



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

Μηχανική Ανάλυση Ηλεκτρικών Μηχανών Μονίμων Μαγνητών σε Εφαρμογή Ηλεκτροκίνησης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Φώτιος-Παναγιώτης Π. Ξηνταρόπουλος

Επιβλέπων : Αντώνιος Γ. Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάρτιος 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

Μηχανική Ανάλυση Ηλεκτρικών Μηχανών Μονίμων Μαγνητών σε Εφαρμογή Ηλεκτροκίνησης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Φώτιος-Παναγιώτης Π. Ξηνταρόπουλος

Επιβλέπων : Αντώνιος Γ. Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τη 21η Μαρτίου 2023.

.....
Αντώνιος Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Σταύρος Παπαθανασίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Αντώνιος Αντωνόπουλος

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάρτιος 2023

.....

Φώτιος-Παναγιώτης Π. Ξηνταρόπουλος
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © Φώτιος-Παναγιώτης Π. Ξηνταρόπουλος, 2023.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τη Μηχανική Ανάλυση Ηλεκτρικών Μηχανών Μονίμων Μαγνητών για Εφαρμογές Ηλεκτροκίνησης. Για την ανάλυση της μηχανής έχει χρησιμοποιηθεί κώδικας που αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας λογισμικό MATLAB σε συνδυασμό με το λογισμικό FEMM που βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων δύο διαστάσεων. Η εργασία εστιάζεται στα φαινόμενα που προκαλούν μηχανικές καταπονήσεις και επιχειρείται βελτιστοποίηση με βάση ανάλυση ευαισθησίας των γεωμετρικών παραμέτρων του κινητήρα.

Αρχικά, περιγράφεται η μετάβαση στην ηλεκτροκίνηση των μεταφορών και παρουσιάζεται το σύστημα ηλεκτρικής κίνησης αυτοκινήτου ενώ στη συνέχεια, αναφέρονται οι διάφορες κατηγορίες ηλεκτροκινητήρων, που χρησιμοποιούνται συνήθως σε αυτές τις εφαρμογές.

Σε ένα πρώτο θεωρητικό μέρος, παρουσιάζονται η βασική θεωρία και οι εξισώσεις του ηλεκτρομαγνητισμού που αποτελούν το θεμέλιο στην ανάλυση μιας ηλεκτρικής μηχανής καθώς διέπουν την παραγωγή ροπής και τη μετατροπή ισχύος, αποτελώντας τη βάση λειτουργίας της. Η ηλεκτρομαγνητική ανάλυση συμπληρώνεται από δύο ενότητες ανάλυσης των μηχανικών και των θερμικών φαινομένων, αντίστοιχα, καθώς οι νέες επιλεγόμενες γεωμετρικές μηχανών βασίζονται σε βελτιστοποιημένες εκδοχές συνδυασμού επίδοσης-απόδοσης, συνεκτιμώντας και τις τρεις κατηγορίες (ηλεκτρομαγνητικών, θερμικών και μηχανικών) φαινομένων. Επιπλέον, παρουσιάζεται μία μηχανική ανάλυση βασισμένη στη θεωρία στρεφόμενου δίσκου, αξιοποιώντας στοιχεία της θεωρίας ελαστικότητας λεπτού δίσκου ως προς μια διάσταση, της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων και της θεωρίας τριγώνου σταθερής καταπόνησης.

Στη συνέχεια καθορίζεται η εφαρμογή ενδιαφέροντος και βελτιστοποιείται ηλεκτρικός κινητήρας μονίμων μαγνητών υψηλών στροφών (~15.000 ΣΑΛ) με σταθερή σχέση μετάδοσης 1:20 για μικρό αυτοκίνητο πόλης. Μετά τον καθορισμό των απαιτούμενων μεγεθών ροπής και ισχύος, ακολουθεί προκαταρκτική σχεδίαση της μηχανής ώστε να προσδιοριστούν τα βασικά γεωμετρικά μεγέθη του μαγνητικού της κυκλώματος με βάση τα οποία θα ξεκινήσουν οι προσομοιώσεις για τη βελτιστοποίηση γεωμετρίας και την οριστική σχεδίαση. Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε βασίζεται σε ανάλυση ευαισθησίας, γεωμετρικών παραμέτρων. Το τελευταίο τμήμα της εργασίας συγκεντρώνει τα συμπεράσματα και τα προτεινόμενα θέματα που χρήζουν έρευνας.

Λέξεις κλειδιά : ηλεκτρική μηχανή, μηχανή μονίμων μαγνητών, μηχανική ανάλυση, μηχανική αντοχή, μηχανή υψηλών στροφών, γενετικός αλγόριθμος, πεπερασμένα στοιχεία, θεωρία ελαστικότητας, κριτήριο Von Mises

ABSTRACT

The present thesis investigates Structural Analysis issues of High Speed Electric Motors in Electric Drive Applications. MATLAB code and finite element tool FEMM have been implemented within the methodology developed for the optimization of the motor.

The main phenomena leading to mechanical stresses are considered and an optimization procedure is developed based on sensitivity analysis of the geometric parameters of the motor. Initially, the transition to transportation electrification is described and the electric drive system in a car is presented, followed by the various categories of electric motors that are usually eligible for design.

In a first theoretical part, the basic theory and governing equations of electromagnetism are presented, constituting the foundation of the analysis of an electrical machine since they are the origin of the torque creation and power conversion, characterizing its operation. The electromagnetic analysis is complemented by parts concerning analyses of mechanical and thermal phenomena, respectively, as new machine geometries are selected on the basis of appropriate compromises of performance-efficiency characteristics including all three phenomena (electromagnetic, thermal and mechanical) design considerations. In addition, a structural analysis is performed on the basis of a rotating disk consideration, involving elements assuming thin disk elasticity theory with respect to one dimension, finite element techniques and constant stress triangle theory.

The intended application is identified and the optimization procedure concerns a high-speed (~15,000 RPM) motor with constant 1:20 gear ratio for a small city car. Following the required torque and power specifications a preliminary design stage of the machine has been performed in order to define the basic dimensions constituting the starting point of the simulations for optimization and derivation of the final design, obtained by implementing finite element techniques. The optimization methodology proposed is based on sensitivity analysis techniques of the motor geometry.

The last section of the thesis presents the conclusions and suggests points for further investigation.

Keywords : electric machine, permanent magnet machine, structural analysis, mechanical strength, high-speed machine, genetic algorithm, finite elements, elasticity theory, Von Mises criterion.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την παρούσα διπλωματική εργασία κλείνει ο προπτυχιακός μου κύκλος που ξεκίνησε τον Σεπτέμβρη του 2016 στην Ιατρική σχολή του ΑΠΘ και συνεχίστηκε το Σεπτέμβρη του 2017 στη σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστώ την οικογένειά μου, με καταγωγή από το Άργος Αργολίδος, και συγκεκριμένα τους γονείς μου Πέτρο και Κυριακή για την στήριξη και αγάπη τους που έχουν παράσχει όλα αυτά τα χρόνια και συνεχίζουν να προσφέρουν καθώς και τα αδέρφια μου Έλλη, Κωστή και Φανούρη.

Θέλω να ευχαριστήσω θερμά για την εμπιστοσύνη του με την παρούσα διπλωματική και για τα προπτυχιακά μαθήματα στις ηλεκτρικές μηχανές τον Καθηγητή του τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του ΕΜΠ κύριο Αντώνιο Κλαδά.

Επιπλέον, θέλω να ευχαριστήσω και να ευχηθώ τα καλύτερα στην επαγγελματική και ακαδημαϊκή του πορεία το φίλο και συναδέλφο Γιώργο Σακκά, υποψήφιο διδάκτορα του ΕΜΠ, για τη βοήθεια και επίβλεψή του στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Ευχαριστώ από καρδιάς όλους τους καθηγητές της σχολής για όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου που μας μετέδωσαν τις γνώσεις τους και που σε κάθε μάθημα ανοίγαμε ένα ακόμη παράθυρο στην κατανόηση του κόσμου αυτού του σοφά πλασμένου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ακόμη τους κυρίους Κωνσταντίνο Μπούρχα και Χάρη Βασιλόπουλο, συναδέλφους κατά την πρακτική μου στην Tesla, για τις συζητήσεις γύρω από τις ηλεκτρικές μηχανές αλλά και τον καθηγητή του ΚΤΗ κύριο Luca Peretti που με δέχθηκε για την πρακτική Erasmus στο εργαστήριο ηλεκτρικής ισχύος του ΚΤΗ στη Στοκχόλμη της Σουηδίας.

Φώτης Ξηνταρόπουλος

Αθήνα, Μάρτιος 2023

*<<πάσα τε ἐπιστήμη χωριζομένη δικαιοσύνης καὶ τῆς ἄλλης ἀρετῆς
πανουργία, οὐ σοφία φαίνεται.>>*

Πλάτωνος, «Μενέξενος» 347a

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	<i>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</i>	<i>13</i>
	<i>Σκοπός της Εργασίας</i>	
	<i>Δομή της Εργασίας</i>	
2.	<i>ΓΕΝΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ-ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....</i>	<i>15</i>
	<i>Εισαγωγικό</i>	
	<i>Σύστημα Ηλεκτρικής Κίνησης</i>	
3.	<i>ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ</i>	<i>22</i>
	<i>Διεύθυνση Διάδοσης Μαγνητικής Ροής</i>	
	<i>Πλήθος Φάσεων</i>	
	<i>Κινητήρες Εναλλασσομένου Ρεύματος</i>	
	<i>Μηχανές Μαγνητικού Διαφορικού</i>	
	<i>Ειδικοί Ηλεκτρικοί Κινητήρες</i>	
4.	<i>ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΑΡΧΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ.....</i>	<i>36</i>
5.	<i>ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ.....</i>	<i>38</i>
	<i>Ηλεκτρομαγνητική ανάλυση</i>	
	<i>Θερμική ανάλυση</i>	
	<i>Μηχανική ανάλυση</i>	
6.	<i>ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΗΧΑΝΗΣ.....</i>	<i>56</i>
	<i>Χαρακτηριστικά οχήματος</i>	
	<i>Ταχύτητα περιστροφής</i>	
	<i>Ροπή Μηχανής</i>	
7.	<i>ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ</i>	<i>60</i>
	<i>Εισαγωγικό</i>	
	<i>Πάχος διακένου</i>	
	<i>Ειδική Μαγνητική Φόρτιση</i>	
	<i>Ειδική Ηλεκτρική Φόρτιση</i>	
	<i>Πυκνότητα ρεύματος τυλίγματος</i>	
	<i>Διαμόρφωση Τυλίγματος</i>	
	<i>Έξοδος Ηλεκτρικής Μηχανής</i>	
	<i>Διαστάσεις Διακένου και Μήκος μηχανής</i>	
	<i>Συχνότητα Λειτουργίας - Πόλοι μηχανής</i>	
	<i>Επιλογή Υλικών</i>	

8.	<i>ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟΥ ΔΙΣΚΟΥ.....</i>	<i>70</i>
	<i>Γενικά στοιχεία</i>	
	<i>Στοιχεία θεωρίας ελαστικότητας σε λεπτό δίσκο ως προς μια διάσταση (ακτινική)</i>	
9.	<i>ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....</i>	<i>76</i>
	<i>Γενικά στοιχεία</i>	
	<i>Θεωρία Τριγώνου Σταθερής Τάσης - CST</i>	
10.	<i>ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ.....</i>	<i>83</i>
	<i>Γενετικός Αλγόριθμος</i>	
	<i>Υλοποίηση Αλγορίθμου</i>	
	<i>Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης με τη χρήση του ΓΑ</i>	
11.	<i>ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ</i>	<i>93</i>
	<i>Σχέση Συντελεστών a,c</i>	
	<i>Αριθμός Πόλων</i>	
	<i>Αποτελέσματα Πριν και Μετά τη Βελτιστοποίηση</i>	
12.	<i>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</i>	<i>107</i>
	<i>Σύνοψη</i>	
	<i>Ανακεφαλαίωση</i>	
	<i>Κύρια Συμπεράσματα</i>	
	<i>Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση</i>	
13.	<i>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</i>	<i>111</i>

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της εργασίας

Η διπλωματική αυτή εργασία παρουσιάζει και τονίζει τη σημασία της μηχανικής ανάλυσης στις ηλεκτρικές μηχανές. Είναι σημαντικό οι σχεδιαστές ηλεκτρικών μηχανών να αντιλαμβάνονται στο σύνολό τους τις προκλήσεις που τίθενται από τα ηλεκτρομαγνητικά, τα μηχανικά και τα θερμικά φαινόμενα ώστε οι νέες ηλεκτρικές μηχανές που δημιουργούνται να έχουν μικρότερο μέγεθος και κόστος, μεγαλύτερη απόδοση, διάρκεια ζωής και αξιοπιστία. Δηλαδή να αξιοποιούν κάθε χώρο για βελτίωση που επιτρέπουν οι κανόνες που διέπουν τα φαινόμενα που προαναφέρθηκαν.

Στην εργασία αυτή εξετάζονται οι μηχανές με μόνιμους μαγνήτες καθώς προσφέρουν μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος και εξετάζεται η συμπεριφορά της μηχανής που μελετάται κοντά στο όριο των 15.000 ΣΑΛ. Για την υψηλή αυτή ταχύτητα η γεωμετρία που ενδείκνυται είναι αυτή των μαγνητών σε σχήμα V (V-type). Επιπλέον, στην εργασία αυτή γίνεται προσπάθεια βελτιστοποίησης ενός αρχικού δρομέα ώστε να δοθεί λύση στην κατασκευή με εφαρμογή στην αυτοκίνηση και συγκεκριμένα σε μικρό αυτοκίνητο πόλης. Σκοπός είναι η λύση που θα προκύψει να έχει μικρή σκέδαση (απώλεια) ροής στο δρομέα, να αποδίδει την απαιτούμενη ροπή και να είναι εύκολη στην κατασκευή και συμπαγής χωρίς την τοποθέτηση εξωτερικών δακτυλίων τύπου ανθρακονήματος για συγκράτηση του δρομέα.

Τέλος, σκοπός της εργασίας είναι να παρουσιάσει μια γενικότερη εικόνα και διάφορους τομείς στη σχεδίαση και κατασκευή ηλεκτρικών μηχανών λιγότερο τετριμμένους που θα προκαλέσουν το ενδιαφέρον μελλοντικών μηχανικών να ασχοληθούν με το αντικείμενο της σχεδίασης ηλεκτρικών μηχανών.

Δομή της εργασίας

Η παρούσα εργασία ξεκινά με μια σύντομη εισαγωγή σχετικά με τις ηλεκτρικές μηχανές και την αυτοκίνηση. Τονίζει την ισχυρή δυναμική του κλάδου της σχεδίασης ηλεκτρικών μηχανών στο εγγύς μέλλον και παρουσιάζει με συντομία το σύστημα της ηλεκτρικής κίνησης σε ένα αυτοκίνητο.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ένας σημαντικός αριθμός τεχνολογιών ηλεκτρικών μηχανών, διαφόρων σχεδίων και χαρακτηριστικών που θα συναντήσει ένας μηχανικός που ασχολείται με τη σχεδίαση ηλεκτρικών μηχανών. Στο τέταρτο και στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη παρουσίαση της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας και αναλύονται τα τρία πεδία ανάλυσης κατά τη σχεδίαση μιας ηλεκτρικής μηχανής και

συγκεκριμένα η ηλεκτρομαγνητική ανάλυση, η μηχανική ανάλυση και η θερμική ανάλυση.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαστασιολόγηση της μηχανής που μελετάται από την παρούσα εργασία και αφορά σε μικρό αυτοκίνητο πόλης με μέση ταχύτητα 40 km/h, μέγιστη ταχύτητα 85 km/h, μέγιστη ροπή 40 Nm και συνολική ισχύ 55 kW. Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζεται η προκαταρκτική σχεδίαση της μηχανής που μας δίνει τα αρχικά χαρακτηριστικά της μηχανής που μελετάται πριν γίνει ανάλυση πάνω σε αυτή με χρήση προσομοιώσεων και αλγορίθμων βελτιστοποίησης.

Στο όγδοο και στο ένατο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα γενικά στοιχεία της μηχανικής ανάλυσης στρεφόμενου δίσκου και στοιχεία ελαστικότητας λεπτού δίσκου, τα γενικά στοιχεία της θεωρίας πεπερασμένων στοιχείων και θεωρίας στοιχείων τριγώνου σταθερής τάσης CST-(constant strain triangle).

Στο δέκατο και στο ενδέκατο κεφάλαιο βρίσκεται η βελτιστοποίηση και η ανάλυση ευαισθησίας για τις μεταβλητές της γεωμετρίας του δρομέα που εξετάζεται και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για την ταχύτητα των 15.000 ΣΑΛ.

Στο δωδέκατο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας και προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση, ενώ στο δέκατο-τρίτο κεφάλαιο παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

2.ΓΕΝΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ-ΔΕΛΟΜΕΝΑ

Εισαγωγικό

Σύμφωνα με την ορθόδοξη θεολογία, η κίνηση είναι χαρακτηριστικό των κτιστών δημιουργημάτων, ενώ η θεία φύση είναι άτρεπτη. Ο άγιος Ιωάννης ο Δαμασκηνός αναφέρει περί θείας φύσεως: *«Τὸ ἄκτιστον, τὸ ἄναρχον, τὸ ἀθάνατον καὶ ἀπέραντον καὶ αἰώνιον, τὸ ἄυλον, τὸ ἀγαθόν, τὸ δημιουργικόν, τὸ δίκαιον, τὸ φωτιστικόν, τὸ ἄτρεπτον, τὸ ἀπαθές, τὸ ἀπερίγραπτον, τὸ ἀχώρητον, τὸ ἀπερίοριστον, τὸ ἀόριστον, τὸ ἀσώματον, τὸ ἀόρατον, τὸ ἀπερινόητον, τὸ ἀνευδές, τὸ αὐτοκρατὲς καὶ αὐτεξούσιον, τὸ παντοκρατορικόν, τὸ ζωοδοτικόν, τὸ παντοδύναμον, τὸ ἀπειροδύναμον, τὸ ἀγιαστικόν καὶ μεταδοτικόν, τὸ περιέχειν καὶ συνέχειν τὰ σύμπαντα καὶ πάντων προνοεῖσθαι*», PG 94, 860AB, ενώ για την τρεπτότητα των κτιστών όντων σημειώνει: *«Πάντα τὰ ὄντα ἢ κτιστά ἐστὶν ἢ ἄκτιστα. Εἰ μὲν οὖν κτιστά, πάντως καὶ τρεπτά· ὧν γὰρ τὸ εἶναι ἀπὸ τροπῆς ἤρξατο, ταῦτα τῇ τροπῇ ὑποκείμετα πάντως ἢ φθειρόμενα ἢ κατὰ προαίρεσιν ἀλλοιούμενα. Εἰ δὲ ἄκτιστα, κατὰ τὸν τῆς ἀκολουθίας λόγον, πάντως καὶ ἄτρεπτα. Τίς οὖν οὐ συνθήσεται πάντα τὰ ὄντα, ὅσα ὑπὸ τὴν ἡμετέραν αἴσθησιν, ἀλλὰ μὴν καὶ ἀγγέλους τρέπεσθαι καὶ ἀλλοιοῦσθαι καὶ πολυτρόπως κινεῖσθαι καὶ μεταβάλλεσθαι; Τὰ μὲν νοητά, ἀγγέλους φημί καὶ ψυχὰς καὶ δαίμονας, κατὰ προαίρεσιν τὴν τε ἐν τῷ καλῷ προκοπὴν καὶ τὴν ἐκ τοῦ καλοῦ ἀποφοίτησιν, ἐπιτεινομένην τε καὶ ὕφιμένην· τὰ δὲ λοιπὰ κατὰ τε γένεσιν καὶ φθορὰν αὐξήσιν τε καὶ μείωσιν καὶ τὴν κατὰ ποιότητα μεταβολὴν καὶ τὴν τοπικὴν κίνησιν. Τρεπτά τοίνυν ὄντα πάντως καὶ κτιστά.»* PG 94, 796ABC.

