να λειτουργήσει:

	Προδιαγραφή	Βέλτιστη λειτουργία	Διαφορά
Ροπή	3,333 Nm	4,496 Nm	-25,87%
Ταχύτητα	1350 ΣΑΛ	1650 ΣΑΛ	-18,18%
Απόδοση	92,63%	93,07%	-0,47%

Πίνακας 5.43 – Σύγκριση βέλτιστου με επιθυμητό σημείο λειτουργίας

Από τις μηχανές που προέκυψαν από την ανάλυση μικρογεωμετρίας, καμία δε λειτουργεί ακριβώς στην «καρδιά» του χάρτη απόδοσης, οπότε η επιλογή έγινε με κριτήρια τη μάζα και την απόδοση, αλλά και την εγγύτητα του σημείου λειτουργίας στην «καρδία» του χάρτη απόδοσης.

<u>Κυμάτωση Ροπής Μηχανής</u>



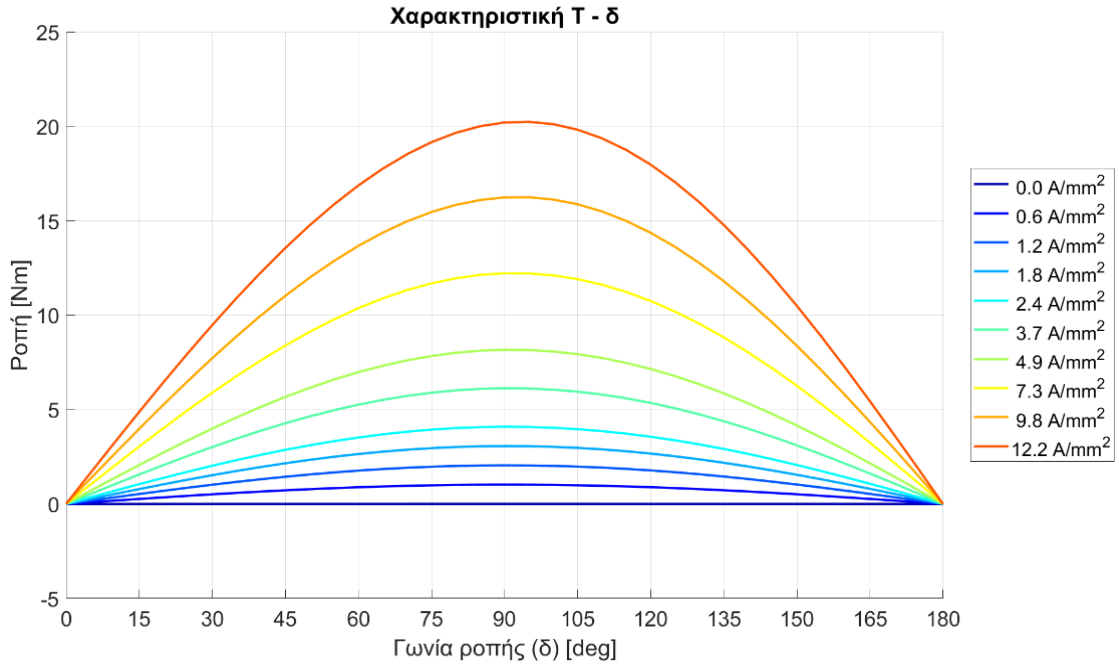
Σχήμα 5.44 – Κυματομορφή Ροπής συναρτήσει της μηχανικής γωνίας του δρομέα

Η κυματομορφή της ροπής στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας φαίνεται στο σχήμα 5.44. Η κυμάτωση της ροπής είναι $14{,}49\%$ ενώ η πυκνότητα του ρεύματος στις αύλακες του στάτη είναι $1{,}8\ A/mm^2$.

Η βελτίωση στη κυμάτωση της ροπής μέσω της μεταβολής παραμέτρων μικρογεωμετρίας, για την μόνιμη κατάσταση, είναι εμφανής συγκρίνοντας τις κυματομορφές στα σχήματα 5.36 και 5.44.

Χαρακτηριστική Καμπύλη Ροπής – Γωνίας Ροπής (Τ – δ)

Στο σχήμα 5.45 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες ροπής – γωνίας ροπής (Τ – δ) για διαφορετικές πυκνότητες ρεύματος στις αύλακες του στάτη.

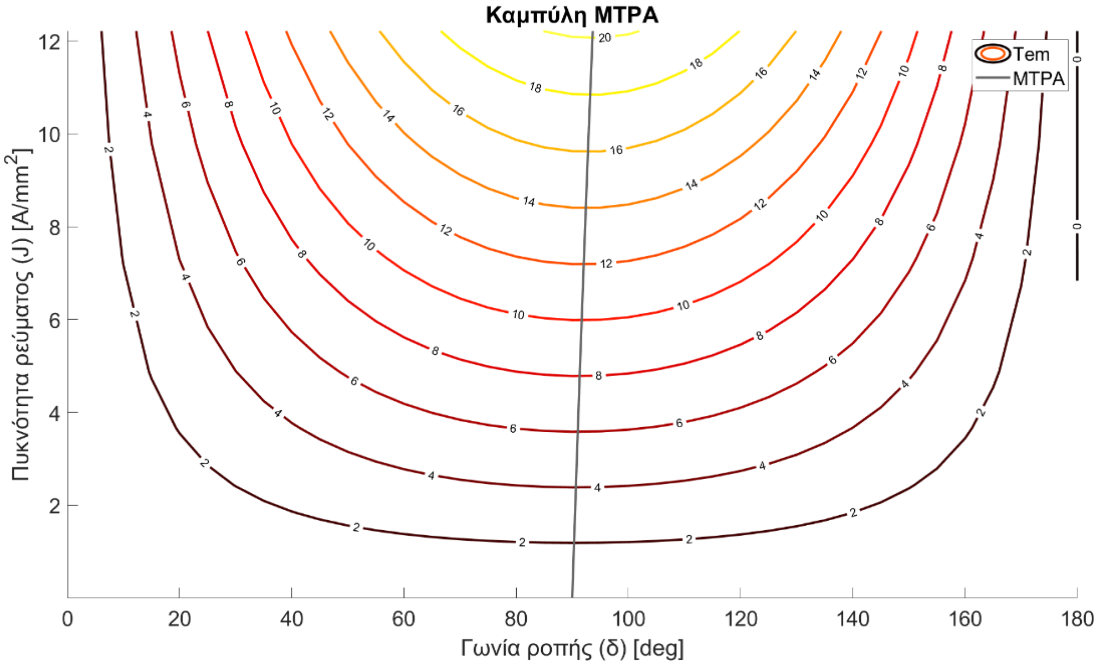


Σχήμα 5.45 – Χαρακτηριστικές καμπύλες Τ – δ

Η ονομαστική ροπή των $3{,}333\ Nm$ επιτυγχάνεται για $J = 1{,}8\ {}^{A}/_{mm^2}$. Η μέγιστη ροπή που απαιτείται στην εκκίνηση, δηλαδή αυτή των $11{,}28\ Nm$ επιτυγχάνεται με μία μικρή υπερφόρτιση η οποία είναι εφικτή, καθώς οι μηχανές επιφανειακών μαγνητών είναι ανεκτικές σε υπερφορτίσεις για μικρό χρονικό διάστημα.

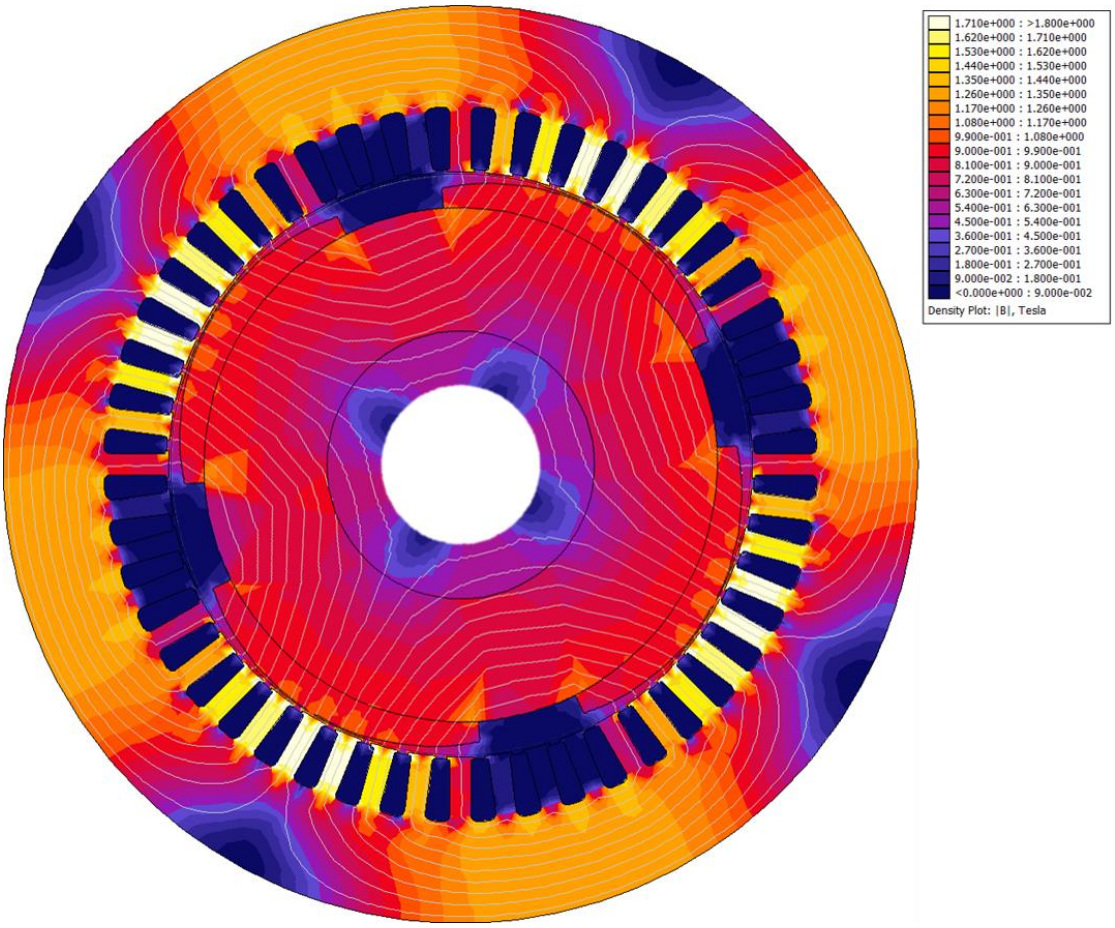
Στο σχήμα 5.46 παρουσιάζεται με γκρι χρώμα η καμπύλη μέγιστης ροπής ανά τιμή ρεύματος – “Maximum Torque Per Ampere” (MTPA), η οποία δείχνει την τιμή της γωνίας ροπής η οποία μεγιστοποιεί τη ροπή για δεδομένη πυκνότητα ρεύματος.