Αλλά και σύμφωνα με τον Πλάτωνα, που δια στόματος Σωκράτη αναφέρεται στο ρητό του Ηρακλείτου *«πάντα χωρεῖ καὶ οὐδὲν μένει»* (Πλατ. Κρατύλος. 402a) η διαρκής κίνηση είναι χαρακτηριστικό του κόσμου μας.

«Παρερμηνεύοντας» τον Πλούταρχο (Ηθικά 163a) *«ψυχῆς γὰρ ὄργανον τὸ σῶμα, θεοῦ δ' ἢ ψυχῆ· καὶ καθάπερ σῶμα πολλὰς μὲν ἐξ αὐτοῦ κινήσεις ἔχει, τὰς δὲ πλείστας καὶ καλλίστας ὑπὸ ψυχῆς, οὕτως αὖ πάλιν ἢ ψυχῆ τὰ μὲν ὑφ' ἑαυτῆς κινουμένη πράττει, τὰ δὲ τῷ θεῷ παρέχει χρωμένῳ κατευθύνειν καὶ τρέπειν ἑαυτὴν ἢ βούλοιο, πάντων ὀργάνων εὐτρεπέστατον οὕσα.»* βλέπουμε ότι η κίνηση αποτελεί καθρέπτη της ψυχῆς της κοινωνίας και των κοινωνικών συσχετίσεων που αναπτύσσονται, επομένως, μελετώντας κανείς τις μεταφορές σε μια κοινωνία μπορεί να κατανοήσει πώς αυτή λειτουργεί, πως συνδιαλέγεται με το κοινωνικό γίνεσθαι.

Η πρόοδος της ανθρώπινης κοινωνίας σήμερα, συνδέεται με την αυξημένη ανάγκη μετακινήσεων ανθρώπων και εμπορευμάτων. Η αύξηση των αναγκών των αναπτυγμένων κρατών, η ανάπτυξη χωρών όπως η Ινδία με πληθυσμό ~1.4 δισεκατομμυρίων κατοίκων

και δυσανάλογα μικρή, ως προς τον πληθυσμό, κατανάλωση ενέργειας (ενδεικτικά για το 2019, 28.7 GJ για την Ινδία σε σχέση με τα 101.3 GJ για την Κίνα, 128.1 GJ για EU28, και 259.7 GJ για την Αμερική, η ετήσια κατά κεφαλήν κατανάλωση ενέργειας [1]), και η ραγδαία αύξηση του πληθυσμού του παγκόσμιου νότου (ενδεικτικά ο πληθυσμός της αφρικανικής ηπείρου αναμένεται να αυξηθεί από τα ~1.2 δισεκατομμύρια σε πάνω από 4.3 δισεκατομμύρια έως το τέλος του 21ου αιώνα [2]) αποτελούν δεδομένα της σημερινής εποχής. Σε συνδυασμό με την ανάγκη μετάβασης σε εποχή μηδενικών εκπομπών αερίων ρύπων, ώστε να ανασταλεί η αύξηση της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας και η κλιματική αλλαγή, δημιουργείται ένα πρόβλημα άμεσα συνυφασμένο με την επιβίωση του πλανήτη και των κατοίκων του. Το 24% των εκπομπών CO₂ παγκοσμίως οφείλεται στις μεταφορές [3].

Ο εξηλεκτρισμός του στόλου των αυτοκινήτων, των αεροσκαφών και των πλοίων, και η τροφοδότησή τους με ενέργεια που θα προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, πυρηνικά και μελλοντικά με τη σύντηξη του υδρογόνου, θεωρείται η λύση για την επίτευξη μηδενικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου αναφορικά με τον κλάδο των μεταφορών. Η παραγωγή «πράσινης» ενέργειας, η βελτίωση της απόδοσης σε όλα τα στάδια της ηλεκτρομηχανικής μετατροπής, η αποθήκευση ενέργειας, οι εγκαταστάσεις τροφοδοσίας και τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν μερικές από τις προκλήσεις που καλούνται να αντιμετωπίσουν σήμερα οι επιστήμονες και οι μηχανικοί.

Στον τομέα των ηλεκτρικών κινητήρων, μέσα από μακροχρόνια έρευνα, έχει επιτευχθεί βαθμός απόδοσης που γενικά ξεπερνά το 95%. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, επιλέχθηκε η ενασχόληση με αυτόν τον τομέα και συγκεκριμένα, η εξέταση ζητημάτων σχεδιομελέτης ηλεκτρικών κινητήρων.



Σχ. 1 “Spirit of Innovation”, Rolls-Royce, 3x Axial flux motor (3x 790Nm, 200kW), $speed_{max} > 550\text{km/h}$



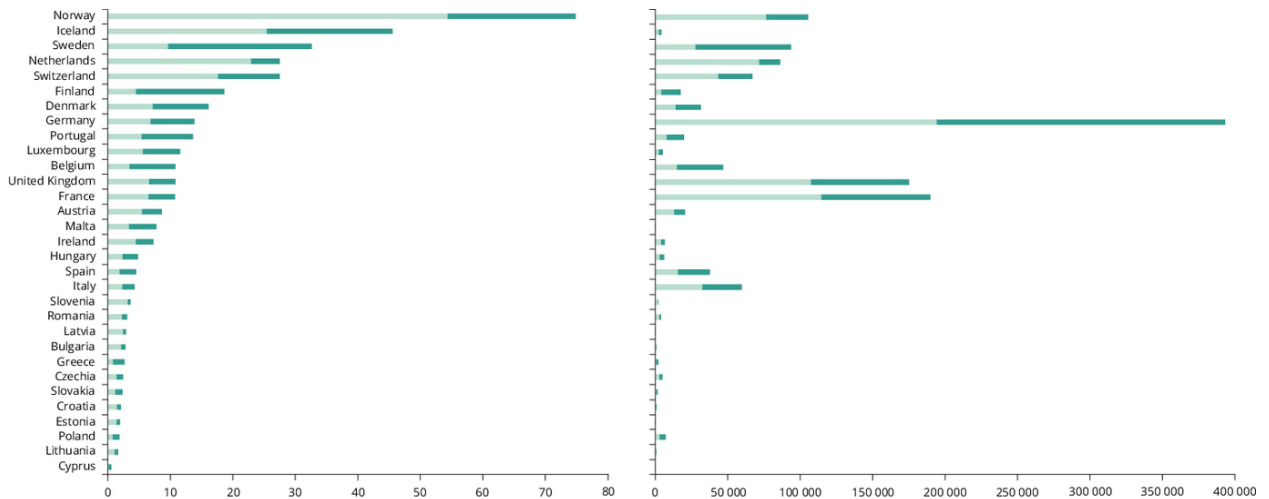
Σχ.2 “Eelex 8000”, X Shore, 225kW, $speed_{max} > 55\text{ km/h}$



Σχ.3 “Model 3”, Tesla, 340kW,
2x motors(IM + PMSM)



Σχ.4 “Cubicle”, SP Automotive,
165kW, 310Nm, 160 km/h



Σχ.5 Ποσοστά και απόλυτοι αριθμοί εγγεγραμμένων ηλεκτρικών οχημάτων για τις χώρες της ΕΕ. Με το ανοιχτό χρώμα φαίνονται τα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα, ενώ με το σκούρο τα plug-in υβριδικά οχήματα. Αριστερά φαίνεται το ποσοστό των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στο σύνολο των καταχωρημένων και δεξιά ο απόλυτος αριθμός των ηλεκτρικών αυτοκινήτων.

Σύστημα ηλεκτρικής κίνησης

Τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται ένα σύστημα ηλεκτρικής κίνησης είναι οι συσσωρευτές (μπαταρία), ο αντιστροφάας (αφού στην πλειονότητα τους οι κινητήρες είναι εναλλασσομένου ρεύματος), ο ηλεκτροκινητήρας και το σύστημα μετάδοσης της κίνησης.

Μπαταρία

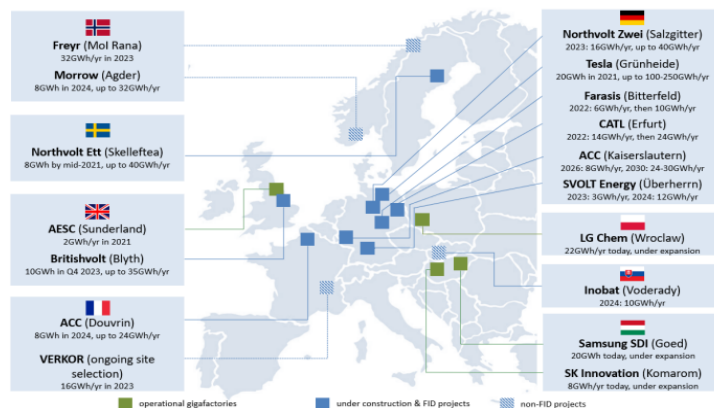
Η μπαταρία στην ηλεκτροκίνηση ως ο χώρος αποθήκευσης της ενέργειας αποτελεί το αντίστοιχο της δεξαμενής καυσίμων για τα μέχρι τώρα συμβατικά δεδομένα κίνησης. Η μπαταρία παρέχει συνεχές επίπεδο τάσης στον αντιστροφέα που με τη σειρά του θα τροφοδοτήσει τον ηλεκτροκινητήρα. Η μετατροπή από την αποθηκευμένη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική και αντίστροφα κατά τη φόρτιση πραγματοποιείται μέσω οξειδοαναγωγικής ηλεκτροχημικής αντίδρασης. Η μπαταρία στην πραγματικότητα

αποτελεί ένα άθροισμα πολλών στοιχείων - των κυψελών, δομικά στοιχεία των οποίων αποτελεί η άνοδος, η κάθοδος και ο ηλεκτρολύτης. Οι σημαντικότερες τεχνολογίες που εμφανίζονται στους συσσωρευτές είναι : μολύβδου-οξέος, νικελίου υδριδίου μετάλλου (Ni-MH), ιόντων λιθίου, Νατρίου-Χλωριδίου Νικελίου (Na/NiCl₂) με επικρατούσα αυτή των ιόντων λιθίου [4]. Πολλά υποσχόμενη τεχνολογία αποτελεί και η αποθήκευση ενέργειας με υπεραγωγίμες διατάξεις.

Η χωρητικότητα της μπαταρίας, το βάρος, ο χρόνος επαναφόρτισης, η αποδοτικότητα και η αλλοίωση των χαρακτηριστικών με το πέρασμα του χρόνου, η ζωή της μπαταρίας μετρούμενη σε κύκλους φόρτισης, η ασφάλεια και η διαχείριση της εκπεμπόμενης θερμότητας αποτελούν χαρακτηριστικά που εξετάζονται από τους μηχανικούς κατά την σχεδίαση, την παραγωγή μπαταριών και την ενσωμάτωσή τους στην ηλεκτροκίνηση. Επιπλέον, το υψηλό κόστος των μπαταριών, που ωστόσο φθίνει με τον καιρό, αποτελεί μεν, ανασχετικό παράγοντα αλλά και τον καθοριστικό δε, για την επικράτηση της ηλεκτροκίνησης στις μεταφορές.

Σημαντικά στοιχεία που απασχολούν επίσης την επιστημονική κοινότητα είναι η παρουσία βλαβερών για το περιβάλλον υλικών και η δυνατότητα ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης των μπαταριών. Δευτερεύοντα (ο χαρακτηρισμός προκύπτει αναλογιζόμενοι τα επιστημονικά ενδιαφέροντα των μηχανικών) ζητήματα αποτελούν γεωπολιτικοί και οικονομικοί παράγοντες που επηρεάζουν άμεσα τη διαθεσιμότητα και τη λειτουργία της εφοδιαστικής αλυσίδας, όπως για παράδειγμα το γεγονός ότι η πλειοψηφία της παραγωγής μπαταριών πραγματοποιείται στις ασιατικές χώρες Κίνα-Ιαπωνία-Κορέα(75% της αγοράς, η Κίνα υπεύθυνη για το 80% της παραγωγής θεικού κοβαλτίου)[5], με σημαντικές προσπάθειες, ωστόσο, για επάρκεια και αυτονομία και από την πλευρά της Ευρώπης και της Αμερικής.

Στη μελέτη του συστήματος της μπαταρίας περιλαμβάνεται και το σύστημα διαχείρισης της μπαταρίας (Battery Management System - BMS) με αποστολή να παρακολουθεί αλλά και να εξασφαλίζει την ομαλή λειτουργία της μπαταρίας.



Σχ.6 Προγράμματα Κατασκευής μπαταριών ηλεκτρικών οχημάτων στην Ευρώπη [5]

Technology	Advantages	Disadvantages
Lithium Cobalt Oxide (LiCoO ₂)	Power and energy density	Safety, cost
Nickel Cobalt and Aluminium (NCA)	Power and energy density, calendar and cycle life	Safety
Nickel Manganese Cobalt (NMC)	Power and energy density, Cycle and calendar life	Safety
Lithium Polymer (LiMnO ₄)	Power density	Calendar life
Lithium ion phosphate (LiFePO ₄)	Safety	Energy density, calendar life

Σχ.7 Τεχνολογίες Μπαταριών με Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα[6]

Αντιστροφείας

Ο αντιστροφείας είναι η μονάδα εκείνη που είναι υπεύθυνη να μετατρέπει τη συνεχή τάση που παρέχουν οι συσσωρευτές σε εναλλασσόμενη ώστε να τροφοδοτήσει τον ηλεκτροκινητήρα και αυτό διότι οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος υπερέρχονται των κινητήρων συνεχούς ρεύματος. Επιπλέον, μέσω του αντιστροφείας και κατάλληλων αλγορίθμων ελέγχου, επιτυγχάνεται ο έλεγχος του κινητήρα που πρέπει να λειτουργεί βέλτιστα παρέχοντας την απαιτούμενη ισχύ και ροπή με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά όπως καταστολή αρμονικών συνιστωσών, μικρή κυμάτωση ροπής κ.ά. και να ανταποκρίνεται γρήγορα στην αλλαγή του φορτίου.

Στην ηλεκτροκίνηση χρησιμοποιούνται διάφορες διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος με ικανότητα διαχείρισης ισχύος από μερικούς ίππους, έως και αρκετές εκατοντάδες ίπων. Ζητήματα που απασχολούν τους σχεδιαστές διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος που θα

χρησιμοποιηθούν στην ηλεκτροκίνηση είναι η αποδοτικότητα (>99.5% σε αρκετές περιπτώσεις), ο όγκος και η πυκνότητα ισχύος, το κόστος και η διαχείριση προβλημάτων διαθεσιμότητας υλικών, η πολυπλοκότητα και η αξιοπιστία. Τα μέχρι πρότινος πυριτιούχα τρανζίστορ IGBTs τείνουν να αντικατασταθούν από τρανζίστορ καρβιδίου του πυριτίου (SiC) JFET, BJT, MOSFET λόγω καλύτερης απόδοσης και δυνατότητα επίτευξης υψηλότερων διακοπτικών ταχυτήτων.[7]

Ήδη από το 2017 η αυτοκινητοβιομηχανία Τέσλα στο μοντέλο Model 3 χρησιμοποίησε τον πρώτο στην αυτοκίνηση αντιστροφέα SiC MOSFET από την STMicroelectronics.[8]

Application	Maximum voltage	Current topology on the market
Electric ships	15 kV	Two-level and multilevel
Electric trains	3 kV	Two-level and three-level
EVs	900V	Two-level

Σχ.8 Τοπολογίες αντιστροφέων που βρίσκονται αυτή τη στιγμή στην αγορά(2021) [9]

Ηλεκτροκινητήρας

Ο ηλεκτρικός κινητήρας αποτελεί το τμήμα εκείνο στο οποίο πραγματοποιείται η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική. Γενικά υπάρχει ένας στάτης που αποτελεί τη διέγερση και ένας δρομέας που αποτελεί το τύμπανο της μηχανής. Η δημιουργία και αλληλεπίδραση των μαγνητικών πεδίων διέγερσης και τυμπάνου στο διάκενο της μηχανής είναι που προκαλεί την μετατροπή της ενέργειας. Οι ηλεκτρικοί κινητήρες στις ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας μπορούν να ξεπεράσουν το 95% στο βαθμό απόδοσης σε σύγκριση για παράδειγμα με τον πολύ χαμηλότερο βαθμό απόδοσης μιας μηχανής εσωτερικής καύσης.

Γενικά μια ηλεκτρική μηχανή χρειάζεται ελάχιστη συντήρηση, υπερέχοντας μιας συμβατικής εσωτερικής καύσης και σε αυτό τον τομέα. Οι σχεδιαστές λαμβάνουν υπ'όψιν τους τα επιθυμητά χαρακτηριστικά λειτουργίας - ροπή και ταχύτητα, τη δυνατότητα υπερφορτίσεων, την πυκνότητα ισχύος, τη βέλτιστη αξιοποίηση των σπάνιων γαιών που τυχόν χρησιμοποιούνται, το κόστος, την αξιοπιστία. Αρχικά πραγματοποιείται η ηλεκτρομαγνητική ανάλυση ώστε να είναι δυνατή η επιθυμητή ανταλλαγή ενέργειας και στη συνέχεια εξετάζεται αν η κατασκευή της μηχανής είναι εφικτή αναλογιζόμενοι μηχανικούς και θερμικούς περιορισμούς.

Ο άξονας του δρομέα της μηχανής συνήθως συνδέεται με διαφορεικό σύστημα μετάδοσης της κίνησης, ενώ υπάρχουν και περιπτώσεις στην αυτοκίνηση που το διαφορικό

παραλείπεται και κάθε τροχός συνδέεται με ξεχωριστό κινητήρα. Με τον κινητήρα μπορεί να συνδέονται και κάποιοι αισθητήρες με ρόλο τον έλεγχο του κινητήρα αλλά και την έγκαιρη διάγνωση σφαλμάτων. Αν και συνήθως στην ηλεκτροκίνηση χρησιμοποιούνται επαγωγικοί κινητήρες και σύγχρονοι κινητήρες μονίμων μαγνητών, παρακάτω αναλύονται διάφοροι τύποι ηλεκτροκινητήρων καθώς ένας σχεδιαστής καλό είναι να έχει στο μυαλό του κάθε διαθέσιμη τεχνολογία.

Διαφορικό και κιβώτιο ταχυτήτων

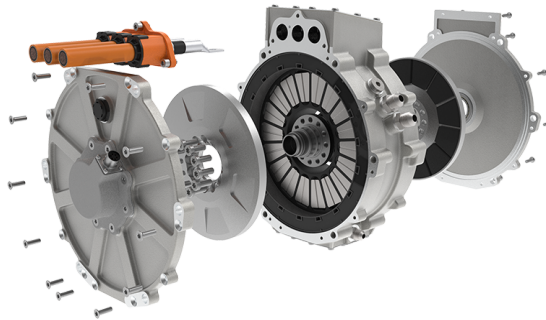
Σε αντίθεση με τους κινητήρες εσωτερικής καύσης που χρειάζονται κάποια ελάχιστη ταχύτητα για να λειτουργήσουν, οι ηλεκτροκινητήρες μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς πρόβλημα σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων αποδίδοντας την απαιτούμενη ροπή. Στην αυτοκίνηση για παράδειγμα, για λόγους αποδοτικότητας, συχνά οι ηλεκτρικοί κινητήρες μπορούν να λειτουργήσουν σε πολύ υψηλές ταχύτητες που φτάνουν τις 15-20.000 ΣΑΛ με αποτέλεσμα να υπάρχει ένα κιβώτιο ταχυτήτων μιας σταθερής σχέσης (9:1 στο Tesla Model 3, 8:1 στο Porsche Taycan). Στον πίσω άξονα των τροχών του ηλεκτρικού μοντέλου Taycan της Porsche χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά διαφορικό σύστημα δύο σχέσεων.

3. ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες ταξινομούνται σε διάφορες κατηγορίες αναλόγως το χαρακτηριστικό το οποίο μελετάται σε κάθε περίπτωση. Παρακάτω γίνεται μια προσπάθεια παρουσίασης κάποιων κατηγοριών.

Ως προς τη διεύθυνση διάδοσης της μαγνητικής ροής :

Σχεδόν σε όλους τους κινητήρες έχουμε τη μαγνητική ροή κατά την ακτινική διεύθυνση - κινητήρες ακτινικής ροής (radial flux motor) - ενώ σε κάποιες λίγες περιπτώσεις έχουμε τη μαγνητική ροή κατά μήκος του άξονα της μηχανής - κινητήρες αξονικής ροής (axial flux motor).



Σχ.9 Αξονικής ροής χωρίς σώμα στάτη κινητήρας της Magnax

Η πρώτη μηχανή του Faraday το 1831 ήταν μια μηχανή αξονικής ροής. Βασική δυσκολία που εμφανίζει αυτός ο τύπος μηχανής είναι η δυσκολία να διατηρηθεί σταθερό ένα τόσο μικρό διάκενο, σε σχέση με το μέγεθος των δίσκων δρομέα και στάτη, με αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους κατασκευής και είχε ως αποτέλεσμα την επικράτηση των μηχανών ακτινικής ροής. Μια εφαρμογή που συναντάμε μηχανές αξονικής ροής είναι σε επιτόχιους κινητήρες λόγω του μικρότερου μήκους σε σχέση με τους κινητήρες ακτινικής ροής. Επιπλέον, υπάρχει η αδυναμία ανάλυσης με χρήση δισδιάστατων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων όπως στις μηχανές ακτινικής ροής.

Μέχρι στιγμής διάφορες δημοσιεύσεις αλλά και υλοποιημένα παραδείγματα έχουν δείξει ότι οι μηχανές αξονικής ροής έχουν καλύτερο λόγο ροπής και ισχύος προς τον όγκο ή τη μάζα της μηχανής. Επικρατέστερες τοπολογίες είναι αυτές με ένα στάτη και δύο δρομείς εκατέρωθεν αυτού. Βασικό σημείο στη μείωση του όγκου είναι ότι στις μηχανές ακτινικής ροής το εσωτερικό του δρομέα συνήθως δε χρησιμοποιείται από τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που είναι υπεύθυνα για την παραγωγή ροπής.

[10]

Ως προς το πλήθος των φάσεων :

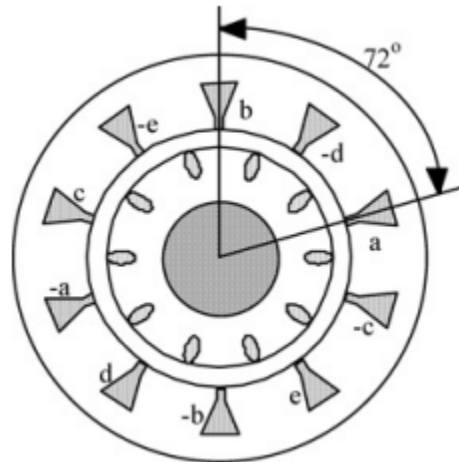
Μονοφασικοί Κινητήρες

Οι μονοφασικοί κινητήρες γενικά συναντώνται σε οικιακές και μικρές βιομηχανικές εφαρμογές. Είναι πιο απλοί στη σχεδίαση, χαμηλότερου κόστους από τις αντίστοιχες τριφασικές ενώ ακόμα, εμφανίζουν καλύτερα χαρακτηριστικά και απόδοση από τις αντίστοιχες μηχανές συνεχούς ρεύματος. Περιορισμοί στην εκκίνηση υπό πλήρες φορτίο και στην ποιότητα της ισχύος εξόδου οδήγησε στην αντικατάσταση από 3-φασικές μηχανές για εφαρμογές που είμαστε διατεθειμένοι να πληρώσουμε το αυξημένο κόστος.

Τριφασικοί Κινητήρες

Οι τριφασικοί κινητήρες ξεκινούν να χρησιμοποιούνται ήδη από τα τέλη του 19ου αιώνα. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιομηχανικές και εμπορικές εφαρμογές λόγω της υψηλής απόδοσης και δυνατότητας παραγωγής υψηλής ισχύος στην έξοδό τους. Σε σχέση με τους μονοφασικούς προσφέρουν μικρότερη κυμάτωση ροπής, καλύτερη απόδοση, εμφανίζουν καλύτερη συμπεριφορά κατά την εκκίνηση και μπορούν να διαχειριστούν καλύτερα πιο απαιτητικά φορτία, με το μειονέκτημα της αύξησης του κόστους και της πολυπλοκότητας.

Πολυφασικοί Κινητήρες



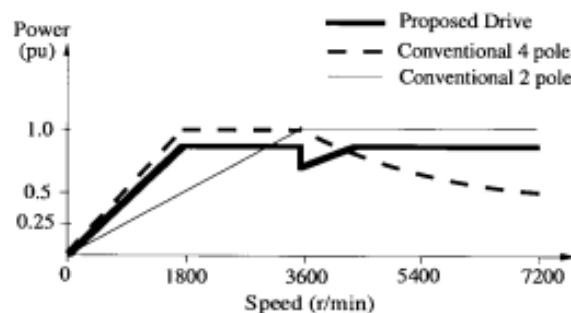
Σχ.10 Επαγωγική μηχανή 5-φάσεων συγκεντρωμένου τυλίγματος [11]

Οι πολυφασικές μηχανές σε σχέση με τις τριφασικές εμφανίζουν κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα τα οποία αρκετές φορές είναι πιο σημαντικά από τα μειονεκτήματα της αύξησης του κόστους και της πολυπλοκότητας. Τέτοια πλεονεκτήματα είναι η παραγωγή πεδίου με λιγότερες αρμονικές χώρου και άρα καλύτερη απόδοση, με λιγότερες αρμονικές στη διάσταση του χρόνου που προκαλούν ταλαντώσεις ροπής σε συχνότητες πολλαπλάσιες της θεμελιώδους συχνότητας και η καλύτερη αντοχή σε σφάλματα, καθώς

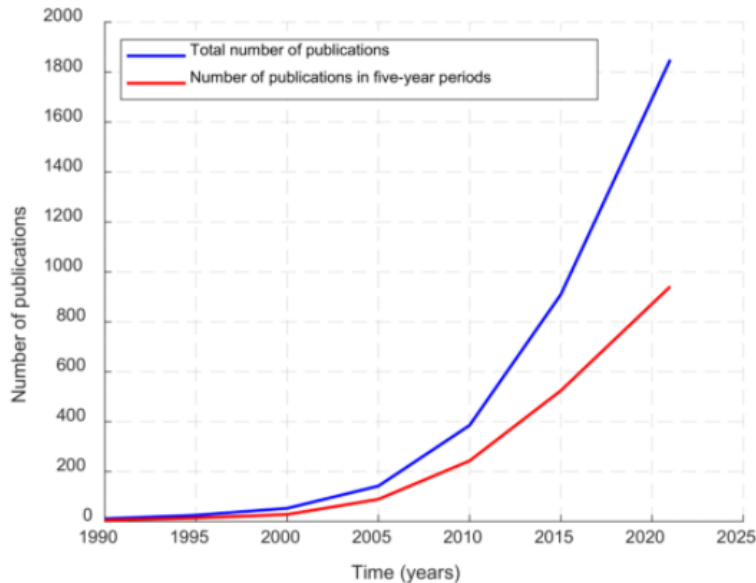
σε περίπτωση σφάλματος, μπορούμε να απομονώσουμε τη φάση που εμφανίζει βλάβη με μικρή υποβάθμιση της δυνατότητας παραγωγής ισχύος της μηχανής και να μην επηρεάζεται σημαντικά η δυνατότητα εκκίνησης. Επίσης πολυφασικές μηχανές με συγκεντρωμένο τύλιγμα μπορούν να αυξήσουν την ικανότητα παραγωγής ροπής με εισαγωγή κατάλληλων ανώτερων αρμονικών συνιστωσών ρεύματος από τον μετατροπέα.

Στις περισσότερες σύγχρονες εφαρμογές, η μηχανή δε συνδέεται απευθείας με το τριφασικό δίκτυο αλλά με την πηγή τροφοδοσίας μέσω μετατροπέων ισχύος, επομένως η οδήγηση πολυφασικών μηχανών είναι υλοποιήσιμη με την προϋπόθεση της σχεδίασης κατάλληλων μετατροπέων ισχύος. Τέτοιοι πολυφασικοί μετατροπείς ισχύος έχουν επιπλέον το πλεονέκτημα της βελτίωσης των χαρακτηριστικών του θορύβου και για τη διαμόρφωσή τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν ηλεκτρονικά ισχύος με μικρότερη ονομαστικής ισχύ σε σχέση με τους αντίστοιχους τριφασικούς μετατροπείς. Η προτίμηση των τριφασικών κινητήρων, όμως γίνεται κυρίως για λόγους οικονομίας καθώς η μαζική παραγωγή και η τυποποίηση των τριφασικών μηχανών κρατάει χαμηλό το κόστος ανά μονάδα.

Σήμερα χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές πρόωσης πλοίων, ανεμογεννήτριες. Επιπλέον, η δυνατότητα σχεδίασης μηχανής μεταβλητών πόλων, με την απαίτηση βέβαια της υλοποίησης πολυπλοκότερου ελέγχου, μπορεί να οδηγήσει σε μηχανές με διευρυμένη περιοχή λειτουργίας, που είναι σημαντικό για εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων, τρένων, αεροδιαστημικής, αντλιών ανθεκτικών σε σφάλματα και βοηθητικών συστημάτων αεροπλάνων. Συγκεκριμένη εφαρμογή, είναι η περίπτωση φορτηγών που απαιτούν υψηλή ροπή εκκίνησης αλλά η ονομαστική περιοχή λειτουργίας που θέλουμε μέγιστη απόδοση είναι σε υψηλές ταχύτητες κίνησης.
[11],[12]



Σχ.10 Παράδειγμα διεύρυνσης της περιοχής λειτουργίας με μεταβολή του αριθμού των πόλων
Στο σχήμα γίνεται σύγκριση της ικανότητας παροχής ισχύος μεταξύ μηχανής επαγωγής μεταβλητού αριθμού πόλων και 2-πολικής και 4-πολικής μηχανής. [13]



Σχ.11 Εξέλιξη των δημοσιεύσεων σχετικά με πολυφασικές μηχανές [14]

Ειδικότερα για τους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος :

Σύγχρονοι Κινητήρες

Στους σύγχρονους κινητήρες ο δρομέας περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα του πεδίου του στάτη. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλής ισχύος και απόδοσης που απαιτείται ακριβής έλεγχος της ταχύτητας. Οι σύγχρονοι κινητήρες είναι είτε μονίμων μαγνητών για τη διαμόρφωση του πεδίου στο δρομέα, είτε διαθέτουν τύλιγμα με δυνατότητα διέγερσης στο δρομέα. Παρά το υψηλότερο κόστος, λόγω των πλεονεκτημάτων τους (απόδοση, έλεγχος ταχύτητας και ροπής) θεωρούνται καλύτερη επιλογή από τους ασύγχρονους κινητήρες.

Οι σύγχρονοι κινητήρες μαγνητικής αντίστασης έχουν κατάλληλα διαμορφωμένο δρομέα που εκμεταλλεύεται την αντίσταση του αντίστοιχου μαγνητικού κυκλώματος δημιουργώντας την κατάλληλη ροπή. Πρόκειται για απλή, φθηνή σχετικά λύση καθώς δε χρησιμοποιεί σπάνιες γαίες στο δρομέα αλλά έχει χαμηλή πυκνότητας ισχύος. Επιπλέον, υπάρχουν σύγχρονοι κινητήρες που είτε δε διαθέτουν καθόλου εξωτερική διέγερση είτε διαθέτουν διέγερση από εξωτερική πηγή συνεχούς ρεύματος.

Μια ιδιαίτερη κατηγορία σύγχρονων κινητήρων είναι οι κινητήρες υστέρησης που ο δρομέας αποτελείται από μαγνητικό υλικό που εμφανίζει απώλειες υστέρησης με αποτέλεσμα να αναπτύσσεται ροπή υστέρησης που είναι σταθερή σε όλες τις ταχύτητες αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολύ μικρές εφαρμογές λόγω χαμηλής απόδοσης, συντελεστή ισχύος και ροπής.

Επαγωγικοί Κινητήρες

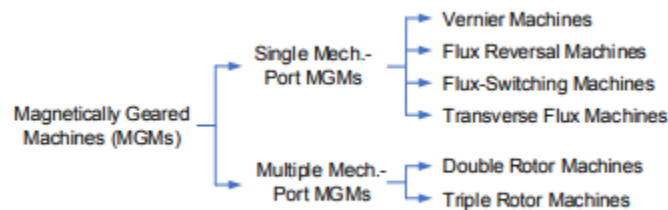
Οι μονοφασικοί κινητήρες επαγωγής χρησιμοποιούνται κυρίως σε μικρές οικιακές εφαρμογές εξαιτίας της απλής σχεδίασης, του χαμηλού κόστους και της ευκολίας εγκατάστασης. Για τη λειτουργία τους χρησιμοποιούν μόνο μια φάση εναλλασσόμενου ρεύματος και έτσι εμφανίζουν χαμηλή απόδοση, ισχύ εξόδου και ροπή εκκίνησης. Έτσι, για εφαρμογές με μεγαλύτερες απαιτήσεις σε ισχύ, χρησιμοποιούνται τριφασικοί κινητήρες. Οι τριφασικοί επαγωγικοί κινητήρες συναντώνται ευρέως σε βιομηχανικές και εμπορικές εφαρμογές λόγω της αξιοπιστίας τους και του χαμηλού τους κόστους. Το τυλίγμα του δρομέα διεγείρεται με τη δημιουργία πεδίου εξ επαγωγής από το πεδίο του στάτη το οποίο και προσπαθεί να αντιγράψει. Λόγω της καθυστέρησης μεταξύ των δύο πεδίων έχουμε την ανάπτυξη της ροπής.

Οι δύο τύποι μηχανών που απαντώνται είναι και τύπου βραχυκυκλωμένου δρομέα και τύπου δρομέα κλωβού. Οι βραχυκυκλωμένου δρομέα είναι οι πιο συνήθεις κινητήρες επαγωγής. Αποτελούνται από ένα κυλινδρικό κέλυφος από μπάρες χαλκού ή αλουμινίου που ενώνονται στην άκρη τους και αποτελούν οικονομική λύση και χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις συντήρησης.

Οι κινητήρες κλωβού αποτελούνται από τυλίγματα γύρω από τον εσωτερικό κυλινδρικό δρομέα. Τα τυλίγματα αυτά είναι συνδεδεμένα με εξωτερικές αντιστάσεις επιτρέποντας τη μεταβολή της αντίστασης του κυκλώματος του δρομέα. Είναι πιο ακριβοί από τους αντίστοιχους του βραχυκυκλωμένου δρομέα και απαιτούν συχνότερη συντήρηση.

Μηχανές Μαγνητικού Διαφορικού

Μια ιδιαίτερη κατηγορία μηχανών, όχι πολύ συνηθισμένη, αλλά που παρουσιάζει μεγαλύτερη ερευνητική ενασχόληση τα τελευταία χρόνια, αποτελεί η κατηγορία των μηχανών με χρήση μαγνητικού αντίστοιχου, των μηχανικών γραναζιών για τη μετάδοση της κίνησης. (Magnetically Geared Machines - MGMs).



Σχ.12 Κατηγοριοποίηση Μηχανών Μαγνητικού Διαφορικού [16]

Μηχανές Vernier

Οι απώλειες ενέργειας που εισάγονται με τη χρήση κιβωτίου ταχυτήτων αλλά και τα ζητήματα αξιοπιστίας, καθώς το διαφορικό του κινητήρα, λόγω των μηχανικών καταπονήσεων, έχει μικρότερο χρόνο ζωής από τον ίδιο τον ηλεκτρικό κινητήρα, ωθούν στη διερεύνηση πιθανών εναλλακτικών εφαρμογών.