Η μηχανή παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά στην καμπύλη MTPA με την επιλεγμένη μηχανή της παραγράφου 5.3.2.4 όπου με την αύξηση της πυκνότητας ρεύματος το σημείο μεγιστοποίησης της ροπής μετακινείται προς μεγαλύτερες γωνίες ροπής από την αναμενόμενη των $90°$. Οι αιτίες για τη συμπεριφορά αυτή βρίσκονται στο φαινόμενο του κορεσμού και στη μη κυλινδρικότητα του δρομέα, όπως εξηγήθηκαν στην παράγραφο 5.3.2.4.



Σχήμα 5.46 – Καμπύλη MTPA

Πεδίο στο Εσωτερικό της Μηχανής

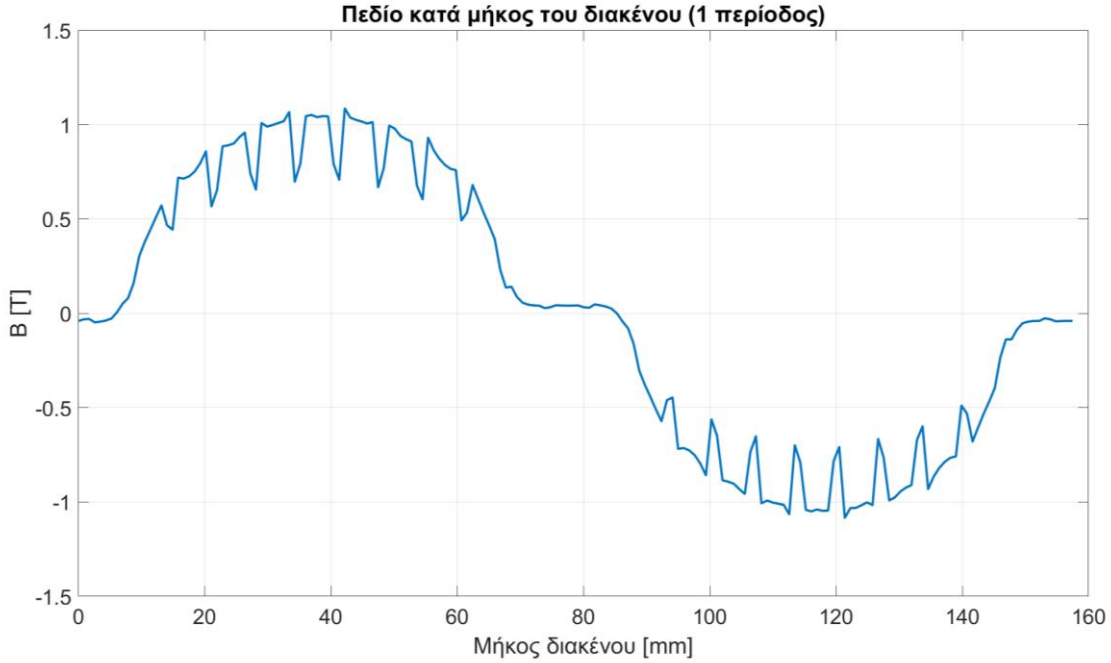


Σχήμα 5.47 – Πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής για ονομαστικό φορτίο

Στο σχήμα 5.47 παρουσιάζεται το πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής στην ονομαστική κατάσταση λειτουργίας.

Το πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής δεν ξεπερνά τα 1,8T, γεγονός που σημαίνει ότι η μηχανή δε λειτουργεί σε κανένα σημείο της στον κορεσμό. Υψηλότερες τιμές του πεδίου συγκεντρώνονται στα δόντια του στάτη που βρίσκονται ακριβώς πάνω από τους μαγνήτες, γεγονός λογικό αφού από εκεί περνά η περισσότερη ροή. Το αριστερότερο δόντι πάνω από κάθε μαγνήτη παρουσιάζει μεγαλύτερη πυκνότητα μαγνητικής ροής από το αντίστοιχο δεξιότερο, πράγμα που δικαιολογεί και δικαιολογείται από την ύπαρξη ροπής στη μηχανή.

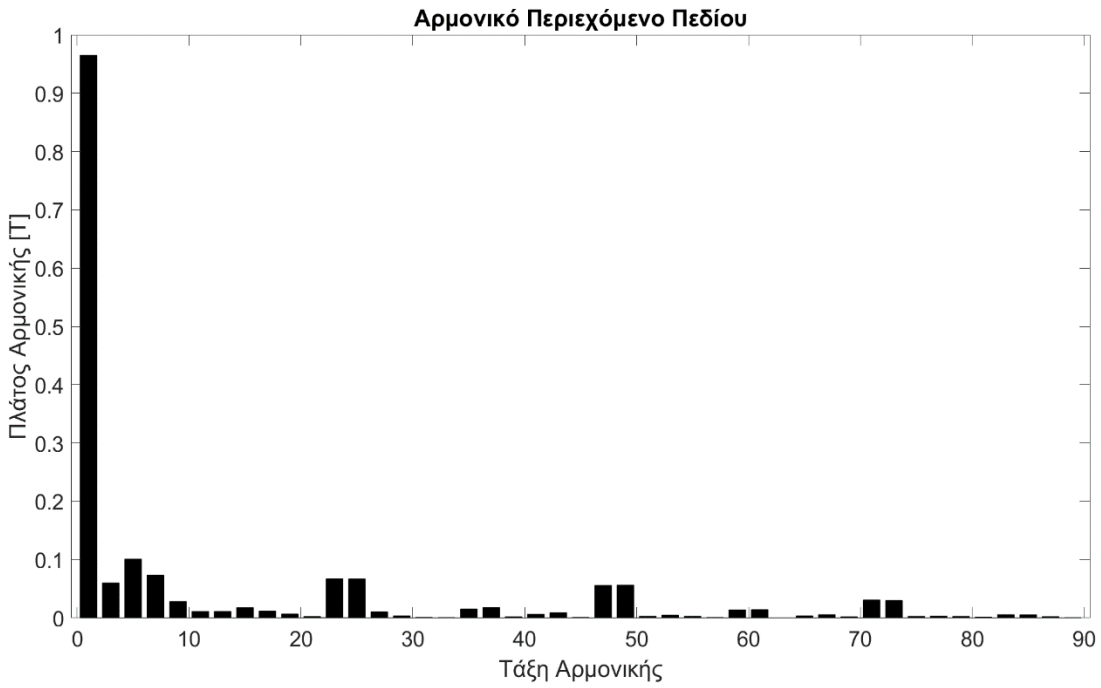
Στο Σχήμα 5.48 παρουσιάζεται η ακτινική συνιστώσα της έντασης του πεδίου κατά μήκος του διακένου. Παρουσιάζεται μία περίοδος του πεδίου, δηλαδή το πεδίο που αντιστοιχεί σε μήκος διακένου που καλύπτει ένα ζεύγος πόλων. Το πεδίο παρουσιάζει κάποια ημιτονικότητα έχοντας πλήθος αρμονικών συνιστωσών. Αυτές οι αρμονικές συνιστώσες οφείλονται στους ίδιους παράγοντες: το διανεμημένο τύλιγμα και την αλληλουχία δοντιού – αύλακας στο στάτη, όπως εξηγήθηκε προηγουμένως.



Σχήμα 5.48 – Πεδίο στο διάκενο της μηχανής κατά μήκος αυτού (απεικόνιση μίας περιόδου)

Στο σχήμα 5.49 φαίνεται το αρμονικό περιεχόμενο του πεδίου, όπως αυτό προέκυψε από ανάλυση Fourier της κυματομορφής του σχήματος 5.48.

Η αρμονική συνιστώσα που κυριαρχεί είναι η θεμελιώδης, ενώ οι υπόλοιπες αρμονικές δεν παρουσιάζουν συγκρίσιμα με της αρμονικής πλάτη. Αυτό είναι και ένα από τα πλεονεκτήματα από τη χρήση κατανεμημένου τυλίγματος, το οποίο βοηθά σημαντικά στην ημιτονικότητα του πεδίου. Από το πεδίο απουσιάζουν οι ζυγές αρμονικές, καθώς υπάρχει περιοδικότητα ημίσεος κύματος.



Σχήμα 5.49 – Αρμονικό περιεχόμενο πεδίου στο διάκενο της μηχανής

<u>Σύγκριση Μηχανών</u>

Στον πίνακα 5.50 παρουσιάζεται η σύγκριση της τελικής γεωμετρίας με την αρχική. Αξιολογούνται ο βαθμός απόδοσης, η μάζα των μηχανών και η κυμάτωση της ροπής για $T = 3{,}333\ Nm$. Η μεγαλύτερη βελτίωση γίνεται στην κυμάτωση ροπής, η οποία μειώθηκε, αλλά παραμένει υψηλή σε σχέση με την υποψήφια μηχανή για λειτουργία χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων.

	Αρχική Επιλογή	Τελική Επιλογή	Διαφορά
Βαθμός Απόδοσης	92,59%	92,63%	+0,043%
Μάζα Μηχανής	8,456 kg	8,34 kg	-1,41%
Κυμάτωση Ροπής	16,34%	14,49%	-11,32%

Πίνακας 5.50 – Σύγκριση μηχανών

5.3.4 Τελική Επιλογή Μηχανής για Χρήση στο Όχημα

Στον πίνακα 5.51 παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ των δύο υποψήφιων μηχανών όπως αυτές προέκυψαν από την ανάλυση στις παραγράφους 5.3.2 και 5.3.3.

	Οκταπολική (5.3.2)	Τετραπολική (5.3.3)	Διαφορά
Βαθμός Απόδοσης	92,69%	92,63%	-0,06%
Μάζα Μηχανής	12,90 kg	8,34 kg	-35,34%
Κυμάτωση Ροπής	6,3%	14,49%	+130,0%

Πίνακας 5.51 – Σύγκριση μηχανών

Η τετραπολική μηχανή φαίνεται να υπερτερεί της οκταπολικής, καθώς έχει σημαντικά μικρότερη μάζα με σχεδόν ίδιο βαθμό απόδοσης. Στην τελική απόφαση για τη χρήση κάποιας από τις δύο μηχανές θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν η μάζα και η απόδοση των μηχανολογικών μερών του συστήματος κίνησης. Καθώς δεν υπάρχουν ακόμη συγκεκριμένα μηχανολογικά μέρη, γίνονται οι εξής ασφαλείς υποθέσεις:

- Η μάζα των κιβωτίων (ή πλανητικών γραναζιών) που θα χρησιμοποιηθούν σε κάθε περίπτωση θεωρείται ίδια (και αμελητέα) και στις δύο περιπτώσεις.
- Ο βαθμός απόδοσης του κιβωτίου ταχυτήτων 1:1 λαμβάνεται ίσος με 99%, ενώ του κιβωτίου ταχυτήτων 1:3 λαμβάνεται ίσος με 97%. Αντί για κιβωτίου λόγου 1:1 θα μπορούσε ο άξονας της μηχανής να συνδεθεί απευθείας με τη ζάντα του οχήματος, στην οποία περίπτωση ο βαθμός απόδοσης θα ήταν 100%. Η υπόθεση για το βαθμό απόδοσης του συστήματος μετάδοσης με λόγο 3:1 βασίζεται σε εμπορικά διαθέσιμα συστήματα πλανητικών γραναζιών, ικανά να αποδώσουν την απαιτούμενη ροπή.

Με βάση τις παραπάνω υποθέσεις συγκρίνονται οι δύο μηχανές ως συστήματα κίνησης με το «Σύστημα 1» να αφορά την οκταπολική μηχανή με το κιβώτιο ταχυτήτων λόγου 1:1 και το «Σύστημα 2» να αφορά την τετραπολική μηχανή με το κιβώτιο ταχυτήτων λόγου 3:1.

	Σύστημα 1	Σύστημα 2	Διαφορά
Βαθμός Απόδοσης	91,76%	89,85%	-2,08%
Μάζα Μηχανής	12,90 kg	8,34 kg	-35,34%
Κυμάτωση Ροπής	6,3%	14,49%	+130,0%

Πίνακας 5.52 – Σύγκριση μηχανών

Σύμφωνα με την παραπάνω σύγκριση, επιλέγεται το «Σύστημα 1» για χρήση στο όχημα. Μπορεί να ζυγίζει $4{,}56\,kg$ πιο πολύ, αλλά η μάζα αυτή είναι αμελητέα μπροστά στη συνολική μάζα του οχήματος. Το κέρδος από τον αυξημένο βαθμό απόδοσης είναι σημαντικό, αφού θα χρησιμοποιηθεί σε διαγωνισμό εξοικονόμησης ενέργειας. Τέλος η μικρή κυμάτωση ροπής που παρουσιάζει, δε θα προκαλέσει κανένα πρόβλημα στα μηχανικά μέρη του οχήματος, ενώ θα αφήσει μεγαλύτερες

ανοχές κατά τη σχεδίασή τους. Τα παραπάνω επιβεβαιώνονται και από την ενεργειακή ανάλυση που ακολουθεί.

Ενεργειακή Σύγκριση Συστημάτων

Σύμφωνα με την παράγραφο 4.4.8, για την σύγκριση μεταξύ των δύο υποψήφιων συστημάτων κίνησης χρησιμοποιείται ενεργειακή ανάλυση, μέσω της οποίας αξιολογείται η απαιτούμενη καταναλισκόμενη ενέργεια που θα απαιτούσε το όχημα, για κάθε διαμόρφωση συστήματος κίνησης, λαμβάνοντας υπ' όψιν τόσο τη μάζα του κινητήρα όσο και την απόδοση του συστήματος. Συγκεκριμένα, για τις δύο υποψήφιες τοπολογίες κινητήριου συστήματος, η συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια θεωρώντας την μάζα του υπόλοιπου οχήματος $130\,kg$ και του οδηγού $70\,kg$, σύμφωνα με τις σχέσεις (4.20) - (4.29):

- Σύστημα 1:

$$E_{\varepsilon\iota\sigma\acute{o}\delta o\upsilon,1}{}^{(tot)} = \frac{1}{0{,}9176} \cdot (212{,}90 \cdot E^{(\mu\acute{\alpha}\zeta\alpha\ \alpha\nu\acute{\alpha}\ kg)} + E^{(c_d)}) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_{\varepsilon\iota\sigma\acute{o}\delta o\upsilon,1}{}^{(tot)} = 232{,}02 \cdot E^{(\mu\acute{\alpha}\zeta\alpha\ \alpha\nu\acute{\alpha}\ kg)} + 1{,}090 \cdot E^{(c_d)} \tag{5.1}$$

- Σύστημα 2:

$$E_{\varepsilon\iota\sigma\acute{o}\delta o\upsilon,2}{}^{(tot)} = \frac{1}{0{,}8985} \cdot (208{,}34 \cdot E^{(\mu\acute{\alpha}\zeta\alpha\ \alpha\nu\acute{\alpha}\ kg)} + E^{(c_d)}) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_{\varepsilon\iota\sigma\acute{o}\delta o\upsilon,2}{}^{(tot)} = 231{,}875 \cdot E^{(\mu\acute{\alpha}\zeta\alpha\ \alpha\nu\acute{\alpha}\ kg)} + 1{,}113 \cdot E^{(c_d)} \tag{5.2}$$

Οπότε:

$$\Delta E_{1-2} = E_{\varepsilon\iota\sigma\acute{o}\delta o\upsilon,1}{}^{(tot)} - E_{\varepsilon\iota\sigma\acute{o}\delta o\upsilon,2}{}^{(tot)} = 0{,}145 \cdot E^{(\mu\acute{\alpha}\zeta\alpha\ \alpha\nu\acute{\alpha}\ kg)} - 0{,}023 \cdot E^{(c_d)} \tag{5.3}$$

Στη συνηθέστερη λειτουργία, όταν το όχημα κινείται σε ευθεία με την ονομαστική του ταχύτητα:

$$E^{(\mu\acute{\alpha}\zeta\alpha\ \alpha\nu\acute{\alpha}\ kg)} = T_{\tau\rho o\chi o\acute{\upsilon}}{}^{(\mu\acute{\alpha}\zeta\alpha\ \alpha\nu\acute{\alpha}\ kg)} \cdot \omega_n \cdot \frac{d}{\bar{u}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E^{(\mu\acute{\alpha}\zeta\alpha\ \alpha\nu\acute{\alpha}\ kg)} = [g \cdot (sin\theta + \mu \cdot cos\theta) + a] \cdot R_{\tau\rho o\chi o\acute{\upsilon}} \cdot \omega_n \cdot \frac{d}{\bar{u}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E^{(\mu\acute{\alpha}\zeta\alpha\ \alpha\nu\acute{\alpha}\ kg)} = \left[\left(9{,}806\frac{m}{s^2}\right) \cdot (sin0° + 0{,}012 \cdot cos0°) + 0\,{}^{m}/_{s^2}\right] \cdot (0{,}20955m) \cdot \omega_n \cdot \frac{d}{\bar{u}}$$

$$\Rightarrow E^{(\mu\acute{\alpha}\zeta\alpha\ \alpha\nu\acute{\alpha}\ kg)} = 0{,}02466 \cdot \omega_n \cdot \frac{d}{\bar{u}} \tag{5.4}$$

Και:

$$E^{(c_d)} = T_{\tau\rho o\chi o\acute{\upsilon}}{}^{(c_d)} \cdot \omega_n \cdot \frac{d}{\bar{u}} = \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot R_{\tau\rho o\chi o\acute{\upsilon}} \cdot \omega_n \cdot \frac{d}{\bar{u}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E^{(c_d)} = \frac{1}{2} \cdot 0{,}3 \cdot 1{,}225\frac{kg}{m^3} \cdot \left(9{,}722\frac{m}{s}\right)^2 \cdot (1{,}25\,m^2) \cdot (0{,}20955m) \cdot \omega_n \cdot \frac{d}{\bar{u}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E^{(c_d)} = 4{,}5492 \cdot \omega_n \cdot \frac{d}{\bar{u}} \tag{5.5}$$

Οπότε, η εξίσωση (5.11) με την αντικατάσταση των (5.12) και (5.13) γίνεται:

$$\Delta E_{1-2} = 0{,}145 \cdot E^{(\mu\acute{\alpha}\zeta\alpha\ \alpha\nu\acute{\alpha}\ kg)} - 0{,}023 \cdot E^{(c_d)} = (0{,}145 \cdot 0{,}02466 - 0{,}023 \cdot 4{,}5492) \cdot \omega_n \cdot \frac{d}{\bar{u}}$$