Οι μηχανές Vernier αποτελούν μια λύση σε αυτό το πρόβλημα για εφαρμογές χαμηλών ταχυτήτων και απαίτηση υψηλής ροπής με απευθείας οδήγηση του κινητήρα, αφού για δεδομένο όγκο κάποιες τοπολογίες μπορούν να παράγουν ροπή 2-3 φορές υψηλότερη σε σχέση με ένα συμβατικό κινητήρα.

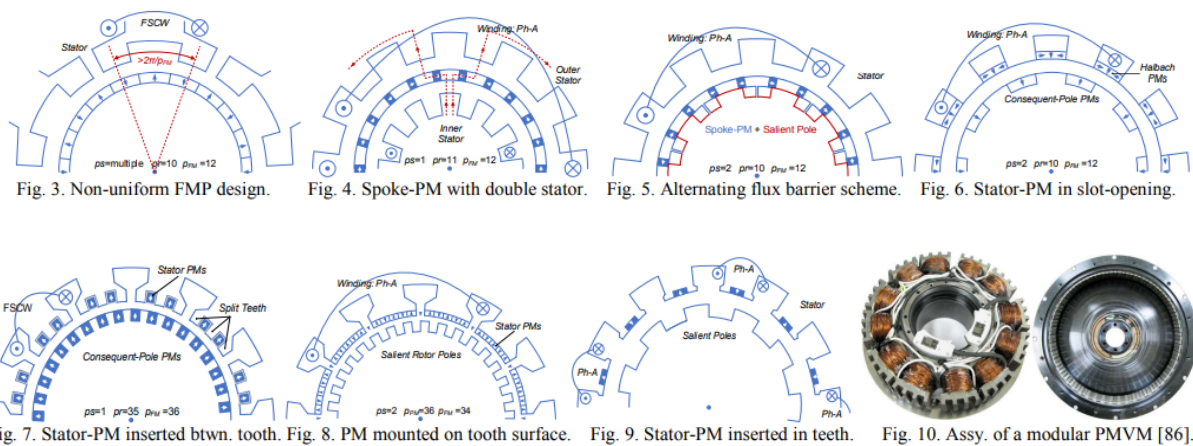
Η δυνατότητα αυξημένης παραγωγής ροπής (+40% κατά μέσο όρο σε σχέση με τις παραδοσιακές μηχανές μονίμων μαγνητών) οφείλεται σε φαινόμενα αλληλεπίδρασης του αρμονικού περιεχομένου των μαγνητών του δρομέα με το αρμονικό περιεχόμενο της ΜΕΔ των πηνίων των αυλάκων.[15]

Ετσι, θεωρούνται δυνατές εναλλακτικές για πληθώρα εφαρμογών όπως

- η αξιοποίηση της ενέργειας των κυμάτων της θάλασσας ~0.5 m/s, >1 MW
- Ανεμογεννήτριες , 15-30 ΣΑΛ, 10 kW - 5 MW
- Επιτρόχιοι κινητήρες οχημάτων (hub-wheel) , 75 kW, 500-1800 ΣΑΛ
- Φακοί αυτόματης εστίασης αξονικής ροής <100 ΣΑΛ, 1~2 W
- Γραμμικές γεννήτριες χωρίς έμβολα (Free-piston linear generator) 10~20m/s, ~10 kW.

Η έρευνα πάνω σε αυτές τις μηχανές επικεντρώνεται στην εξεύρεση τοπολογιών υψηλής πυκνότητας ροπής, υψηλότερου συντελεστή ισχύος και χαμηλότερου κόστους με περιορισμό της χρήσης σπανίων γαιών.

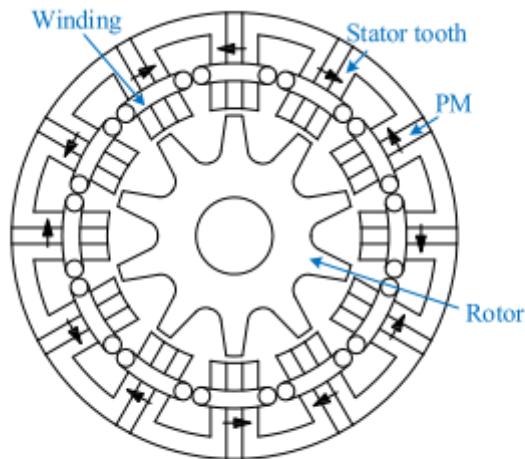
Χαρακτηριστικό των μηχανών αυτών αποτελεί η σχέση μετάδοσης που ορίζεται ως ο λόγος του αριθμού ζεύγους πόλων του δρομέα προς τον αντίστοιχο για το στάτη. Τα τρία χαρακτηριστικά μιας μηχανής Vernier αποτελούν η σχεδίαση του δρομέα, οι πόλοι διαμόρφωσης ροής (flux modulation poles - FMPs) και ο τρόπος διαμόρφωσης του τυλίγματος της μηχανής.



Σχ.13 Παραδείγματα μηχανών Vernier [16]

[16]

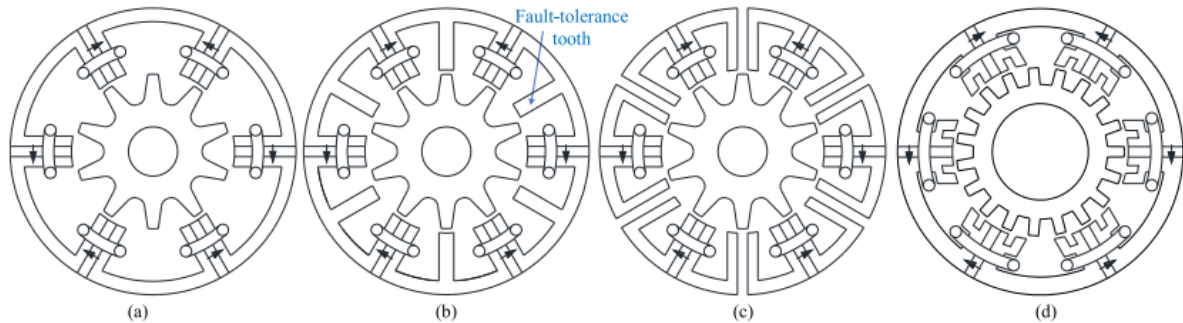
Μηχανές Μεταβαλλόμενης Ροής (Flux-Switching)



Σχ.14 Παράδειγμα Μηχανής μεταβαλλόμενης ροής με 12 πόλους στο στάτη και 10 οδοντώσεις στο δρομέα (12/10 p). [17]

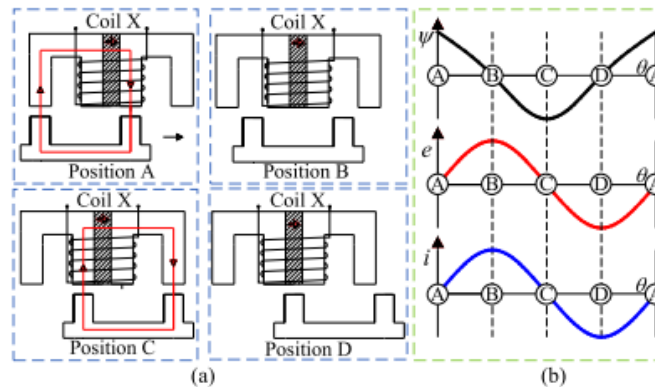
Όπως και οι μηχανές Vernier, οι μηχανές μεταβαλλόμενης ροής μόνιμων μαγνητών παρουσιάζουν αυξανόμενο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια, λόγω πλεονεκτημάτων όπως υψηλή πυκνότητα ροής λόγω των φαινομένων συγκέντρωσης της ροής, καλή διαχείριση της παραγόμενης θερμότητας, καθώς οι μαγνήτες βρίσκονται στο στάτη με σχετική ασφάλεια αναφορικά με ζητήματα απομαγνήτισης και καταλληλότητας για εφαρμογές υψηλών στροφών, λόγω της εύρωστης σχεδίασης του δρομέα ως ένα σώμα σιδήρου, δηλαδή χωρίς τους περιορισμούς που εισάγουν οι φυγόκεντρες δυνάμεις στις κλασικές μηχανές.

Σε σχέση με άλλες μηχανές με μαγνήτες στο στάτη, οι μηχανές εναλλασσόμενης ροής παρουσιάζουν καλύτερη πυκνότητα ροπής και ισχύος και πιο ημιτονοειδή αντί-ΗΕΔ. Στα αρνητικά περιλαμβάνεται ο μειωμένος χώρος για τυλίγματα στα αυλάκια του στάτη λόγω της κατάληψης χώρου από τους μαγνήτες, το υψηλότερο κόστος από τη χρήση μεγαλύτερης ποσότητας μαγνητών και κατασκευαστικές δυσκολίες λόγω της ιδιαίτερης διαμόρφωσης του στάτη. Επίσης εμφανίζουν υψηλή κυμάτωση ροπής λόγω της δομής διπλής εκτυπότητας και της υψηλής πυκνότητας ροής με την εμφάνιση φαινομένων κορεσμού στο μαγνητικό κύκλωμα.



Σχ.15 Παραδείγματα Τοπολογιών μηχανών μεταβαλλόμενης ροής. [17]

Ενδεικτικά παρουσιάζονται κάποιες τοπολογίες για FSPM που αναφέρονται στη δημοσίευση από την οποία αντλούνται οι πληροφορίες.



Σχ.16 Αρχή λειτουργίας μηχανών μεταβαλλόμενης ροής. [17]

Στο σχήμα φαίνεται η λειτουργία της μηχανής ως γεννήτριας. Η λειτουργία ως κινητήρας στηρίζεται όπως και οι μηχανές Vernier στο φαινόμενο μαγνητικού διαφορικού “magnetic gearing effect” που αποτελεί το αντίστοιχο του μηχανικού γρναζιού με το πλεονέκτημα ότι δεν έχουμε την φθορά που αυτό υφίσταται αλλά παρουσιάζεται το μειονέκτημα αύξησης του κόστους. Ο στόχος είναι μια μικρή μετακίνηση του δρομέα να προκαλέσει μεγάλη μεταβολή της μαγνητικής ροής και υψηλή παραγωγή ροπής. Η αλληλεπίδραση των μαγνητών πολλαπλασιάζει ή διαιρεί αντίστοιχα τον αριθμό των

στροφών και τη ροπή μεταξύ των δύο στρεφόμενων τμημάτων (του δρομέα της μηχανής και του τμήματος στο οποίο μεταφέρεται η κίνηση). [17], [18]

	Surface-mounted PMSM	Interior PMSM	FSPM machine	DSPM machine	FRPM machine
PMs location	Mounted on surface of the rotor	Inserted into the rotor	Sandwiched by stator teeth	Inserted into stator back-iron	Mounted on surface of stator teeth
Ease of manufacturing	Easy	Relatively difficult due to the inserted PMs	Most difficult due to the stator complexity	Relatively difficult due to the inserted PMs	Easy
Phase flux	Unipolar	Unipolar	Bipolar	Unipolar	Bipolar
EMF waveform	Sinusoidal	Sinusoidal	Inherently sinusoidal	Trapezoidal	Trapezoidal
Speed range	PM retention is needed for high-speed applications	High-speed is limited due to the low rotor mechanical strength	Particularly suitable for high-speed applications	Suitable for high-speed applications	Suitable for high-speed applications
Cogging torque	Medium	Medium	Maximum	Minimum	Medium
Torque density	Relatively high	High due to the additional reluctance torque	Comparable to PMSMs	Minimum	Medium
Power density (with the same speed)	Relatively high	High due to the additional reluctance torque	Comparable to PMSMs	Minimum	Medium
Over-load capability	Maximum due to low level of saturation	Relatively high	Minimum due to high level of saturation	Medium	Medium
Flux-weakening capability	Low with distributed windings but high with FSCWs	High due to the additional reluctance torque	Maximum due to high d -axis inductance	Medium	Medium
Demagnetization withstand capability	Low since the PMs are directly face to the armature field	Medium	High since the armature reaction flux does not pass through the PMs	High (the reason is similar to that of FSPM machines)	Low since the armature MMF is in series with that of PMs
Fault-tolerance capability	Relatively low	Minimum	Maximum due to physical and magnetic interphase isolation and robust rotor structure	Relatively high	Medium
Efficiency	Maximum	Relatively high	High	Relatively high due to the FSCWs	Relatively high due to the FSCWs
Control mode	BLAC	BLAC	BLAC	BLDC	BLDC

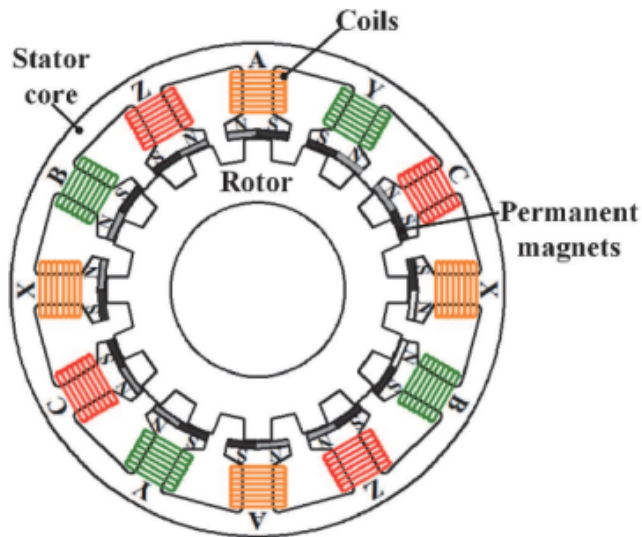
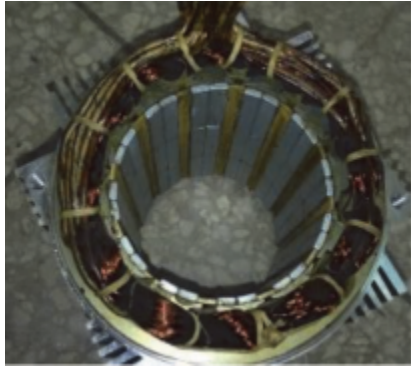
Σχ.17 Συγκριτική καταγραφή χαρακτηριστικών μηχανών μόνιμων μαγνητών. [17]

Στον πίνακα γίνεται συγκριτική καταγραφή των διαφόρων χαρακτηριστικών που μπορεί να έχει ένας κινητήρας ο οποίος περιέχει μόνιμους μαγνήτες όπως ικανότητα ανοχής σε σφάλματα, πυκνότητα ισχύος, απόδοση και άλλα.

Μηχανές ανάστροφης ροής (Flux Reversal Machines)

Οι μηχανές αυτές έχουν, όπως και οι μηχανές μεταβαλλόμενης ροής, μαγνήτες στο στάτη. Η διαφορά είναι ότι οι μαγνήτες βρίσκονται τοποθετημένοι στο εσωτερικό των δοντιών του στάτη και σε σχέση με τις άλλες μηχανές με μαγνήτες στο στάτη, σε αυτή την περίπτωση έχουμε πιο απλή και εύρωστη κατασκευή με εύκολη τοποθέτηση των μαγνητών και χωρίς να μειώνεται ο διαθέσιμος χώρος για το τύλιγμα διέγερσης στα αυλάκια.

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται πόσο απλός είναι ο δρομέας και πόσο πολύπλοκος είναι ο στάτης για τον συγκεκριμένο τύπο μηχανής και αντίστοιχα και η διαδικασία κατασκευής τους.



Σχ.18 Παράδειγμα δρομέα και στάτη μηχανής ανάστροφης ροής (flux reversal machine). [19]

Ειδικοί Ηλεκτρικοί Κινητήρες

Επίσης υπάρχουν ειδικοί τύποι ηλεκτρικών κινητήρων που είναι παραλλαγές των κύριων κατηγοριών που είδαμε παραπάνω και έχουν σχεδιαστεί για ειδικές εφαρμογές. Παράδειγμα είναι οι σερβοκινητήρες, οι βηματικοί κινητήρες, οι universal κινητήρες, κινητήρες χωρίς σώμα στάτη και πολλοί άλλοι με ιδιαιτερότητες.

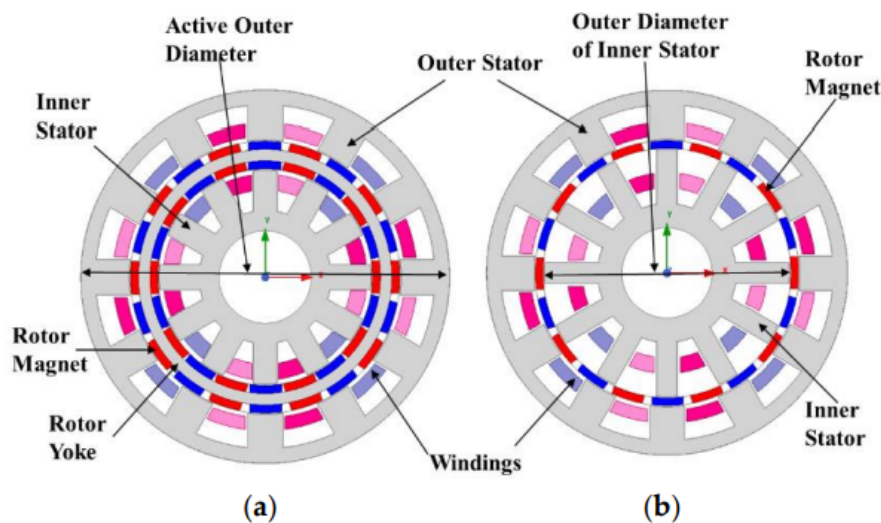
- Οι σερβοκινητήρες λειτουργούν επιτρέποντας περιστροφή κατά μία συγκεκριμένη γωνία.

- Στους βηματικούς κινητήρες μια πλήρης περιστροφή χωρίζεται σε έναν αριθμό ίσων βημάτων αντί να περιστρέφεται συνεχώς παρέχοντας μεγάλη ακρίβεια.
- Οι universal κινητήρες μπορούν να λειτουργήσουν και με συνεχές και με εναλλασσόμενο ρεύμα.

Επιπλέον, στη βιβλιογραφία εμφανίζονται μηχανές με **περισσότερους** από έναν στάτη ή δρομέα. Η δημιουργία γεωμετριών με πιο περίεργο απ' ό τι συνήθως σχέδιο προσφέρει κάποια βελτίωση σε ορισμένα επιθυμητά χαρακτηριστικά με το μειονέκτημα της αύξησης πολυπλοκότητας ή υποβάθμισης άλλων χαρακτηριστικών.

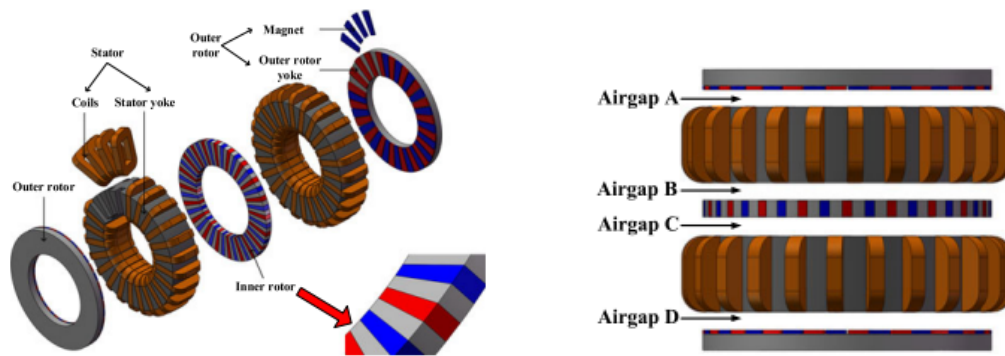
Παρατίθενται δύο παραδείγματα από δημοσιεύσεις :

Στη μηχανή της δημοσίευσης [20] σχεδιάζεται μηχανή με στόχο την αύξηση της αποδιδόμενης ροπής προς τον όγκο των μαγνητών που χρησιμοποιούνται για εφαρμογή μηχανής χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων, με υψηλή ροπή σε χαμηλές στροφές.



Σχ.19 Μηχανή Vernier με διπλό στάτη-διάκενο και δρομέα με (α) και χωρίς(β) σώμα σιδήρου. [20]

Στη μηχανή της δημοσίευσης [21] (μηχανή Vernier τριπλού δρομέα αξονικής ροής ακτινικών μονίμων μαγνητών) παρουσιάζεται ένα σύνθετο φαινόμενο σε μηχανές αξονικής ροής, που είναι ο συνδυασμός περισσότερων από ενός στάτη και δρομέα με στόχο την αύξηση της παραγόμενης ισχύος και ροπής με μικρότερη αύξηση του τελικού όγκου της μηχανής και χωρίς την ανάγκη δημιουργίας πολλών σχεδίων. Με κατάλληλη άθροιση ενός βασικού σχεδίου μηχανής δύο, τρεις ή και περισσότερες φορές επιτυγχάνονται οι απαιτήσεις σε ροπή και ισχύ. Η μηχανή αυτή εξαλείφει πολλά μειονεκτήματα των μηχανών Vernier, παρέχοντας παράλληλα υψηλό συντελεστή ισχύος, μεγάλη πυκνότητα ισχύος και ροπής, υψηλή αξιοποίηση του χαλκού και αυξημένη απόδοση ως συνέπεια.



Σχ.20 Διαμόρφωση μηχανής Vernier αξονικής ροής τριπλού δρομέα. [21]

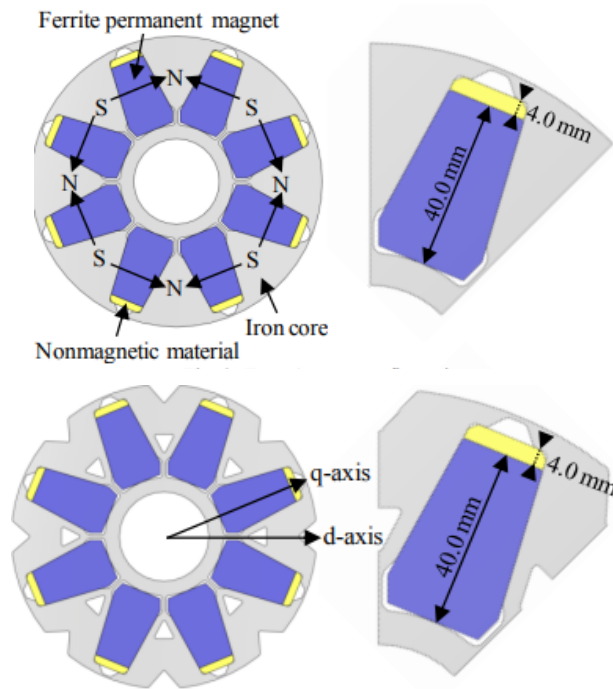
Γενικά, σε εφαρμογές αυτοκίνησης χρησιμοποιούνται λύσεις που περιλαμβάνουν μόνιμους μαγνήτες καθώς προσφέρουν κινητήρες με υψηλή πυκνότητα ισχύος και υψηλή απόδοση. Η αύξηση του κόστους των πιο προηγμένων υλικών αποτελεί πάντα μια αφορμή για αναζήτηση εναλλακτικών λύσεων και νέων σχεδίων κινητήρων. Ένα παράδειγμα αναφέρεται στη δημοσίευση που παρουσιάζεται παρακάτω.

Όπως αναφέρεται και προηγουμένως, οι δυσκολίες στην προμήθεια μαγνητών σπανίων γαιών αυξάνουν το ενδιαφέρον της σχεδίασης μηχανών με χρήση φερρίτη για τους μόνιμους μαγνήτες. Οι φερρίτες εμφανίζουν μικρότερη παραμένουσα μαγνήτιση σε σχέση με τους μαγνήτες σπανίων γαιών (Νεοδυμίου ή Σαμαρίου-Κοβαλτίου) επομένως θα απαιτηθεί μεγαλύτερη ποσότητα μαγνητών για να καλυφθεί η μείωση στην παραγωγή ροπής και ίσως μια προσπάθεια για παραγωγή ροπής από κατάλληλη διαμόρφωση που αξιοποιεί τη μαγνητική υστέρηση.

Επιπλέον ζητήματα που προκύπτουν είναι η αντοχή σε φαινόμενα απομαγνήτισης λόγω της χαμηλότερης μαγνητοαντίστασης (coercivity) του φερρίτη και η αντοχή του δρομέα στις μηχανικές καταπονήσεις λόγω του όγκου των μαγνητών που χρησιμοποιούνται και της ύπαρξης λεπτότερων γεφυρών στο σώμα σιδήρου του δρομέα.

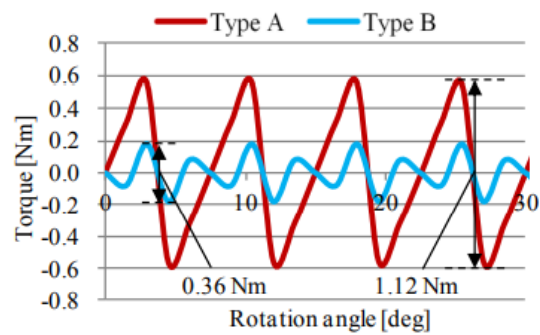
Στη δημοσίευση [22] δίνεται ένα παράδειγμα σύγκρισης και υλοποίησης δύο δρομέων μηχανής για εφαρμογή αυτοκίνησης με χρήση φερριτών.

Οι δύο γεωμετρίες που εξετάζονται :

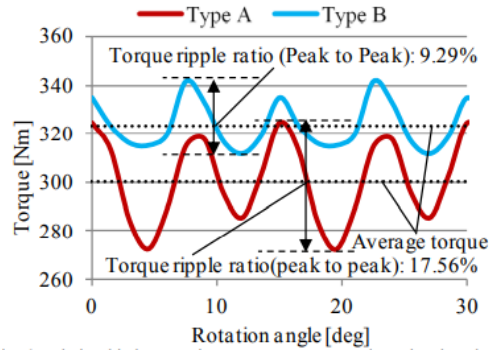


Σχ.21 Διαμόρφωση δρομέα A και B. [22]

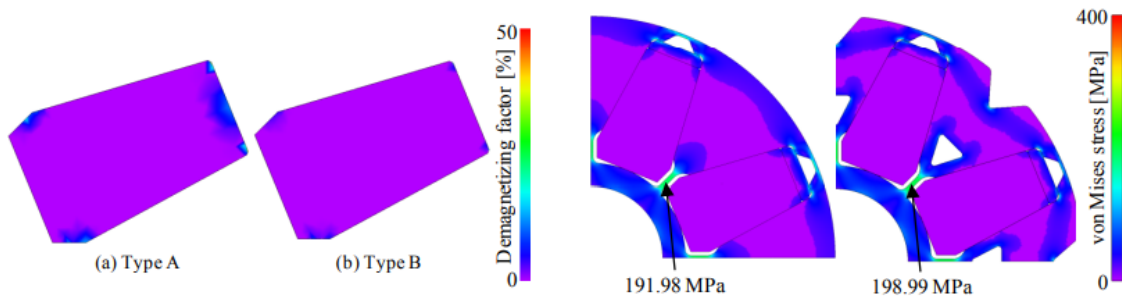
Συγκεκριμένα γίνεται σύγκριση των επιδόσεων της γεωμετρίας που προτείνεται με τον κινητήρα δεύτερης γενιάς του οχήματος Prius της αυτοκινητοβιομηχανίας Toyota (320 Nm, 50kW).



Σχ.22 Σύγκριση κυμάτωσης ροπής σε λειτουργία χωρίς φορτίο για τους τύπους A και B. [22]



Σχ.23 Σύγκριση κυμάτωσης ροπής σε μέγιστη φόρτιση. [22]



Σχ.24 Σύγκριση των δύο τύπων A και B σε φαινόμενα απομαγνήτισης στους μαγνήτες και μηχανικής τάσης στο δρομέα. [22]

Λεπτομέρειες που έχουν ενδιαφέρον είναι η χρήση του μη μαγνητικού υλικού για μείωση της απομαγνήτισης και η αύξηση στη ροπή μαγνητικής αντίστασης με τη χρήση των τριγώνων κενού στη γεωμετρία.

Ο έλεγχος απομαγνήτισης, μηχανικής αντοχής, κυμάτωσης ροπής με και χωρίς και φορτίο που φαίνεται στις προηγούμενες εικόνες από την ίδια δημοσίευση δείχνει ότι η λύση που προτείνεται, με χρήση ελεύθερων από σπάνιες γαίες μαγνητών, είναι εφικτή σε πραγματική εφαρμογή.

4. ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΑΡΧΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ

Η ηλεκτρομαγνητική ανάλυση είναι η βάση της μελέτης μιας ηλεκτρικής μηχανής καθώς η έξοδος (ροπή, ταχύτητα, ισχύς) είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων στάτη και δρομέα. Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία περιγράφονται πλήρως από τις τέσσερις εξισώσεις του Maxwell (παρουσιάζουμε τη διαφορική μορφή των εξισώσεων ως πιο γενική καθώς στην ολοκληρωτική για τον πλήρη χαρακτηρισμό θα πρέπει να συμπεριλάβουμε σημειακά, επιφανειακά και χωρικά χαρακτηριστικά) :

- $\nabla * H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$ ή νόμος του Ampere, που περιγράφει τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου από μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο
- $\nabla * E = - \frac{\partial B}{\partial t}$ ή νόμος επαγωγής του Faraday, που περιγράφει τη δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου από ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο
- $\nabla * B = 0$ ή νόμος του Gauss για το μαγνητισμό που περιγράφει ότι η μαγνητική ροή είναι κυκλική χωρίς αρχή και τέλος
- $\nabla * D = \rho$ ή νόμος του Gauss για τον ηλεκτρισμό που περιγράφει την ηλεκτρική πεδιακή ροή από ένα θετικά φορτισμένο πόλο σε έναν αρνητικά φορτισμένο.

Τα μεγέθη που δομούν τις εξισώσεις αυτές είναι :

- η ένταση του μαγνητικού πεδίου H με μονάδες [A/m] ,
- η πυκνότητα του ρεύματος J με μονάδες [A/m²] ,
- η διηλεκτρική μετατόπιση D ή πυκνότητα ροής ηλεκτρικού πεδίου με μονάδες [C/m²] ,
- η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου E με μονάδες [V/m] ,
- η μαγνητική επαγωγή η πυκνότητα ροής μαγνητικού πεδίου B με μονάδες [V*s/m²], [Wb/m²], [T], [10⁴ Gauss] ,
- το συνολικό φορτίο ρ με μονάδες [C] .

Για την αρχική μελέτη των ηλεκτρικών μηχανών δε μελετώνται μεταβατικά φαινόμενα και θεωρούμε ότι τα χαρακτηριστικά των ρευμάτων ή των μαγνητών που προκαλούν τα μαγνητικά πεδία δεν αλλάζουν, επομένως οι χρονομεταβλητοί όροι μπορούν να παραλειφθούν και έτσι η σχεδίαση της μηχανής αφορά, ουσιαστικά, στη μαγνητοστατική της ανάλυση, δηλαδή.

Η μαγνητική επαγωγή συνδέεται με την ένταση του μαγνητικού πεδίου μέσα από τη σχέση

$$B = \mu \cdot H + M,$$

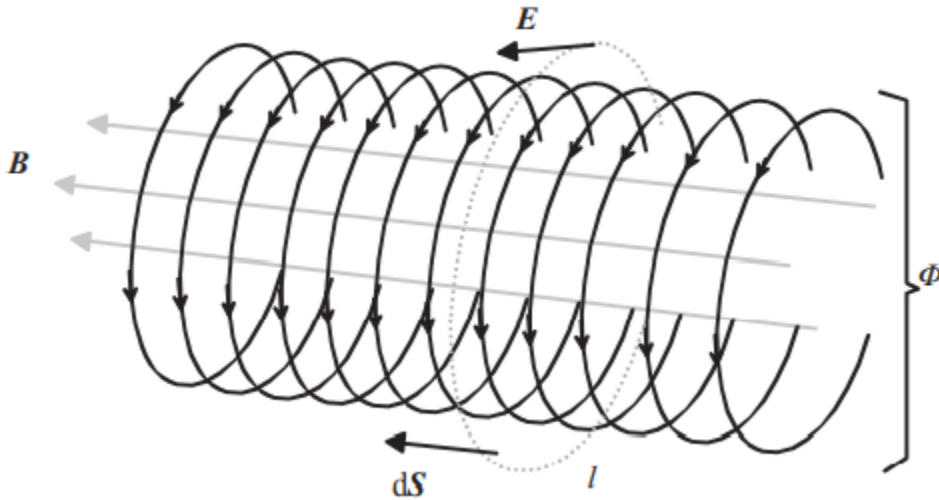
όπου το μ είναι η μαγνητική διαπερατότητα, και το M η μαγνήτιση.

Τα μ , M είναι χαρακτηριστικά του υλικού και εξαρτώνται από τις ιδιότητες του υλικού και τη λειτουργική κατάσταση που εξετάζουμε.

Το ολοκλήρωμα της μαγνητικής επαγωγής δίνει τη μαγνητική ροή Φ με μονάδες το Wb που διέρχεται από μια επιφάνεια :

$$\Phi = \oint_S B dS .$$

Αν θεωρήσουμε πηνίο που διέρχεται γύρω από την επιφάνεια αυτή S , τότε στα άκρα κάθε σπείρας του πηνίου επάγεται τάση ανάλογη με το ρυθμό μεταβολής της ροής του πεδίου $e = -d\Phi/dt$ με το μείον να συμβολίζει την αντίσταση στη μεταβολή της ροής. Η τάση στα άκρα του πηνίου θα ισούται με $-N \cdot d\Phi/dt$. Ο όρος πεπλεγμένη ροή $\Psi = k_w \cdot N \cdot \Phi$, χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη ροή που δημιουργούν οι σπείρες του πηνίου. Η ευκολία δημιουργίας μαγνητικού πεδίου από τη διέλευση ρεύματος από τον αγωγό περιγράφεται με την αυτεπαγωγή $L = d\Psi(t)/di(t)$.



Σχ.25 Μαγνητική επαγωγή και ροή που δημιουργείται από σπείρες πηνίου σε αγωγό. [36] σελ.3

5. ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Σήμερα η άρτια μελέτη και σχεδίαση μιας ηλεκτρικής μηχανής οφείλει να περιλαμβάνει ηλεκτρομαγνητική, μηχανική και θερμική ανάλυση και να βελτιστοποιείται λαμβάνοντας υπ' όψιν την αλληλεπίδραση και των τριών αυτών παραμέτρων-σταδίων.

Τις προηγούμενες δεκαετίες το ζήτημα της βελτιστοποίησης της απόδοσης ή του όγκου ή άλλων παραμέτρων μιας ηλεκτρικής μηχανής δεν είχε τόσο μεγάλη σημασία, με αποτέλεσμα να οδηγούμαστε σε υπερδιαστασιοποιημένες μηχανές που αρκούσε να ικανοποιούν τις απαιτήσεις σε ροπή και ισχύ άρα και η σχεδίαση περιοριζόταν στην ηλεκτρομαγνητική ανάλυση μιας μηχανής, ίσως και λόγω έλλειψης των κατάλληλων υπολογιστικών εργαλείων αλλά και του γεγονότος πως η μηχανική και θερμική ανάλυση αποτελούν κυρίως αντικείμενο των μηχανολόγων μηχανικών.

Ηλεκτρομαγνητική ανάλυση

Στόχος της ηλεκτρομαγνητικής ανάλυσης είναι η ανάλυση της αλληλεπίδρασης των ηλεκτρικών μεγεθών του ρεύματος που εγχέεται στη μηχανή και στα μαγνητικά πεδία που διαμορφώνονται στη μηχανή και είναι υπεύθυνα για την παραγωγή της ροπής και της ισχύος στην έξοδο της μηχανής. Η ηλεκτρομαγνητική ανάλυση είναι καθοριστική στην κατανόηση και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς και της απόδοσης της μηχανής.

Η παραγόμενη ροπή είναι ο καθοριστικός παράγοντας που προκαλεί την περιστροφική κίνηση της μηχανής. Η δύναμη αυτών των πεδίων είναι ανάλογη του ρεύματος που ρέει στα τυλίγματα της μηχανής. Με τον έλεγχο της τάσης, του ρεύματος και της συχνότητας του ρεύματος που εγχέεται μπορούμε να ελέγξουμε την παραγόμενη ισχύ και την απόδοση που είναι απαραίτητα για τη βέλτιστη διαχείριση του θερμικού και μηχανικού φορτίου και επιδρούν στην αποδοτική λειτουργία, τη συντήρηση και την επιβίωση του κινητήρα για πολύ καιρό.

Μηχανική ανάλυση

Στόχος της μηχανικής ανάλυσης είναι να διαπιστωθεί αν είναι εφικτή μηχανικά η κατασκευή του κινητήρα που έχει μελετηθεί ηλεκτρομαγνητικά, δηλαδή αν αντέχει στις μηχανικές καταπονήσεις που υφίσταται και θέτουν περιορισμούς στη μέγιστη παραγόμενη ισχύ και τη μέγιστη ταχύτητα.