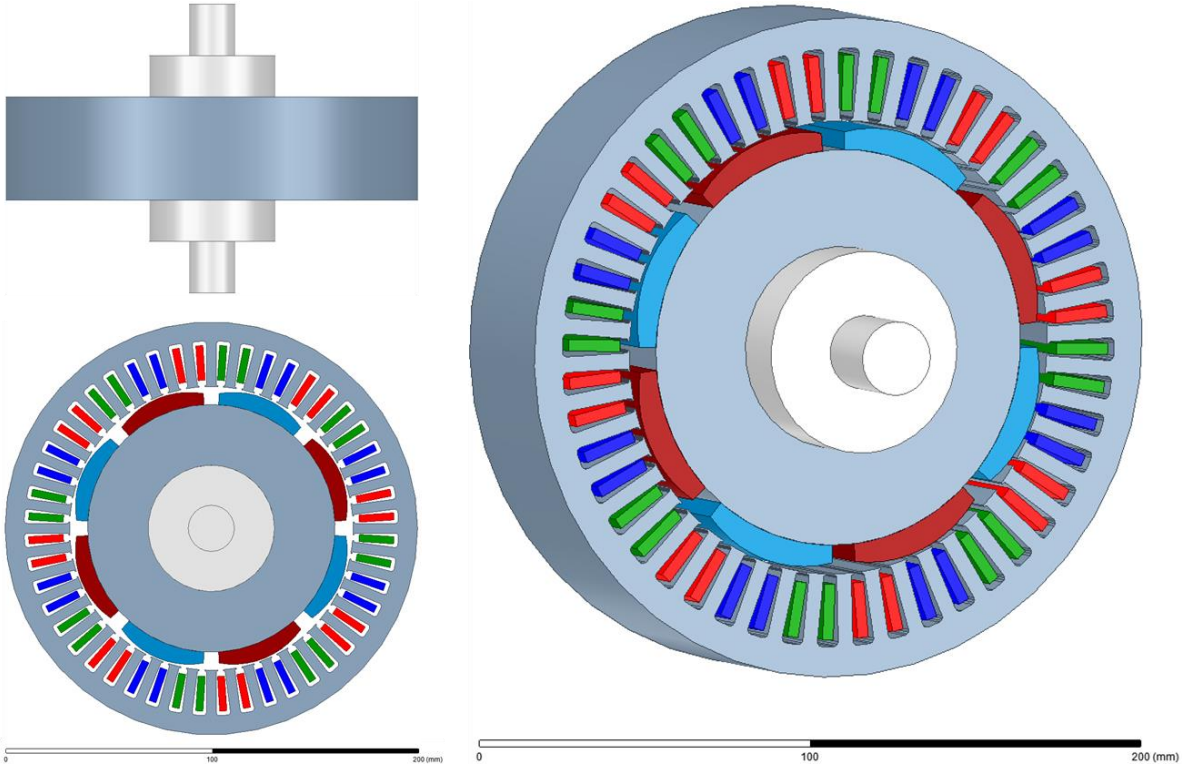
$$\Rightarrow \Delta E_{1-2} = -0{,}1011 \cdot \omega_n \cdot \frac{d}{\bar{u}} < 0 \qquad (5.6)$$

Τελικά, από την εξίσωση (5.14) διαπιστώνεται ότι η χρήση του «Συστήματος 1» είναι η πλέον συμφέρουσα, αφού οι κυριότερες απώλειες ενέργειας κατά την κίνηση με σταθερή ταχύτητα είναι οι αεροδυναμικές απώλειες, οι οποίες είναι ανεξάρτητες της μάζας και ο βαθμός απόδοσης του συστήματος παίζει μεγαλύτερο ρόλο.

Τρισδιάστατη Απεικόνιση Επιλεγμένης Μηχανής

Για την καλύτερη απεικόνιση των χαρακτηριστικών της μηχανής, στο σχήμα 5.51 παρουσιάζεται η τρισδιάστατη απεικόνιση της μηχανής. Το σχέδιο έγινε στο λογισμικό ANSYS.

Στο Σχήμα 5.53 με κόκκινο χρώμα σημειώνονται τα τυλίγματα της φάσης Α, με πράσινο χρώμα τα τυλίγματα της φάσης Β και με μπλε χρώμα τα τυλίγματα της φάσης C. Ακόμη, με βαθύ κόκκινο χρώμα σημειώνονται οι βόρειοι πόλοι των μαγνητών και με ανοιχτό μπλέ οι νότιοι πόλοι των μαγνητών.



Σχήμα 5.53 – Τρισδιάστατη απεικόνιση επιλεγμένης μηχανής

5.4 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

5.4.1 Εισαγωγή

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης, γίνονται δύο παρατηρήσεις όσον αφορά την επίδραση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών των μηχανών στην επίδοση και απόδοσή τους. Συγκεκριμένα, παρατηρείται έντονη επίδραση του αριθμού των ενεργών εν σειρά τυλιγμάτων της μηχανής στο χάρτη απόδοσής της και του αριθμού των πόλων στην απόδοσή της.

5.4.2 Επίδραση αριθμού ενεργών εν σειρά ελιγμάτων στο χάρτη απόδοσης της μηχανής

Από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, φαίνεται πως ο αριθμός των ελιγμάτων στις αύλακες του στάτη επηρεάζει σημαντικά την απόδοση της μηχανής.

Πρώτον, με την αύξηση του αριθμού των ελιγμάτων (θεωρώντας σταθερή τη διατομή τους και το συντελεστή πληρότητας αύλακος) αυξάνεται γραμμικά η ωμική αντίσταση του στάτη, μειώνεται το ρεύμα που διαρρέει τους αγωγούς, και άρα μεταβάλλονται οι απώλειες χαλκού για τη διατήρηση μίας συγκεκριμένης πυκνότητας ρεύματος.

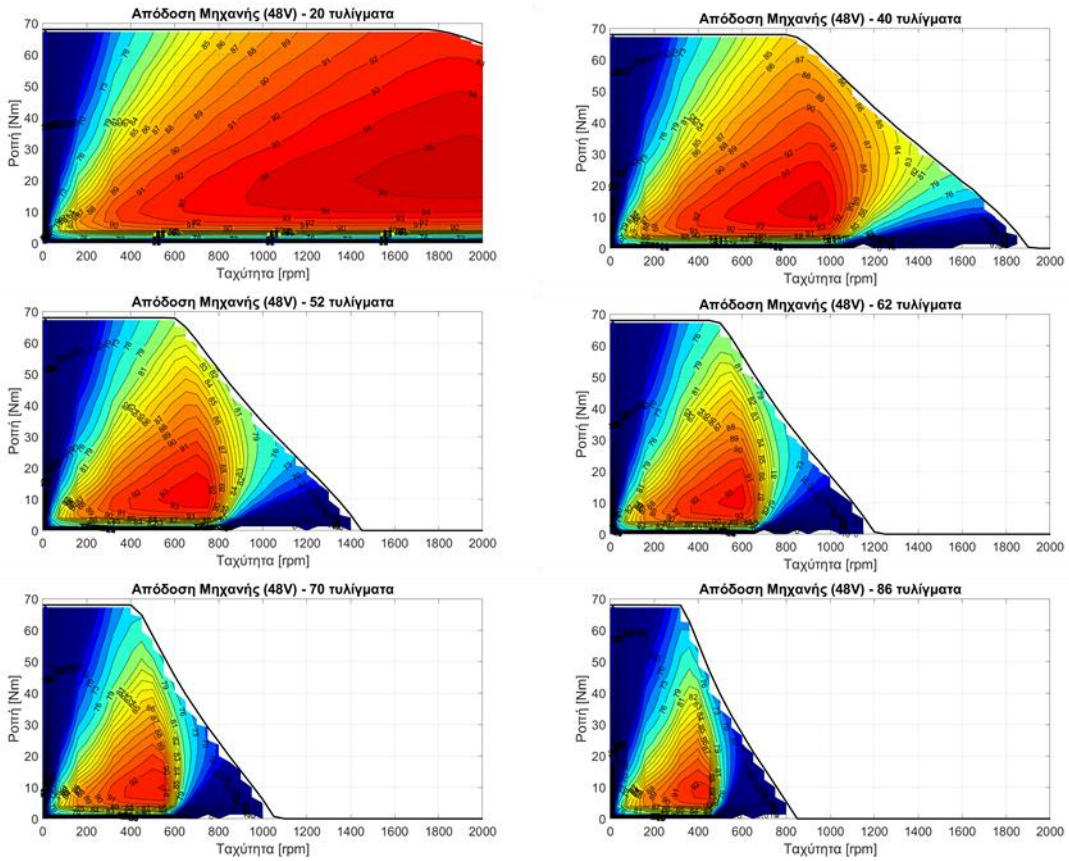
Δεύτερον, με την αύξηση του αριθμού των ελιγμάτων, μεταφέρεται η «καρδιά» του χάρτη απόδοσης (τα σημεία (T, N) στα οποία η μηχανή έχει το μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης) σε μικρότερες ταχύτητες. Αυτό συμβαίνει καθώς μειώνεται η ονομαστική ταχύτητα της μηχανής (η ταχύτητα στην οποία η μηχανή φτάνει για πρώτη φορά το όριο τάσης).

Η τάση που αναπτύσσεται στα τυλίγματα είναι ανάλογη με τον αριθμό τους, με αποτέλεσμα το όριο τάσης της μηχανής να επιτυγχάνεται σε χαμηλότερο αριθμό στροφών και η μηχανή να εισέρχεται σε εξασθένιση πεδίου νωρίτερα.

Για την καλύτερη απεικόνιση του φαινομένου, παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.55 οι χάρτες απόδοσης της μηχανής της οποίας τα χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.54, για διαφορετικό αριθμό τυλιγμάτων.

Παράμετρος	Τιμή
Πόλοι	$P = 8$
Αύλακες ανά πόλο και φάση	$q = 2$
Πάχος διακένου	$ag = 0{,}7\ mm$
Ύψος μαγνήτη	$H_{mag} = 8\ mm$
Εύρος μαγνήτη	$\theta_{mag} = 36°$
Εξωτερική ακτίνα στάτη	$R_{so} = 100\ mm$
Εξωτερική ακτίνα δρομέα	$R_{ro} = 68\ mm$
Ενεργό μήκος	$l = 50\ mm$

Πίνακας 5.54 – Χαρακτηριστικά επιλεγμένης μηχανής



Σχήμα 5.55 – Μεταβολή του χάρτη απόδοσης της μηχανής με τη μεταβολή του αριθμού των τυλιγμάτων

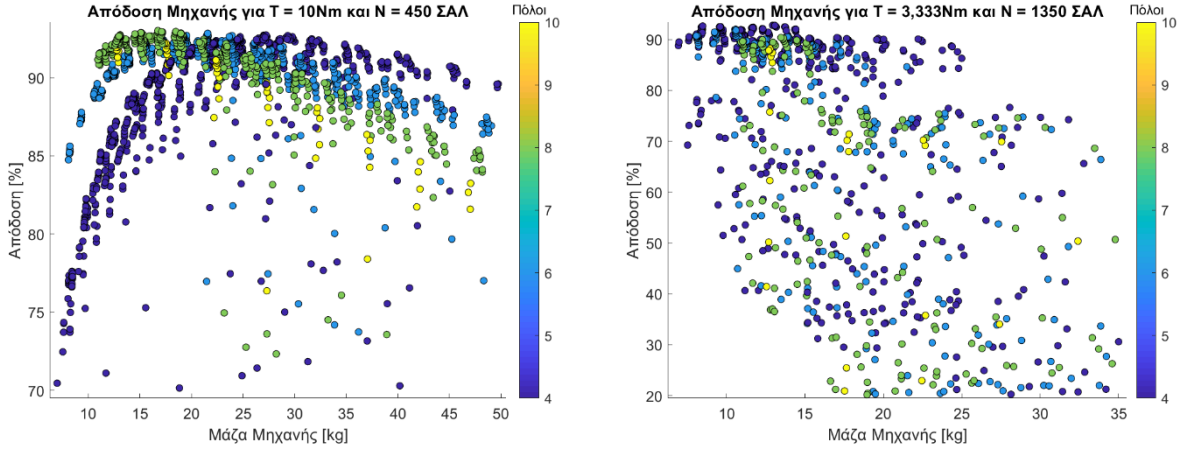
Από το σχήμα 5.55 παρατηρείται ότι με την αύξηση του αριθμού των τυλιγμάτων σε μία σύγχρονη μηχανή μονίμων μαγνητών, η ταχύτητα για την οποία η μέγιστη επιβαλλόμενη τάση γίνεται για πρώτη φορά ίση με την επαγόμενη τάση (ονομαστική ταχύτητα) μειώνεται σημαντικά, με αποτέλεσμα η μηχανή να εισέρχεται στη φάση εξασθένισης πεδίου σε όλο και μικρότερες ταχύτητες. Αυτό συνεπάγεται τη μεταφορά της «καρδιάς» του χάρτη απόδοσης (περιοχή μέγιστης απόδοσης) σε μικρότερες ταχύτητες.

Ακόμη παρατηρείται πως η βέλτιστη λειτουργία της μηχανής επιτυγχάνεται σε ταχύτητες λίγο μεγαλύτερες της ονομαστικής και φορτίσεις αρκετά μικρότερες από τις μέγιστες (όπως ορίζονται από τη δυνατότητα ψύξης).

5.4.3 Επίδραση Αριθμού Πόλων στην Απόδοση της Μηχανής για Συγκεκριμένη Ταχύτητα Περιστροφής

Από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, ο αριθμός των πόλων στο δρομέα της μηχανής φαίνεται να επηρεάζει την απόδοσή της ανάλογα με την επιθυμητή ταχύτητα.

Στο σχήμα 5.56 παρουσιάζονται τα δύο «νέφη» που προέκυψαν από τις αναλύσεις για σημεία λειτουργίας $T = 10\ Nm$, $N = 450\ \Sigma A\Lambda$ και $T = 3{,}333\ Nm$, $N = 1350\ \Sigma A\Lambda$.



Σχήμα 5.56 – Επιρροή του αριθμού των πόλων της μηχανής στην απόδοσή της για συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας
Αριστερά: Λειτουργία 10 Nm, 450 ΣΑΛ
Δεξιά: Λειτουργία 3,333 Nm, 1350 ΣΑΛ

Παρατηρείται ότι για λειτουργία σε χαμηλές στροφές οι επικρατέστερες μηχανές είναι αυτές με μεγάλο αριθμό πόλων, αφού οι οκταπολικές και οι δεκαπολικές σημειώνουν τους υψηλότερους βαθμούς απόδοσης με τις μικρότερες μάζες.

Αντίθετα, για λειτουργία σε υψηλότερες στροφές οι επικρατέστερες μηχανές είναι αυτές με μικρό αριθμό πόλων, αφού οι τετραπολικές κυρίως έχουν τους υψηλότερους βαθμούς απόδοσης και τις μικρότερες μάζες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6
ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εργασία αυτή έχει ως στόχο το σχεδιασμό ενός ηλεκτρικού κινητήρα επιφανειακών μόνιμων μαγνητών για χρήση σε όχημα εξοικονόμησης ενέργειας. Ο κυριότερος στόχος της ανάλυσης είναι η εύρεση της βέλτιστης διαμόρφωσης του κινητήρα έτσι ώστε να έχει όσο το δυνατόν μικρότερη μάζα και μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης.

6.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

6.2.1 Μεθοδολογία

Για την εύρεση του βέλτιστου κινητήρα για την εφαρμογή, απαιτείται η συγκριτική μελέτη διαφορετικών διαμορφώσεων μηχανών επιφανειακών μόνιμων μαγνητών. Η μεθοδολογία που ακολουθείται απαρτίζεται από δύο αναλύσεις ευαισθησίας στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των μηχανών.

Η πρώτη ανάλυση αφορά τον καθορισμό του μεγέθους της μηχανής, όσον αφορά τις εξωτερικές της διαστάσεις, αλλά και των βασικών παραμέτρων της. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά που εξετάζονται κατά αυτήν την ανάλυση είναι:

- Η εξωτερική ακτίνα στάτη της μηχανής.
- Το ενεργό μήκος του μαγνητικού κυκλώματος της μηχανής.
- Ο αριθμός των πόλων της μηχανής.
- Ο αριθμός των ενεργών εν σειρά ελιγμάτων στις αύλακες του στάτη της μηχανής.

Από την ανάλυση αυτή προκύπτουν 2.613 διαφορετικές γεωμετρίες μηχανών από τις οποίες επιλέγονται οι δύο επικρατέστερες, για χρήση στο όχημα χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων και για χρήση στο όχημα με κιβώτιο ταχυτήτων λόγου 3:1 αντίστοιχα.

Στη συνέχεια, οι δύο αυτές γεωμετρίες μηχανών αποτελούν τη βάση για τη δεύτερη ανάλυση ευαισθησίας, η οποία βασίζεται στη μεταβολή γεωμετρικών χαρακτηριστικών που δεν επηρεάζουν τις εξωτερικές διαστάσεις της μηχανής. Τα χαρακτηριστικά κάθε μηχανής που μεταβάλλονται είναι τα εξής:

- Ο λόγος της ακτίνας του δρομέα προς την εξωτερική ακτίνα στάτη της μηχανής.
- Ο λόγος δοντιού – αύλακας στο στάτη.
- Ο λόγος του πλάτους του πυρήνα του στάτη ως προς το πλάτος των δοντιών του.
- Το εύρος του μαγνήτη.

Από την προαναφερόμενη μεθοδολογία, προκύπτουν οι δύο βέλτιστες μηχανές, για τις δύο εναλλακτικές τοπολογίες συστήματος μετάδοσης. Η τελική επιλογή της μηχανής βασίζεται στα κριτήρια ελαχιστοποίησης της μάζας και μεγιστοποίησης του βαθμού απόδοσής της, σε συνδυασμό με τη μείωση της πολυπλοκότητας των μηχανολογικών μερών.

6.2.2 Επιλογή Κινητήρα

Με βάση τα αποτελέσματα της προαναφερθείσας ανάλυσης και τη μελέτη για την ενεργειακή κατανάλωση του οχήματος κατά μήκος μίας διαδρομής οποιασδήποτε απόστασης, επιλέγεται η βέλτιστη γεωμετρία που αντιστοιχεί στη διαμόρφωση χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων.

Η μηχανή είναι οκταπολική, με δύο αύλακες ανά πόλο και φάση και κατανεμημένο τύλιγμα μίας στρώσης. Τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά της είναι:

- Εξωτερική ακτίνα στάτη $R_{so} = 100\, mm$.
- Εξωτερική ακτίνα δρομέα $R_{so} = 66\, mm$.
- Ενεργό μήκος μαγνητικού κυκλώματος $l = 50\, mm$.
- Ενεργά εν σειρά ελίγματα σε κάθε αύλακα του στάτη $N_s = 36$.

Η μηχανή ζυγίζει $13{,}06\, kg$ και η μέγιστη ισχύς που μπορεί να αποδώσει είναι $4{,}14 kW$ με βραχυχρόνια υπερφόρτιση. Έχει βαθμό απόδοσης $92{,}69\%$ στη λειτουργία $T = 10\, Nm$ και $N = 450\, \Sigma A \Lambda$.

Για την παραπάνω λειτουργία, η μηχανή λειτουργεί με πυκνότητα ρεύματος στις αύλακες του στάτη $1{,}6\, A/mm^2$, ενώ η κυμάτωση της ροπής στην έξοδό της είναι $6{,}57\%$.

6.3 ΚΥΡΙΟΤΕΡΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.3.1 Μεθοδολογία Σχεδιασμού

Η εργασία αυτή αναδεικνύει τα πλεονεκτήματα της σχεδίασης ηλεκτρικών μηχανών με τη χρήση Η/Υ, κυριότερα λόγω του σχετικά περιορισμένου χρόνου εκτέλεσης των υπολογισμών που απαιτούνται καθώς και του εξαιρετικά μεγάλου όγκου δεδομένων που μπορεί να διαχειριστεί. Η σχεδίαση της μηχανής και η εκτίμηση των χαρακτηριστικών της αποκλειστικά με αναλυτικές σχέσεις, κρίνεται μειωμένης ακρίβειας.

Με την προαναφερόμενη μεθοδολογία καθίσταται δυνατή η θεώρηση πολλών διαφορετικών διαμορφώσεων μηχανών, και άρα προσεγγίζεται με μεγαλύτερη ακρίβεια η βέλτιστη διαμόρφωση για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

6.3.2 Επίδραση αριθμού ενεργών εν σειρά ελιγμάτων στο χάρτη απόδοσης της μηχανής

Ο αριθμός των τυλιγμάτων στις αύλακες του στάτη της μηχανής κρίνεται σημαντική παράμετρος, καθώς επηρεάζει το χάρτη απόδοσης με δύο τρόπους.

Πρώτον, με την αύξηση του αριθμού των ελιγμάτων μεταβάλλονται οι απώλειες χαλκού ($P_{Cu} = 3 \cdot I^2 \cdot R_{Cu}$) για τη διατήρηση μίας συγκεκριμένης πυκνότητας ρεύματος, αφού για δεδομένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και συντελεστή πληρότητας αύλακος η αντίσταση αυξάνεται γραμμικά ενώ το τετράγωνο της rms τιμής του ρεύματος που διατρέχει το τύλιγμα μειώνεται με μη γραμμικό τρόπο.

Δεύτερον, με την αύξηση του αριθμού των ελιγμάτων, μεταφέρεται η «καρδιά» του χάρτη απόδοσης (τα σημεία (T, N) στα οποία η μηχανή έχει το μέγιστο βαθμό απόδοσης) σε μικρότερες ταχύτητες, το οποίο είναι αποτέλεσμα της μειωμένης ταχύτητας για την οποία η μηχανή εισέρχεται στη φάση εξασθένησης πεδίου. Η επαγόμενη τάση είναι ευθέως ανάλογη (εκτός της ταχύτητας περιστροφής) του αριθμού των ελιγμάτων, με αποτέλεσμα η αύξησή τους να επιφέρει μείωση της ταχύτητας για την οποία παραβιάζεται το όριο τάσης.