Μηχανικές καταπονήσεις στον στρεφόμενο δρομέα του κινητήρα εμφανίζονται εξαιτίας των φυγόκεντρων δυνάμεων που αναπτύσσονται λόγω της περιστρεφόμενης μάζας (για παράδειγμα στην περίπτωση επιφανειακών μαγνητών, υπάρχει ο κίνδυνος αποκόλλησής

τους), της τριβής της εξωτερικής επιφάνειας με τον αέρα, των δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά την επιτάχυνση ή επιβράδυνση του δρομέα, καθώς και της ύπαρξης αρμονικών συνιστωσών ροπής που οδηγούν σε ταλαντώσεις του δρομέα και του άξονα και φθορά στα ρουλεμάν.

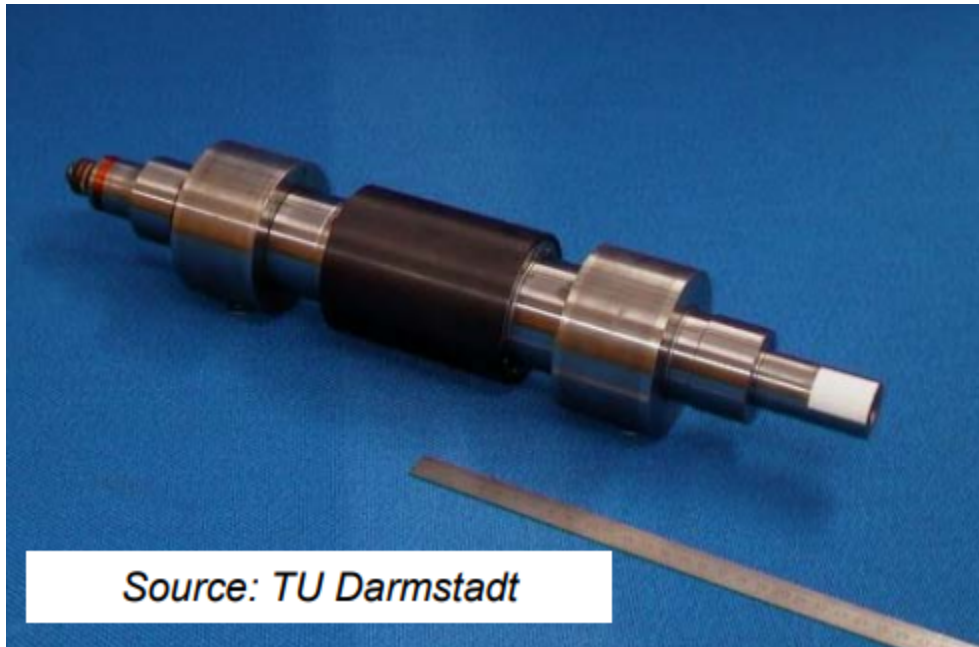
Επιπλέον, η μεταβολή της θερμοκρασίας στον κινητήρα δημιουργεί επιπλέον πιέσεις καθώς τα υλικά μεταβάλλουν τα χαρακτηριστικά τους. Αξίζει να αναφερθεί ότι λόγω της πολυπαραγοντικότητας του προβλήματος της μηχανικής ανάλυσης μιας μηχανής, οι αναλύσεις που πραγματοποιούνται συνήθως περιορίζονται στα όρια που τα υλικά εμφανίζουν ελαστική παραμόρφωση και σε κανονικές καταστάσεις λειτουργίας χωρίς να λαμβάνονται υπ' όψιν κοπωτικά φαινόμενα, ενώ έχει ενδιαφέρον η διεύρυνση των μελετών και σε ανελαστικές παραμορφώσεις που επειδή είναι μόνιμες έχουν συνήθως και καταστρεπτικά αποτελέσματα. Για τη μηχανική ανάλυση γίνεται όπως και στην ηλεκτρομαγνητική και τη θερμική ανάλυση χρήση μεθόδων ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, καθιστώντας τη δυσκολία επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων, υπόθεση υπολογιστικής πολυπλοκότητας.

Αν και, λόγω της αυξημένης πολυπλοκότητας της μηχανικής ανάλυσης, υπάρχει ανάγκη για λεπτομερή τρισδιάστατη μελέτη της μηχανής, ιδιαίτερα για οριακές φορτίσεις και λειτουργία της κάθε μηχανής, μια δισδιάστατη μελέτη και κάποιες προσεγγιστικές υποθέσεις μπορεί να δώσει καλά εμπειρικά αποτελέσματα και να απορριφθούν γρήγορα παραδείγματα κακής σχεδίασης. Λόγω της συμμετρίας, αρκεί να μελετηθεί ένας πόλος της μηχανής με την εφαρμογή ωστόσο των κατάλληλων οριακών συνθηκών.

Έτσι, σε βασικό επίπεδο η ανάλυση μπορεί να γίνει θεωρώντας ομοιογενή και ισοτροπικά υλικά, πολύ μικρές παραμορφώσεις και εξάρτηση των πιέσεων μόνο από την ακτινική απόσταση r και τη γωνία θ . Ισοτροπικά ονομάζονται τα υλικά που εμφανίζουν την ίδια συμπεριφορά από όποια διεύθυνση και αν εξεταστούν-ασκηθούν δυνάμεις, ενώ ομογενή όταν έχουν την ίδια σύσταση σε ολό τον όγκο τους.

Γενικά γίνεται προσπάθεια για λειτουργία των μηχανών σε υψηλές στροφές καθώς έτσι μπορούμε να πετύχουμε υψηλή ισχύ με χαμηλή ροπή και άρα μικρό όγκο μηχανής. Επιπλέον, για εφαρμογές που απαιτούν υψηλές στροφές δε θα χρειαστεί μηχανισμός-γρανάζια μετάδοσης της κίνησης από τη μηχανή στο φορτίο περιορίζοντας τις απώλειες και την ευπάθεια που εισάγει το σύστημα μετάδοσης της κίνησης. Εφαρμογές που συναντάμε μηχανές υψηλών ταχυτήτων είναι οι στροβιλοσυμπιεστές, στροβιλοαντλίες κενού, εργαλείων κοπής και κατεργασίας υψηλών στροφών, γεννήτριες-κινητήρες που συνδέονται με σφονδύλους (flywheel), μικρούς αεριοστροβίλους, κ.ά.

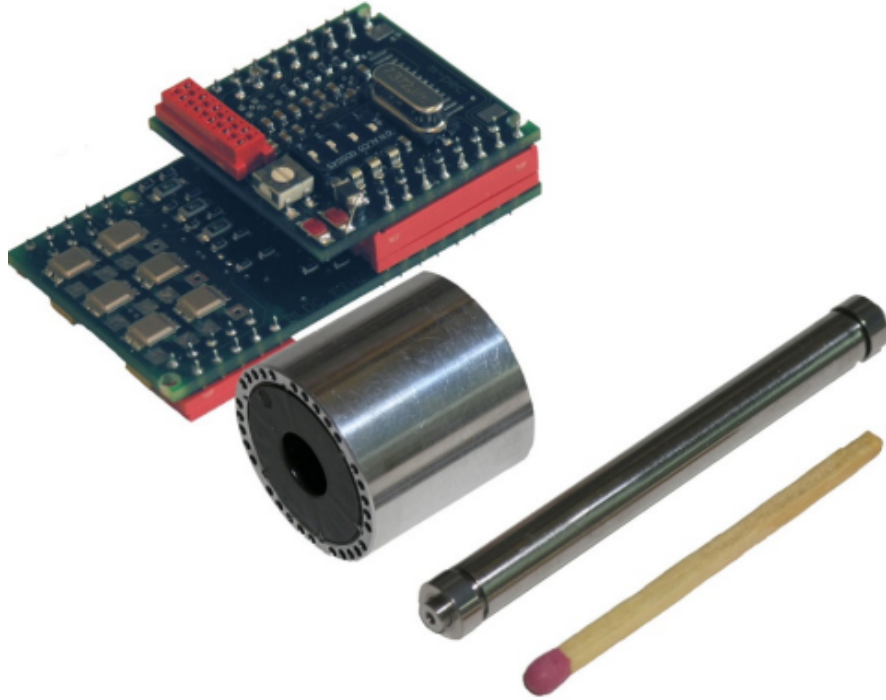
Ενδεικτικά κάποια παραδείγματα μηχανών που λειτουργούν σε υψηλές στροφές :



Σχ.26 PM κινητήρας, 40kW, 40.000 ΣΑΛ, με μαγνητικά ρουλεμάν και εξωτερικό κέλυφος συγκράτησης από ανθρακόνημα..[23]



Σχ.27 AC κινητήρας, 30kW, 24.000 ΣΑΛ. [23]

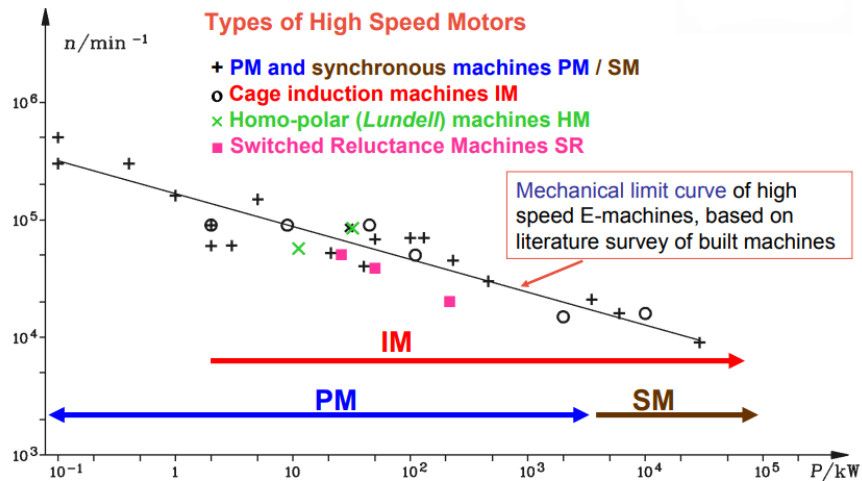


Σχ.28 2-pole PM κινητήρας, 100W, 500.000 ΣΑΛ, σε εφαρμογή αεριοστροβίλου. [23]

Λόγω των υψηλών στροφών όμως, αυξάνονται πολύ η φυγόκεντρος και η εφαπτομένη δύναμη που ασκείται σε ένα στοιχειώδες σωματίδιο που βρίσκεται στην επιφάνεια του δρομέα, επομένως για τελειώς στρογγύλους δρομείς έχουμε μια μέγιστη ακτίνα πριν ξεπεραστεί το όριο της τάσης που αντέχει το υλικό και για πιο περίπλοκες διαμορφώσεις δρομέα με μαγνήτες και γέφυρες έχουμε σημεία που εμφανίζονται υπερπίεσεις και ακόμα μεγαλύτεροι περιορισμοί στη σχεδίαση.

Ένα μοντέλο με στόχο τη σχεδίαση βέλτιστης μηχανής θα πρέπει να λαμβάνει υπ' όψιν τη σύζευξη ηλεκτρομαγνητικών-μηχανικών και θερμικών απαιτήσεων και περιορισμών. Για εφαρμογές με επιφανειακούς μαγνήτες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συγκράτησή τους κάποιο δαχτυλίδι από ανθρακόνημα καθώς η κόλλα έχει πολύ μικρότερο όριο αντοχής σε σχέση με το σίδηρο.

Σε εφαρμογές υψηλών στροφών παρατηρείται χρήση μαγνητικών ρουλεμάν (magnetic bearings) καθώς τα μηχανικά ρουλεμάν δεν είναι αξιόπιστα σε υψηλές στροφές. Σε υψηλές στροφές αυξάνονται και οι απώλειες τριβής που σε χαμηλές ταχύτητες είναι αμελητέες, καθώς εξαρτώνται από τον κύβο της ταχύτητας του δρομέα ως προς τη μάζα αέρα που τον περιβάλλει.



Σχ.29 Διάγραμμα με τύπους μηχανών που συναντώνται ανάλογα την ταχύτητα και την ισχύ τους[23]

[23]

Στο διάγραμμα παρουσιάζονται ενδεικτικά οι διάφοροι τύποι μηχανών που υπάρχουν με βάση την ταχύτητα και την ισχύ. Είναι χαρακτηριστική η παρατήρηση ότι οι μηχανικοί περιορισμοί οδηγούν στη μείωση της ταχύτητας για μηχανής υψηλής ισχύος.

Σχετικά με τα ηλεκτρικά ατσάλια

Ακολουθεί μια παρουσίαση με τις τιμές αντοχής ορισμένων ατσαλιών (electrical steel) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή στάτη και δρομέα του κινητήρα. Στη συγκεκριμένη εργασία, ιδιαίτερα μας ενδιαφέρει το ατσάλι που θα χρησιμοποιηθεί στο δρομέα καθώς για την περίπτωση που η μηχανή λειτουργεί στα όριά της κοντά στις 15.000 ΣΑΛ, η μέγιστη τάση υπερβαίνει τα 400 MPa.

Δύο χαρακτηριστικά των υλικών είναι η μέγιστη εφελκυστική αντοχή (max tensile strength) και η αντοχή μόνιμης παραμόρφωσης (yield strength). Η μέγιστη εφελκυστική αντοχή υποδηλώνει το σημείο μέγιστης τάσης κατά το οποίο σπάει ο σίδηρος. Η αντοχή μόνιμης παραμόρφωσης είναι το σημείο αντοχής μετά το οποίο τυχόν ελαστική παραμόρφωση μετατρέπεται σε πλαστική χωρίς επιστροφή στις αρχικές συνθήκες για το υλικό. Συνήθως οι τιμές των δύο σημείων αντοχής βρίσκονται πολύ κοντά και το υλικό σπάει σε σύντομο χρόνο αν εφαρμοστεί λίγο μεγαλύτερη τάση μετά την πλαστική του παραμόρφωση.

Τα ατσάλια που ακολουθούν στους επόμενους πίνακες προέρχονται από την εταιρεία Arcelormittal που είναι μια από τις πιο μεγάλες στον κλάδο.

	Max loss (W/kg) at 400 Hz at 1 T	Max loss (W/kg) at 700 Hz at 1 T	Re (MPa)	Rm (MPa)
Save 20-13	13	29	425 - 465	535 - 575
Save 20-15	15	32	410 - 450	540 - 580
Save 25-14	14	34	425 - 465	535 - 575
Save 25-16	16	37	410 - 450	540 - 580
Save 27-15	15	37	425 - 465	535 - 575
Save 27-17	17	40	410 - 450	540 - 580
Torque 20-15	15	34	360 - 400	490 - 530
Torque 20-12.5	12.5	32	425 - 465	535 - 575
Torque 25-16	16	37	360 - 400	490 - 530
Torque 25-13.5	13.5	34	425 - 465	535 - 575
Torque 30-18	18	41	360 - 400	490 - 530
Torque 35-20	20	50	360 - 400	490 - 530
Speed 35-440	23	60	465 - 515	590 - 640
Speed 35-510	28	65	540 - 590	625 - 675

Σχ.30 Πίνακας με ηλεκτρικά ατσάλια για ηλεκτρικές μηχανές που διατίθενται από την εταιρία Arcelormittal. [24]

Τα R_e , R_m είναι αντίστοιχα η αντοχή μόνιμης παραμόρφωσης (yield strength) και η μέγιστη εφελκυστική αντοχή (max tensile strength).

Φαίνεται στον πίνακα ότι για κέρδος 50-100 MPa στην αντοχή για τα ατσάλια υψηλής αντοχής speed οι απώλειες χαλκού διπλασιάζονται σε σχέση με τα ατσάλια χαμηλών απωλειών save και αυτο είναι το τμήμα που πληρώνεται για την αυξημένη αντοχή.

Automotive

Fields	Applications
Powertrain machines	High-efficiency alternators
	Belt driven starter-alternators
	High-efficiency starters
	Permanent magnet synchronous machines (PMSM) for centralised traction
	PMSM for wheel hub motors
	PMSM for current generation
	Wound rotor synchronous machines (WRSM) for traction
	WRSM for current generation
	Switched reluctance machines (SRM) for traction
	Induction machines (IM) for traction
IM for current generation	
High-performance auxiliary equipment	Heating, ventilation and air conditioning (HVAC) compressors
	Ignition coils
	Dashboard metering
	Hybrid controllers

Σχ.31 Πεδία και εφαρμογές στην αυτοκίνηση που γίνεται χρήση ατσαλιών. [24]

Ανάλογα την εφαρμογή, υπάρχει απαίτηση για διαφορετικά χαρακτηριστικά. Ο πίνακας που προηγήθηκε και αυτός που ακολουθεί δείχνουν χαρακτηριστικά τους συμβιβασμούς που κάνουν οι μηχανικοί κατά τη σχεδίαση των μηχανών.

			Magnetic performance				Mechanical performance	
			Losses	Permeability/ Polarisation	Thermal conductivity	Shielding	Yield strength	Punchability
Easy Punch steels with guaranteed punchability		D40	●	□	□	●	□	⊠
Semi-processed non-alloyed	Standard	D30	□	+	⊠	●	□	+
	High permeability	D32	□	⊠	⊠	●	□	+
Semi-processed alloyed		D30	+	+	+	□	+	□
Fully processed low grades	Standard	D20	□	+	+	□	□	+
	High permeability and thermal conductivity	D22	□	⊠	⊠	□	□	+
Fully processed medium grades	Standard	D20	+	□	□	+	+	□
	High permeability and thermal conductivity	D22	+	⊠	⊠	+	+	□
	High yield strength	D26	+	●	●	□	⊠	●
Fully processed high grades	Standard	D20	⊠	●	●	⊠	⊠	□
	High permeability and thermal conductivity	D22	⊠	+	□	⊠	⊠	+
	High frequency	D24	⊠	●	□	⊠	+	●
Pole sheets cold rolled		D50	□	+	□	□	+	□
Pole sheets hot rolled		D52	□	+	□	□	⊠	□

⊠ Excellent performance
 + Good performance
 □ Neutral performance
 ● Lower performance

Σχ.32 Εποπτική και συγκριτική παρουσίαση των μαγνητικών και των μηχανικών χαρακτηριστικών διαφόρων τύπων ατσαλιού. [24]

[24]

Το ηλεκτρικό ατσάλι είναι μια κατηγορία εξειδικευμένου χάλυβα που έχει σχεδιαστεί για να έχει υψηλή μαγνητική διαπερατότητα και χαμηλές απώλειες πυρήνα, με αποτέλεσμα να είναι ιδανικοί για χρήση σε πυρήνες μετασχηματιστών, γεννητριών και κινητήρων.

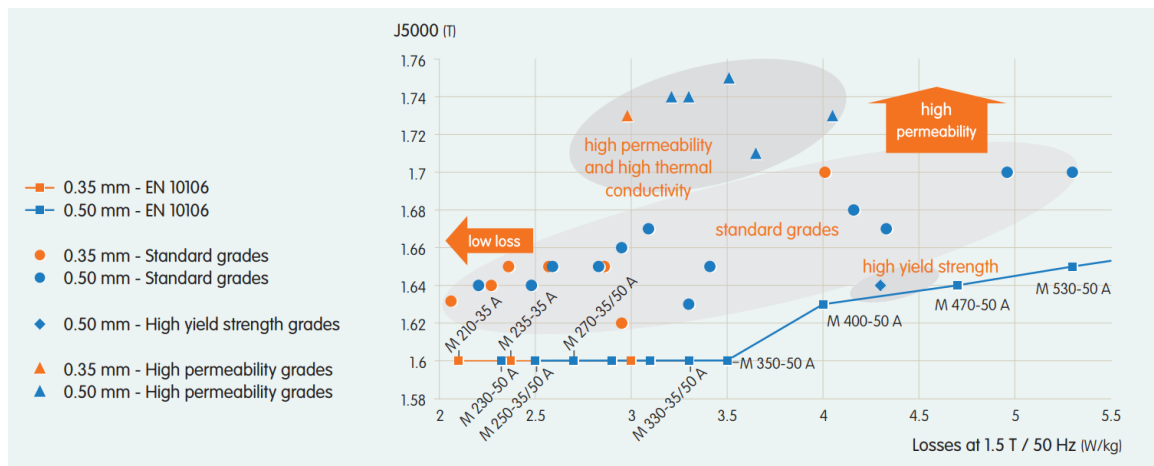
Τα ηλεκτρικά ατσάλια αναπτύχθηκαν για πρώτη φορά στις αρχές του 1900 και έκτοτε έχουν υποστεί πολυάριθμες τεχνολογικές εξελίξεις για τη βελτίωση της απόδοσης και της αποδοτικότητάς τους.

Τα διάφορα ενημερωτικά φυλλάδια που παρέχονται από εταιρείες που εργάζονται πάνω στον συγκεκριμένο κλάδο δίνουν μια καλή επισκόπηση των διαφόρων τύπων ατσαλιών που είναι διαθέσιμα με αναλυτική παρουσίαση των ιδιοτήτων τους αλλά και οδηγίες για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και της κατασκευής ηλεκτρικών μηχανών.

Αποτελούν έτσι έναν καλό γρήγορο οδηγό για τους μηχανικούς και τους σχεδιαστές ηλεκτρικών κινητήρων.

Στον ανωτέρω πίνακα αναφέρονται τρεις κύριοι τύποι ηλεκτρικών ατσαλιών: με μη προσανατολισμένους τομείς, ημι-επεξεργασμένους και πλήρως επεξεργασμένους τομείς.

- Οι μη προσανατολισμένοι ηλεκτρικοί χάλυβες χρησιμοποιούνται για εφαρμογές που απαιτούν ομοιόμορφες μαγνητικές ιδιότητες προς όλες τις κατευθύνσεις όπως οι ηλεκτρικές μηχανές.
- Οι ημι-επεξεργασμένοι ηλεκτρολογικοί χάλυβες χρησιμοποιούνται για εφαρμογές που απαιτούν υψηλότερη μαγνητική επαγωγή αλλά χαμηλότερες απώλειες πυρήνα και οι οποίοι θα πρέπει να υποστούν κάποια επιπλέον κατεργασία από τον τελικό καταναλωτή, για παράδειγμα από τον κατασκευαστή των κινητήρων.
- Οι πλήρως επεξεργασμένοι έχουν την υψηλότερη μαγνητική επαγωγή και τις χαμηλότερες απώλειες πυρήνα και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν μέγιστη απόδοση.



Σχ.33 Μαγνητικές ιδιότητες για τα διάφορα είδη πλήρως επεξεργασμένων ηλεκτρικών ατσαλιών. [24]

Οι διαφορετικές ποιότητες των ατσαλιών είναι :

- η τυποποιημένη που ακολουθεί το πρότυπο Standard: EN 10106:2015.
- η υψηλής διαπερατότητας και υψηλής θερμικής αγωγιμότητας. Η υψηλή διαπερατότητα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για μηχανές όπου απαιτείται υψηλότερη απόδοση, μειώνοντας τις απώλειες σε λειτουργία χωρίς φορτίο (no-load losses). Το αποτέλεσμα αυτό είναι πιο σημαντικό για μηχανές μεσαίου μεγέθους με συνεχή κύκλο λειτουργίας. Η διαπερατότητα είναι επίσης ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό για μικρές μηχανές, όπου περαιτέρω μείωση του βάρους/όγκου αποτελεί σημαντικό ζήτημα. Η υψηλή θερμική αγωγιμότητα αυτών των

κατηγοριών αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα για μεγάλες μηχανές, όπου η ευκολία απομάκρυνσης της θερμότητας από τη μηχανή μπορεί να είναι περιοριστικός παράγοντας που επηρεάζει την ισχύ της.

- η υψηλής συχνότητας. Αυτή η κατηγορία είναι ειδικά σχεδιασμένη για χρήση σε υψηλότερες συχνότητες, πάνω από 100 Hz, και ως εκ τούτου επίσης για μηχανές με τροφοδοσία PWM. Αυτή η ποιότητα έχει σαφώς υψηλότερο επίπεδο κόστους από την ποιότητα υψηλής διαπερατότητας και επομένως χρησιμοποιείται κυρίως όταν η μείωση του βάρους και του όγκου είναι απαραίτητη για παράδειγμα σε αεροναυτικές ή ιατρικές εφαρμογές.
- η υψηλής αντοχής. Αυτή η ποιότητα, οι οποία χαρακτηρίζεται από πολύ υψηλότερο όριο αντοχής στην πλαστική παραμόρφωση σε σύγκριση με την τυποποιημένη έκδοση, αναπτύχθηκε ειδικά για γεννήτριες με υψηλή ταχύτητα περιστροφής.

Η σημασία της ανάλυσης αυτής είναι η επιλογή του κατάλληλου σιδήρου για τον δρομέα και το στάτη της μηχανής ώστε να έχουμε το κατάλληλο μαγνητικό πεδίο αλλά και ελαχιστοποίηση των απωλειών για να επιτύχουμε αποδοτικά σχέδια που εξοικονομούν ενέργεια. Επομένως τα δύο βασικά μεγέθη που σημειώνονται είναι η ειδική μαγνητική επαγωγή ως μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου και οι απώλειες πυρήνα ως ένα μέτρο της ενέργειας που χάνεται καθώς το μαγνητικό πεδίο διέρχεται μέσα από το ηλεκτρικό ατσάλι της μηχανής.

Μία από τις βασικές προκλήσεις που σχετίζονται με το σχεδιασμό ηλεκτρικών μηχανών είναι η ελαχιστοποίηση των δινορευμάτων που προκαλούνται από το μαγνητικό πεδίο που προκαλεί ηλεκτρικά ρεύματα στο αγωγίμο υλικό της μηχανής καθώς παράγουν θερμότητα, η οποία οδηγεί σε απώλειες ενέργειας μείωση της απόδοσης της μηχανής.

Οι ελασματοποιημένοι πυρήνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση των δινορευμάτων με την απομόνωση των στρωμάτων του ηλεκτρικού ατσαλιού με χρήση μονωτικού υλικού, μειώνοντας έτσι τη συνολική αγωγιμότητα του πυρήνα. Για τον έλεγχο της παραμόρφωσης του μαγνητικού πεδίου στις ηλεκτρικές μηχανές που μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη απόδοση και απώλειες ενέργειας συνιστάται η χρήση σχεδίων με ομοιόμορφες διατομές και αποφυγή αιχμηρών ακμών και γωνιών.

Μία από τις κύριες προκλήσεις στην παραγωγή ηλεκτρικών ατσαλιών είναι η διατήρηση της ομοιομορφίας και της συνοχής του υλικού, που είναι απαραίτητο για την επίτευξη των επιθυμητών μαγνητικών ιδιοτήτων. Προηγμένες τεχνικές παραγωγής, όπως η συνεχής ανόπτηση (continuous annealing) και το γαλβάνισμα (galvanization), χρησιμοποιούνται για να διασφαλιστεί η ποιότητα και η συνοχή του εκάστοτε ατσαλιού.

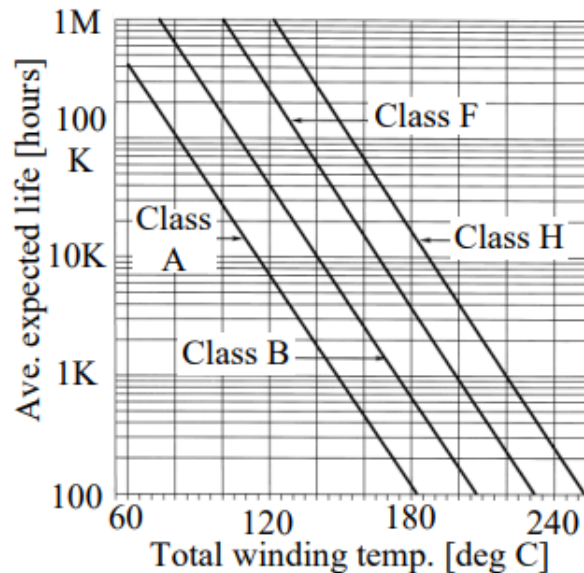
Είναι σημαντική η επιλογή του κατάλληλου ατσαλιού για μια συγκεκριμένη εφαρμογή καθώς η ειδική μαγνητική επαγωγή και οι απώλειες πυρήνα εξαρτώνται μεταξύ άλλων παραγόντων, από το πάχος του υλικού και τη συχνότητα του μαγνητικού πεδίου.

Για την αξιολόγηση των ιδιοτήτων των ηλεκτρικών ατσαλιών χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι δοκιμών και χαρακτηρισμού των υλικών. Για παράδειγμα, για τις μαγνητικές ιδιότητες χρησιμοποιείται η μέθοδος πλαισίου Epstein για τη μέτρηση της ειδικής μαγνητικής επαγωγής και των απωλειών πυρήνα υπό διάφορες συνθήκες μαγνητικού πεδίου, ενώ μέθοδοι όπως η δοκιμή μαγνητοσυστολής και η δοκιμή εφελκυσμού χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της μηχανικής αντοχής και της ανθεκτικότητάς του.

Θερμική ανάλυση

Με δεδομένο ότι η υπό σχεδίαση μηχανή ικανοποιεί τις απαιτήσεις σε ισχύ-ροπή και παρουσιάζει καλή μηχανική συμπεριφορά, στη συνέχεια είναι απαραίτητο να μελετηθεί η θερμική συμπεριφορά της μηχανής. Η θερμοκρασία που αναπτύσσει κατά τη λειτουργία της μια μηχανή κυρίως στα τυλίγματα της, αποτελούν εγγενή περιορισμό της απόδοσης, επηρεάζει τη διάρκεια ζωής της μηχανής αλλά και τις απώλειες στα τυλίγματα.

Επιπλέον, θερμικές απώλειες έχουμε λόγω των τριβών του δρομέα της μηχανής με τον αέρα κατά την περιστροφή και λόγω των τριβών στα ρουλεμάν που όμως είναι αμελητέες μπροστά στις θερμικές απώλειες των τυλιγμάτων χαλκού.



Σχ.34 Μέση εκτιμώμενη ζωή σε ώρες για κάθε κλάση μόνωσης ανάλογα τη θερμοκρασία των τυλιγμάτων. [26]

Ενδεικτικά, από τον τύπο συσχέτισης αντίστασης του χαλκού με τη θερμοκρασία $\rho = \rho_{20}(1+\alpha(T-20)) \Omega m$, $\alpha = 0.00393/^{\circ}C$ για αύξηση της θερμοκρασίας κατά $50^{\circ}C$, προκύπτει αύξηση 20% της αντίστασης του χαλκού άρα και των απωλειών. Επίσης, αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί και σε μείωση της παραμένουσας μαγνήτισης B_r των μαγνητών(ανά βαθμό κελσίου αύξηση θερμοκρασίας: 0.2% για φερρίτες, 0.03% για μαγνήτες σαμαρίου-κοβαλτίου και 0.11% για μαγνήτες νεοδυμίου) ενώ σημαντική άνοδος της θερμοκρασίας οδηγεί σε φαινόμενα απομαγνήτισης των μαγνητών. Τυπικές τιμές θερμοκρασίας στην οποία έχουμε μερική μόνιμη απομαγνήτιση είναι π.χ για μαγνήτες νεοδυμίου οι $80^{\circ}C$.

Η θερμική ανάλυση μιας μηχανής μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με αναλυτική μέθοδο με την επίλυση αναλυτικών θερμικών κυκλωμάτων είτε με αριθμητικές μεθόδους και τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων ή υπολογιστικών εργαλείων ρευστοδυναμικής ανάλυσης (CFD). Η χρήση θερμικών κυκλωμάτων προσφέρει μια γρήγορη και με χαμηλές απαιτήσεις σε υπολογιστικούς πόρους αλλά όχι πολύ ακριβή αποτελέσματα σε αντίθεση με τη χρήση υπολογιστικών μεθόδων κι αυτό καθώς τα θερμικά φαινόμενα στις ηλεκτρικές μηχανές είναι αρκετά πολύπλοκα για να περιγραφούν καλά από καθαρά μαθηματικές εξισώσεις.

Γενικά η μεταφορά θερμότητας μπορεί να πραγματοποιηθεί με τρεις τρόπους :

- 1) Με αγωγή σε ένα σώμα, λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς που οδηγεί σε ταλαντώσεις των μορίων ενός στερεού και αύξηση της κινητικότητας των μορίων σε περίπτωση ρευστού.
- 2) Με συναγωγή λόγω της επαφής ενός στερεού και ενός ρευστού με διαφορετική θερμοκρασία και κατηγοριοποιείται σε φυσική και σε εξαναγκασμένη.
- 3) Με ακτινοβολία

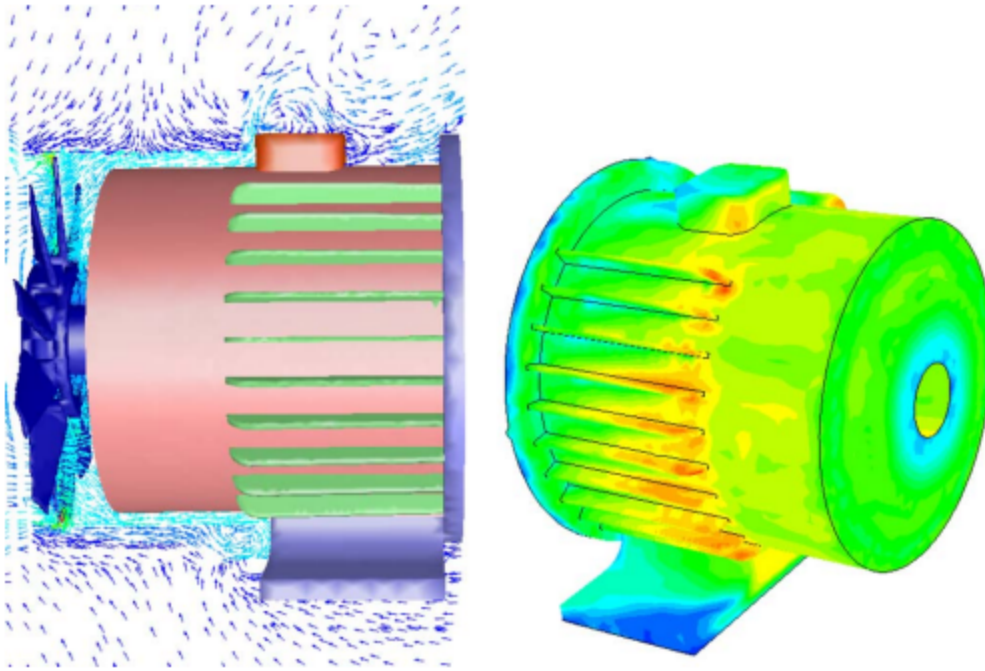
Επομένως, κατά τη σχεδίαση μιας ηλεκτρικής μηχανής αφού προσδιοριστούν οι θερμικές απώλειες, πρέπει να βρεθεί ο τρόπος με τον οποίο θα ψυχθεί η μηχανή με τη μεταφορά της παραγόμενης θερμικής ενέργειας στο εξωτερικό της μηχανής.

Από τα ανωτέρω προκύπτουν οι ακόλουθοι τρόποι ψύξης μιας μηχανής :

- Με κατάλληλη δημιουργία του κελύφους της μηχανής ώστε να αξιοποιηθεί στο μέγιστο η δυνατότητα φυσικής συναγωγής-κατάλληλη ροή του αέρα στο εξωτερικό της μηχανής.

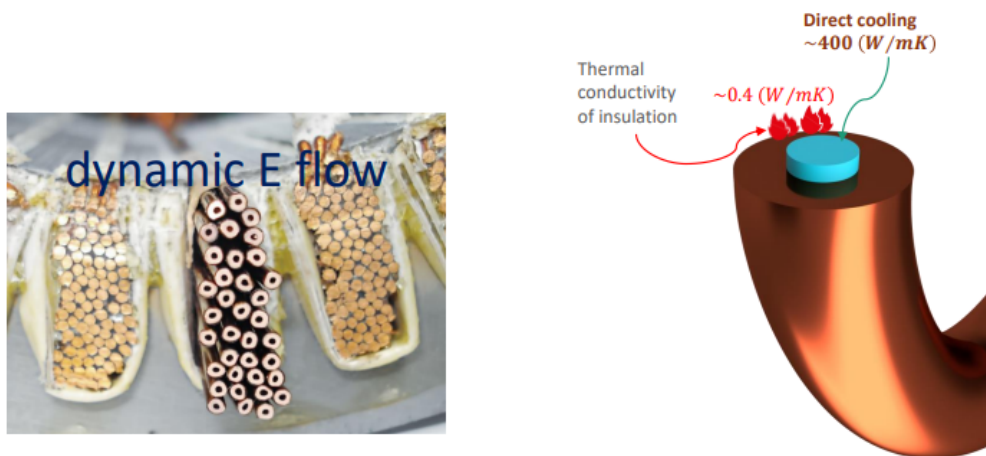
- Με παροχή αέρα μέσω κάποιας πτερωτής ώστε να προκληθεί επιπλέον μεταφορά θερμότητας λόγω εξαναγκασμένης συναγωγής.
- Με κατάλληλο εξαερισμό μέσω της δημιουργίας αγωγών ψύξης είτε στο δρομέα είτε στο στάτη.
- Με κατάλληλη επιλογή θερμοαγώγιμων υλικών(μονώσεις αγωγών, βερνίκια, κόλλες και υλικά στάτη και δρομέα) ώστε να διευκολύνεται η αγωγή της θερμότητας από το εσωτερικό προς το εξωτερικό της μηχανής.
- Με απευθείας ψύξη των αγωγών της μηχανής.
- Με τη διαμόρφωση αγωγών είτε στο στάτη είτε στο δρομέα που τροφοδοτούνται από ψυκτικό υγρό.
- Με ψύξη των άκρων των τυλιγμάτων της μηχανής που βρίσκονται εκτός του ενεργού μήκους της μηχανής.
- Καθώς και πολλές παραλλαγές και συνδυασμοί των ανωτέρω τρόπων.