6.3.3 Επίδραση Αριθμού Πόλων στην Απόδοση της Μηχανής για Συγκεκριμένη Ταχύτητα Περιστροφής

Από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, ο αριθμός των πόλων στο δρομέα της μηχανής φαίνεται να επηρεάζει την απόδοσή της ανάλογα με την επιθυμητή ταχύτητα.

Παρατηρείται ότι για λειτουργία σε χαμηλές στροφές οι επικρατέστερες μηχανές είναι αυτές με μεγάλο αριθμό πόλων, ενώ για λειτουργία σε υψηλότερες στροφές οι επικρατέστερες μηχανές είναι αυτές με μικρό αριθμό πόλων.

Σημαντική παράμετρος για τη διαφοροποίηση αυτή, είναι το γεγονός πως για να επιτευχθεί μειωμένη ονομαστική συχνότητα λειτουργίας ($< 50\ Hz$) που οδηγεί σε μειωμένες απώλειες πυρήνα, απαιτείται μείωση του αριθμού των πόλων της μηχανής για μεγαλύτερες ταχύτητες. Η εξάρτηση του αριθμού των πόλων από την ταχύτητα αναδεικνύεται μέσω της προκαταρκτικής σχεδίασης.

6.3.4 Συνεισφορά Γεωμετρικών Χαρακτηριστικών στην Απόδοση της Μηχανής

Από τις αναλύσεις ευαισθησίας παραμέτρων που πραγματοποιήθηκαν στις δύο αρχικά επιλεγμένες διαμορφώσεις, προκύπτουν:

- Η μεταβολή των παραμέτρων γεωμετρίας του στάτη όπως το ποσοστό του δοντιού προς την αύλακα και το ποσοστό του σώματος του σιδήρου προς το πλάτος του δοντιού, επηρεάζουν σε κάποιο βαθμό τα χαρακτηριστικά απόδοσης και επίδοσης της μηχανής. Η μεταβολή που προκαλούν αφορά κυρίως το αρμονικό περιεχόμενο του πεδίου με συνέπεια την αλλαγή της κυμάτωσης της ροπής (σημαντικά) και τις απώλειες σιδήρου στάτη (λιγότερο αισθητά).

- Με τη μεταβολή του λόγου ακτίνας δρομέα προς ακτίνα στάτη (δηλαδή τη μεταβολή της ακτίνας διακένου) μεταβάλλεται σημαντικά η ροπή της μηχανής $(T \sim D^2)$. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην ανάγκη για χρήση περισσότερου μαγνήτη (για μειωμένη ακτίνα διακένου) ή στη δυνατότητα χρήσης λιγότερου μαγνήτη (για αυξημένη ακτίνα διακένου).

6.4 ΠΡΩΤΟΤΥΠΗ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Τα κυριότερα σημεία πρωτότυπης συνεισφοράς της εργασίας είναι τα παρακάτω:

- Συγκριτική μελέτη μεγάλου πλήθους διαφορετικών τοπολογιών μηχανών μέσω αλγορίθμου σάρωσης πεδίου ορισμού γεωμετρικών παραμέτρων.

- Εύρεση και ανάλυση βέλτιστης διαμόρφωσης μηχανής προς χρήση σε όχημα κατηγορίας «Urban Concept».

- Ανάπτυξη αλγορίθμου παραμετροποιημένης σχεδίασης γεωμετριών ηλεκτρικών μηχανών επιφανειακών μόνιμων μαγνητών, με αξιοποίηση του ελάχιστου κλάσματος γεωμετρίας ανά διατομή μηχανής.

- Ανάπτυξη αλγορίθμου παράλληλης επεξεργασίας για την επίλυση του μαγνητοστατικού προβλήματος σε μία λαμαρίνα της μηχανής και ανάλυσης της πεδιακής πληροφορίας για την εξαγωγή όλων των χαρακτηριστικών της μηχανής.

- Αποζευγμένη ανάλυση της γεωμετρίας της μηχανής από το ενεργό της μήκος και τον αριθμό των ελιγμάτων στις αύλακες του στάτη.

- Γραφική αναπαράσταση των απωλειών και της απόδοσης της μηχανής με χρήση της χαρακτηριστικής καμπύλης Τ – ω και δημιουργία χαρτών απόδοσης και απωλειών.

6.5 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Τα κυριότερα σημεία τα οποία αναδεικνύονται μέσα από την παρούσα εργασία, αλλά χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης είναι:

- Πειραματική επιβεβαίωση των χαρακτηριστικών της προτεινόμενης μηχανής.

- Θεώρηση του κύκλου οδήγησης με λεπτομερή χαρακτηριστικά απαίτησης ροπής και ταχύτητας με βάση διαφορετικές διαδρομές του διαγωνισμού «Shell Eco Marathon».

- Μελέτη εναλλακτικών διαμορφώσεων μηχανών μονίμων μαγνητών (π.χ. εσωτερικοί πολυστρωματικοί μαγνήτες) ή διαμορφώσεων με συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα και σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά της παρούσης εργασίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] A. Mahmoudi, W. L. Soong, G. Pellegrino and E. Armando, "Loss Function Modeling of Efficiency Maps of Electrical Machines", in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 5, pp. 4221-4231, Sept.-Oct. 2017.

[2] F. Meier, “Permanent-Magnet Synchronous Machines with Non-Overlapping Concentrated Windings for Low-Speed Direct-Drive Applications”, Doctoral Dissertation, School of Electrical Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2008.

[3] G. Pellegrino, A. Vagati, P. Guglielmi and B. Boazzo, "Performance Comparison Between Surface-Mounted and Interior PM Motor Drives for Electric Vehicle Application", in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 2, pp. 803-811, Feb. 2012.

[4] J. Pyrhonen, T. Jokinen, V. Hrabovcová, *Design of Rotating Electrical Machines*. Great Britain: John Wiley & Sons, 2008.

[5] K. Bourchas et al., "Quantifying Effects of Cutting and Welding on Magnetic Properties of Electrical Steels" in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 5, pp. 4269-4278, Sept.-Oct. 2017.

[6] K. Bourchas, “Manufacturing Effects on Iron Losses in Electrical Machines”, Master of Science Thesis, School of Electrical Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2015.

[7] N. Bianchi, S. Bolognani and P. Frare, "Design criteria for high-efficiency SPM synchronous motors", in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, no. 2, pp. 396-404, June 2006.

[8] W. L. Soong and T. J. E. Miller, "Field-weakening performance of brushless synchronous AC motor drives", in *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, vol. 141, no. 6, pp. 331-340, Nov. 1994.

[9] W. Roshen, "Iron Loss Model for Permanent-Magnet Synchronous Motors", in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 43, no. 8, pp. 3428-3434, Aug. 2007.

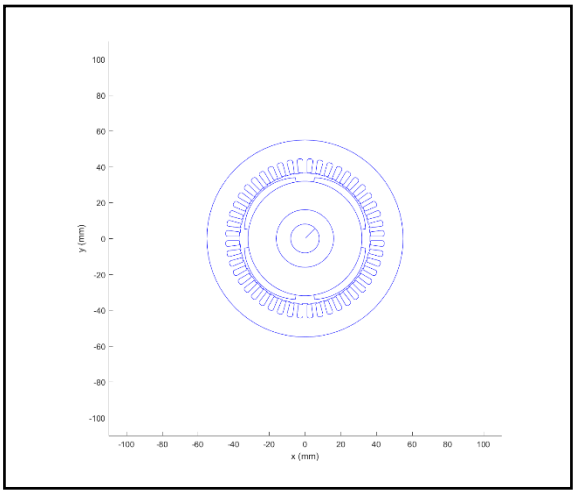
[10] Κ. Λάσκαρης, “Σχεδιασμός και Κατασκευή Κινητήρων Μονίμων Μαγνητών για Ηλεκτρικά Οχήματα”, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2011.

[11] Μ. Μπενιακάρ, “Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση κινητήρων με θεώρηση των απωλειών των μόνιμων μαγνητών για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης”, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2014.

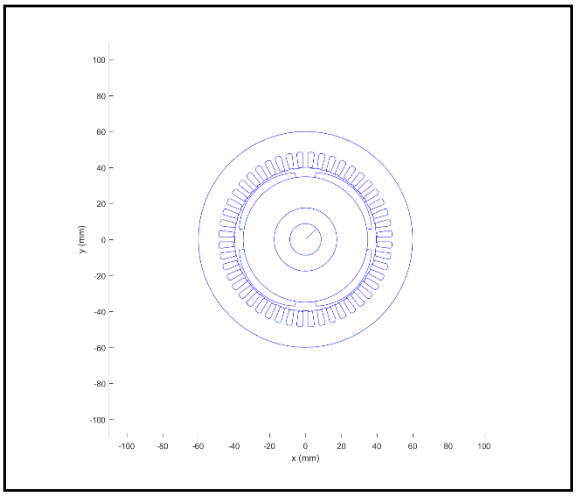
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΕΣ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

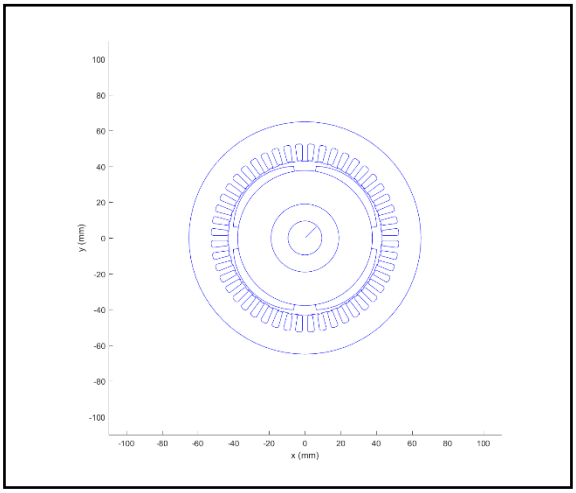
Στα σχήματα Α1 – Α29 παρουσιάζονται οι διατομές των μηχανών που αναλύθηκαν κατά την αρχική ανάλυση για τον προσδιορισμό των βέλτιστων.



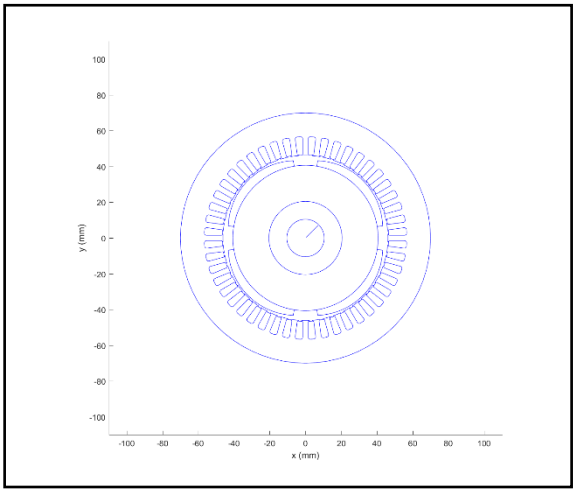
Σχήμα Α1 – P = 4, q = 4, Rso = 55mm, Rro = 36mm



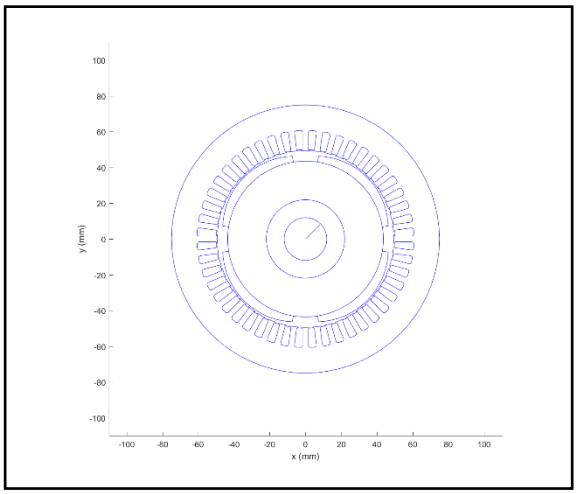
Σχήμα Α2 – P = 4, q = 4, Rso = 60mm, Rro = 39mm



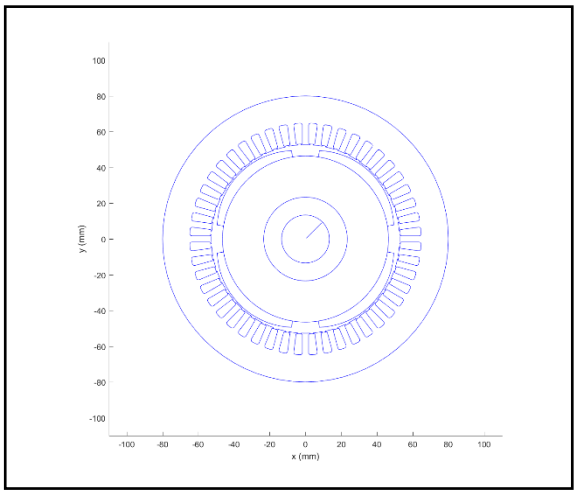
Σχήμα Α3 – P = 4, q = 4, Rso = 65mm, Rro = 42mm



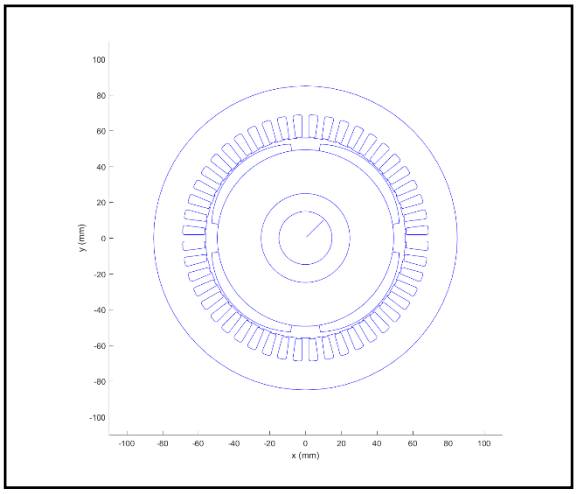
Σχήμα Α4 – P = 4, q = 4, Rso = 70mm, Rro = 46mm



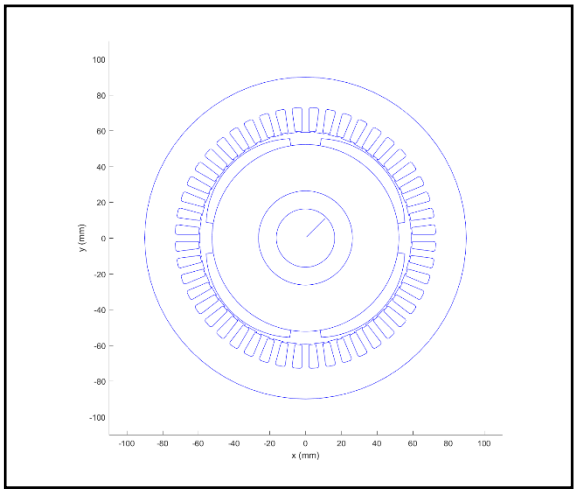
Σχήμα A5 – P = 4, q = 4, Rso = 75mm, Rro = 49mm



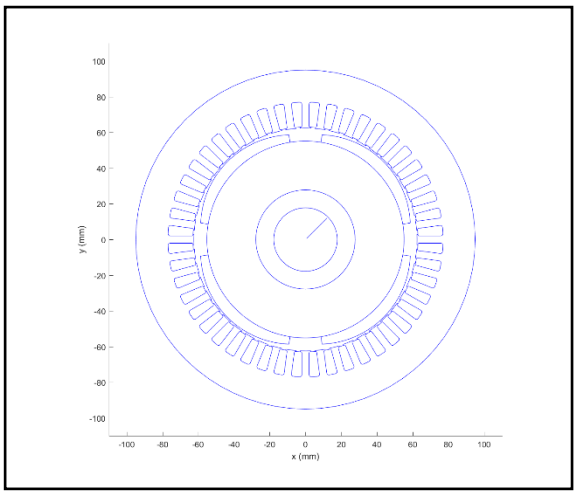
Σχήμα A6 – P = 4, q = 4, Rso = 80mm, Rro = 52mm



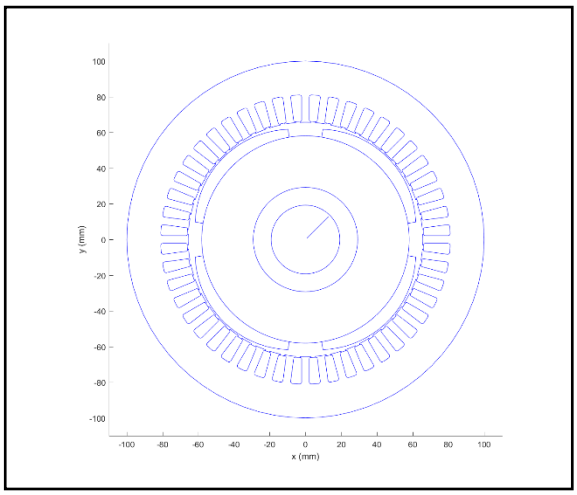
Σχήμα A7 – P = 4, q = 4, Rso = 85mm, Rro = 55mm



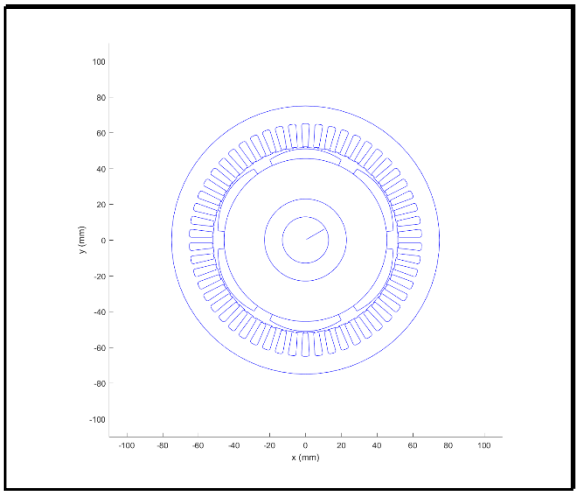
Σχήμα A8 – P = 4, q = 4, Rso = 90mm, Rro = 59mm



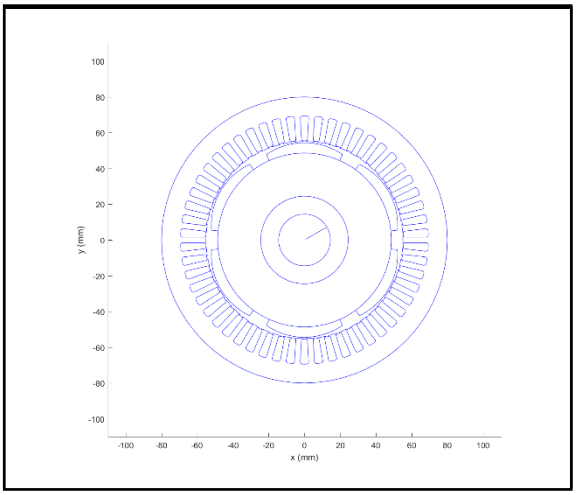
Σχήμα A9 – P = 4, q = 4, Rso = 95mm, Rro = 62mm



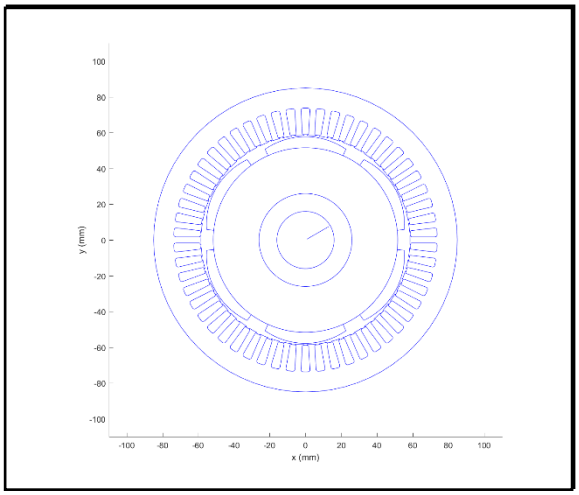
Σχήμα A10 – P = 4, q = 4, Rso = 100mm, Rro = 65mm



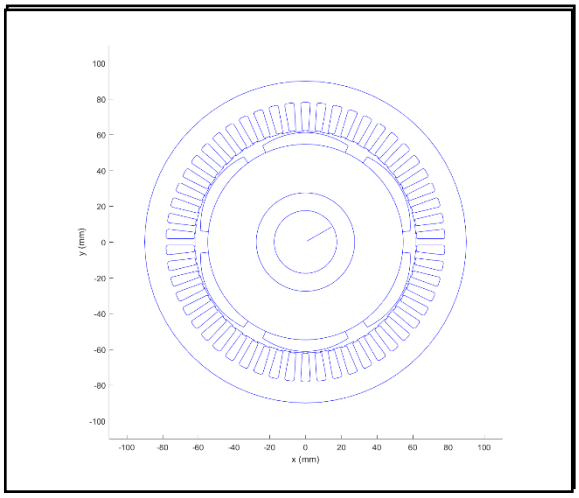
Σχήμα A17 – P = 6, q = 3, Rso = 75mm, Rro = 51mm



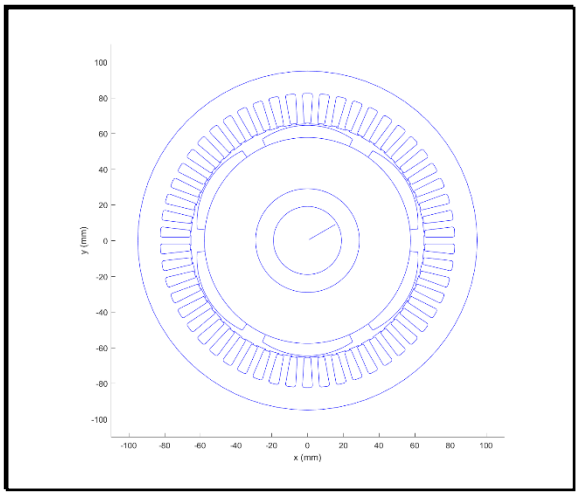
Σχήμα A18 – P = 6, q = 3, Rso = 80mm, Rro = 54mm



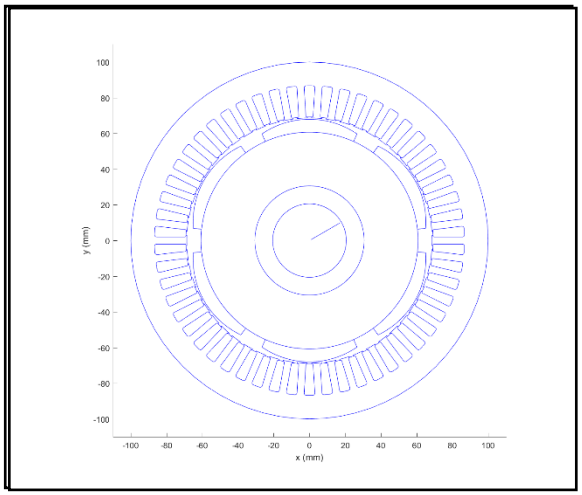
Σχήμα A19 – P = 6, q = 3, Rso = 85mm, Rro = 58mm



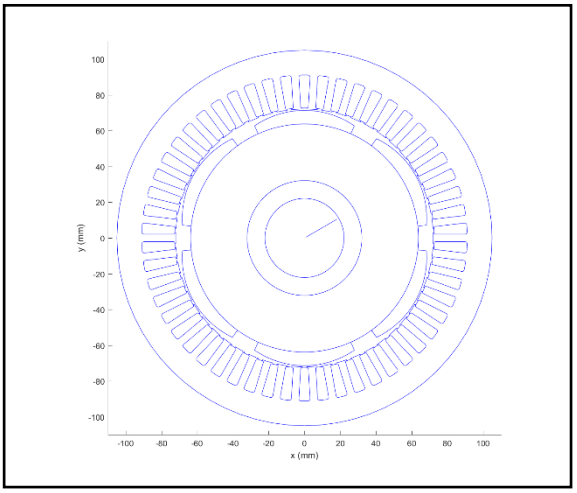
Σχήμα A20 – P = 6, q = 3, Rso = 90mm, Rro = 61mm



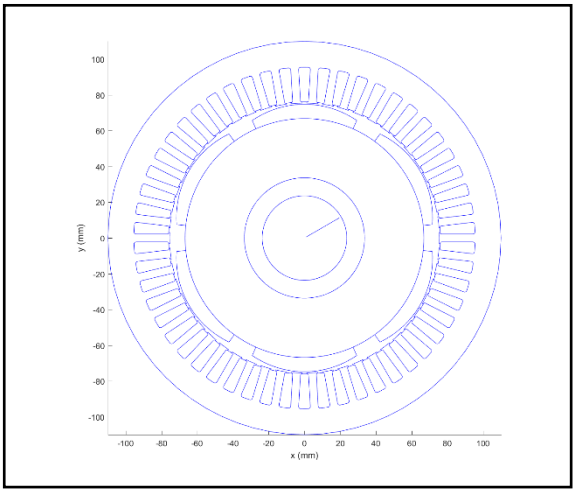
Σχήμα A21 – P = 6, q = 3, Rso = 95mm, Rro = 65mm



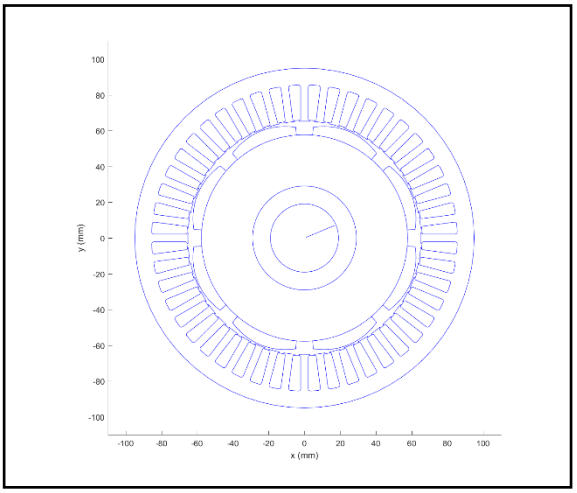
Σχήμα A22 – P = 6, q = 3, Rso = 100mm, Rro = 68mm



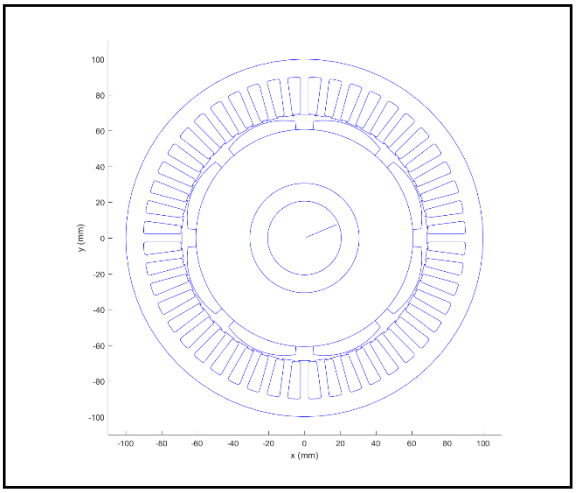
Σχήμα A23 – P = 6, q = 3, Rso = 105mm, Rro = 71mm



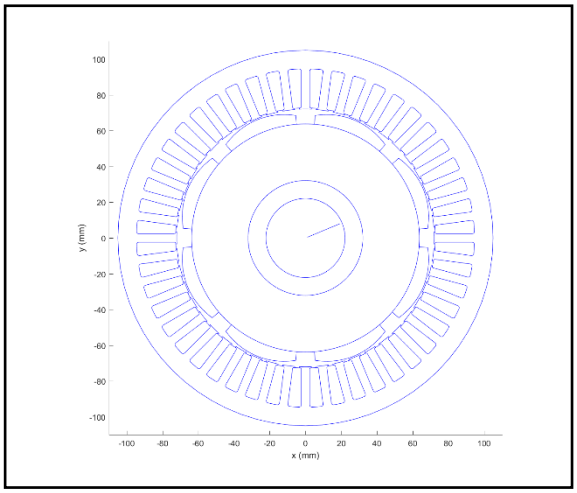
Σχήμα A24 – P = 6, q = 3, Rso = 110mm, Rro = 75mm



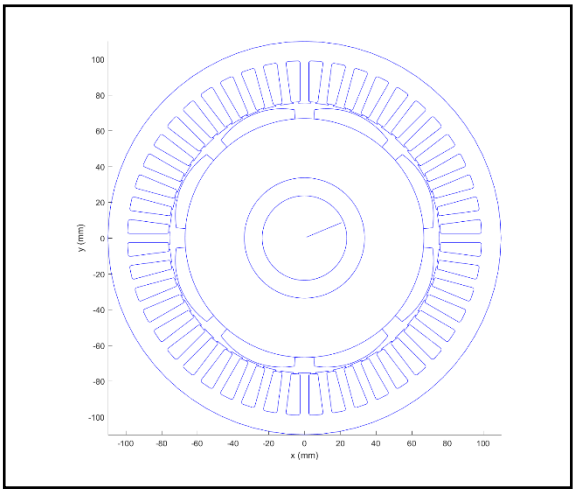
Σχήμα A25 – P = 8, q = 2, Rso = 95mm, Rro = 65mm



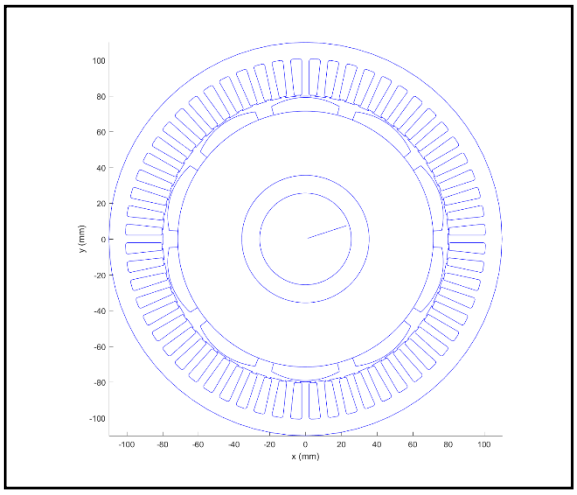
Σχήμα A26 – P = 8, q = 2, Rso = 100mm, Rro = 68mm



Σχήμα A27 – P = 8, q = 2, Rso = 105mm, Rro = 71mm



Σχήμα A28 – P = 8, q = 2, Rso = 110mm, Rro = 75mm



Σχήμα A29 – P = 10, q = 2, Rso = 110mm, Rro = 79mm