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι με φυσική ψύξη μια μηχανή μπορεί να έχει πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα ως $1-5 \text{ A/mm}^2$, με εξαναγκασμένη ψύξη με αέρα έως $5-10 \text{ A/mm}^2$ και για ψύξη με ψυκτικό υγρο (νερό ή κάποιο άλλο υγρό για μικρότερες μηχανές, υδρογόνο για τις πολλές μεγάλες μηχανές όπως αυτές που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροπαραγωγή) $10-30 \text{ A/mm}^2$.



Σχ.37 Διανύσματα ταχύτητας γύρω από περικλειστη μηχανή που ψύχεται με τη βοήθεια βοηθητικού ανεμιστήρα και περίγραμμα του σχήματος με τα προκύπτοντα περιγράμματα των συντελεστών του πλαισίου μεταφοράς θερμότητας επιφάνειας. [25]

Ένα ενδιαφέρον παράδειγμα ψύξης παρουσιάζει η εταιρία Dynamic E Flow με απευθείας ψύξη των αγωγών χαλκού που επιτυγχάνει ροπή έως 165Nm/kg και πυκνότητα ρεύματος έως 100A/mm².

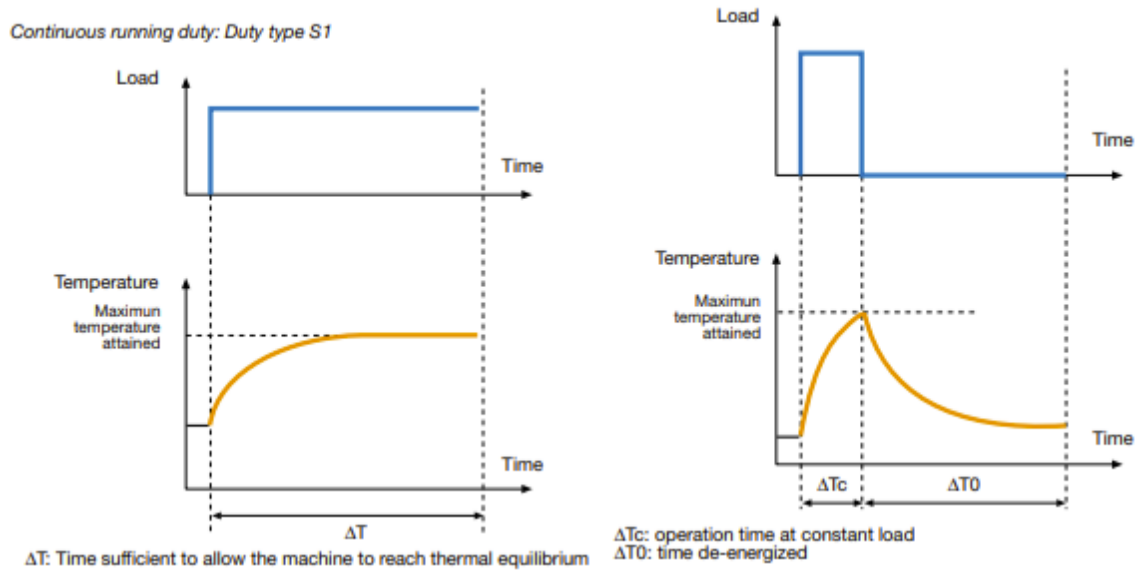


- Current densities up to 100A/mm²
- Overload capacities

Σχ.38 Παράδειγμα απευθείας ψύξης των αγωγών με ικανότητα υπερφόρτωσης και πυκνότητα ρεύματος ως και 100A/mm². (<https://tinyurl.com/mt55puej>)

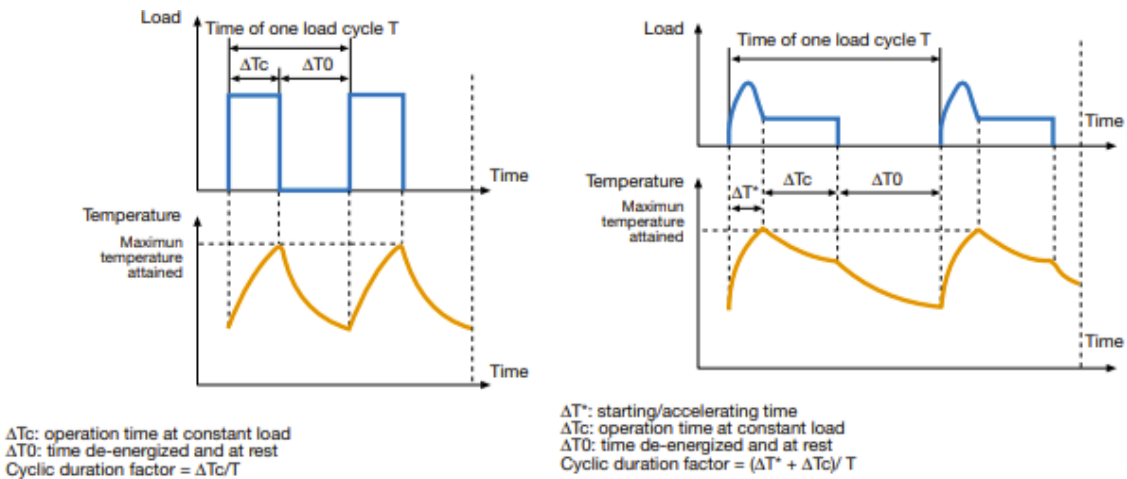
[25],[26]

Το πρόβλημα της διαχείρισης της θερμότητας σε μια μηχανή σχετίζεται και με τον κύκλο λειτουργίας της. Η κατηγοριοποίηση σε 10 ομάδες που γίνεται στο πρότυπο IEC 60034-1 και μια ποιοτική γραφική παρουσίαση από την παρουσίαση της ABB [27] παρουσιάζεται στη συνέχεια.



Σχ.39 S1: Συνεχής λειτουργία σε πλήρες φορτίο, [27]

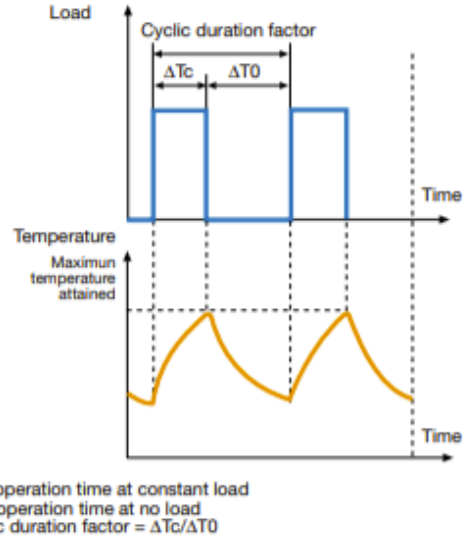
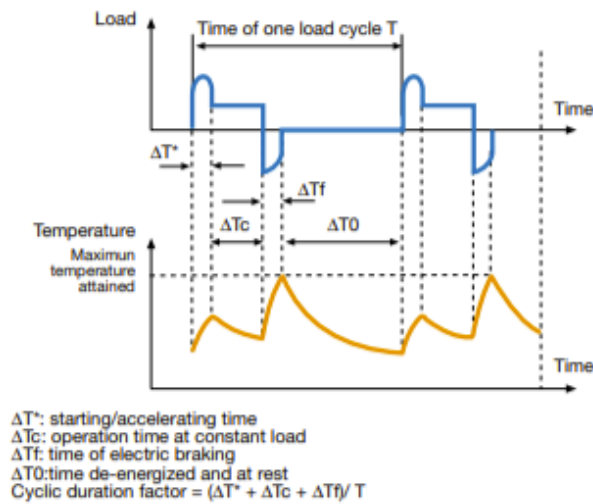
Σχ.40 S2: Πλήρες φορτίο για μικρό χρονικό διάστημα και ανάπαυση [27]



Σχ.41 S3: Λειτουργία με πλήρες φορτίο και ανάπαυση [27]

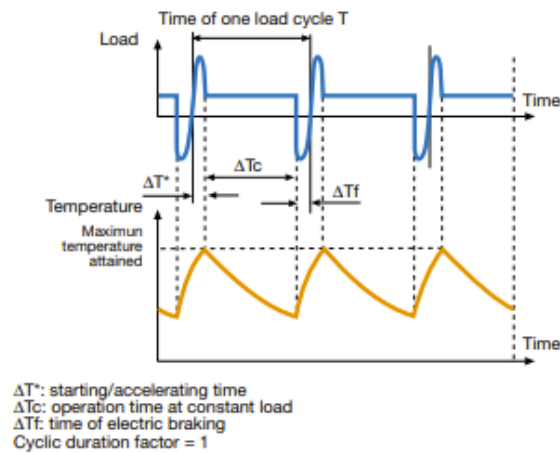
Σχ.42 S4: Λειτουργία με εκκίνηση, πλήρες φορτίο και ανάπαυση [27]

Intermittent periodic duty with electric braking: Duty type S5

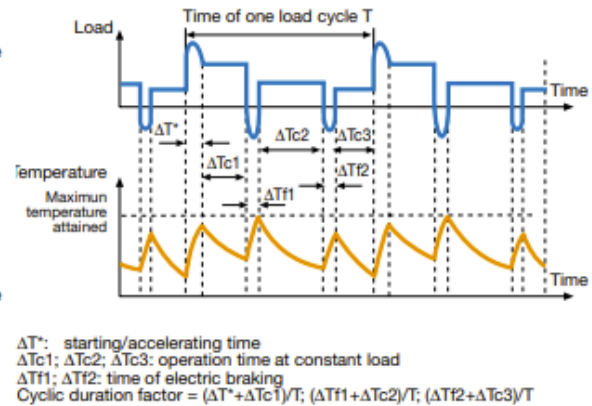


Σχ.43 S5: Λειτουργία με εκκίνηση, πλήρες φορτίο, ηλεκτρικό φρενάρισμα και ανάπαυση[27]

Σχ.44 S6 : Περιοδική λειτουργία με πλήρες φορτίο[27]

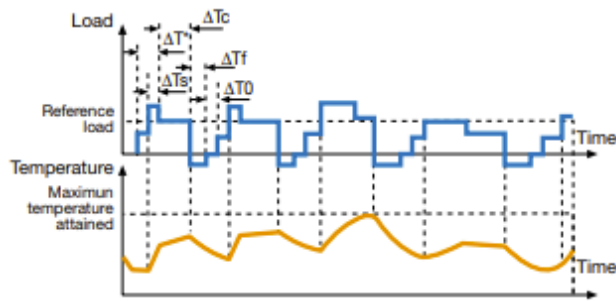


Intermittent periodic duty with reduced load periods: Duty type S8

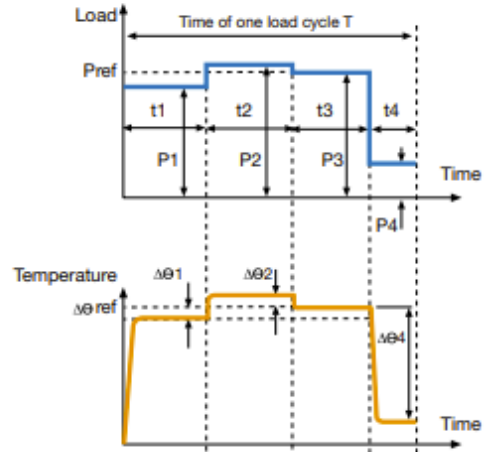


Σχ.45 S7: Περιοδική λειτουργία με εκκίνηση, πλήρες φορτίο, ηλεκτρικό φρενάρισμα [27]

Σχ.46 S8: Περιοδική λειτουργία με εκκίνηση, πλήρες φορτίο και μικρότερα φορτία [27]



ΔT^* : starting/accelerating time
 ΔT_s : time under overload
 ΔT_c : operation time at constant load
 ΔT_f : time of electric braking
 ΔT_0 : time de-energized and at rest



Σχ.47 **S9**: Μη περιοδικός κύκλος λειτουργίας [27]

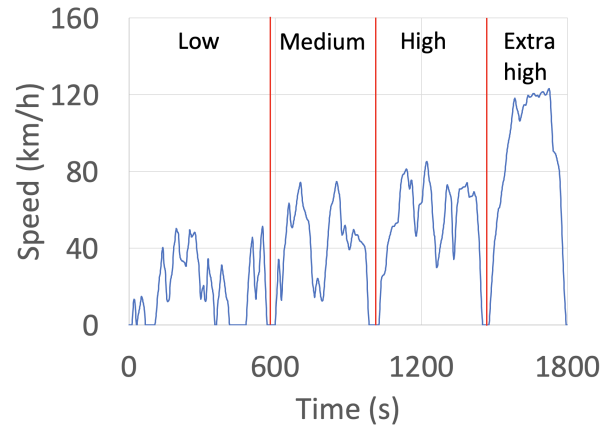
Σχ.48 **S10**: Κύκλος λειτουργίας με διακριτά επίπεδα φόρτισης [27]

Οι ηλεκτροκινητήρες λειτουργούν σε κατάσταση μη περιοδικής λειτουργίας, καθώς πρέπει να ανταποκρίνονται ανά πάσα στιγμή στις οδηγικές συνθήκες, μέχρι τα όριά τους. Θα πρέπει να αντέχουν στην αύξηση της θερμοκρασίας από το χειρότερο δυνατό σενάριο που είναι για παράδειγμα η ανάβαση ανηφόρας σε πλήρη φόρτιση.

6. ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΗΧΑΝΗΣ

Χαρακτηριστικά οχήματος

Στην εργασία αυτή η εφαρμογή που μας ενδιαφέρει είναι ένα μικρό αυτοκίνητο πόλης σύμφωνα με τον κύκλο WLTC class 2 (WLTC – Worldwide harmonized Light-duty vehicles Test Cycles).



Σχ.49 Κύκλος WLTC class 2 - Διεθνής εναρμονισμένος κύκλος ελέγχου οχημάτων.

Σε σχέση με υπάρχοντα μοντέλα αυτοκινήτων στην αγορά, επιζητούμε επιδόσεις ανάμεσα στο Citroen Ami και το Smart Forfour, και μόνο για τις περιοχές low, medium, high που φαίνονται στο σχήμα.



Σχ.50 Citroen Ami



Σχ.51 Smart Forfour

Χαρακτηριστικά :

- Μέση ταχύτητα 40 km/h
- Μέγιστη ταχύτητα 85 km/h.
- Μάζα χωρίς επιβάτες και αποσκευές : 940 kg
- Μέγιστη μάζα 4 επιβατών και αποσκευών : 300kg
- Διάμετρος τροχού με λάστιχο 195/50 R15 : 576 mm
- Αεροδυναμικός συντελεστής : 0.4
- Μέγιστη επιτάχυνση : 2 m/s^2 (0-72 km/h σε 10 s.)
- Μέγιστη επιτάχυνση σε ανηφόρα 15% : 0.5 m/s^2 (0-72 km/h σε 40 s.)

Ταχύτητα περιστροφής μηχανής :

Ονομαστική γωνιακή ταχύτητα τροχών : $38.5 \text{ rad/s} = 368 \text{ ΣΑΛ}$

Μέγιστη γωνιακή ταχύτητα τροχών : $82 \text{ rad/s} = 783 \text{ ΣΑΛ}$

Ο στόχος μας όπως έχει ειπωθεί είναι να μελετηθεί η μηχανική αντοχή σε υψηλές στροφές ώστε για μηχανή με υψηλή ισχύ, αυτή να έχει μικρότερο μέγεθος. Στο όχημα επιλέγουμε κιβώτιο σταθερής σχέσης μετάδοσης 1:20 ώστε να κινηθούμε κοντά στις 15.000 στροφές μέγιστη ταχύτητα που εμπειρικά φαίνεται ότι αρχίζουν να γίνονται δύσκολα τα πράγματα όσον αφορά στη μηχανική αντοχή.

Επομένως,

Ονομαστική ταχύτητα κινητήρα : $\sim 770 \text{ rad/s} = 7360 \text{ ΣΑΛ}$

Μέγιστη ταχύτητα κινητήρα : $\sim 1640 \text{ rad/s} = 15660 \text{ ΣΑΛ}$

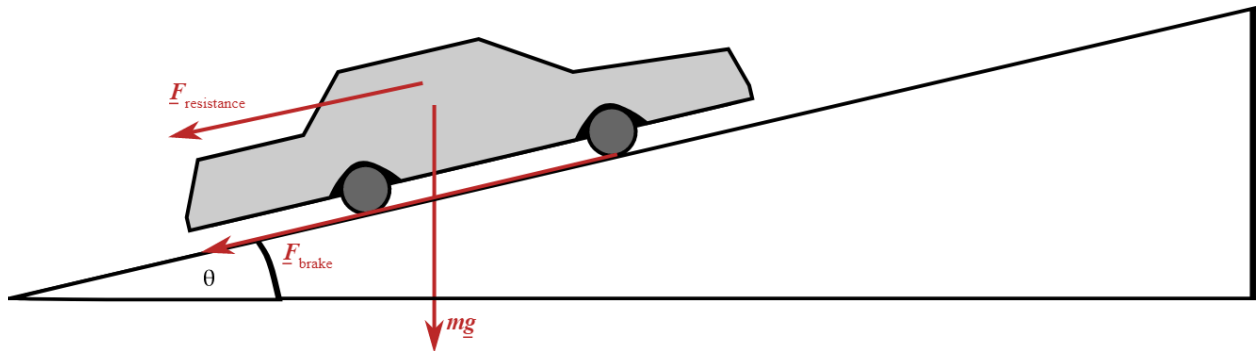
Ροπή μηχανής :

Επιθυμούμε ο κινητήρας να μπορεί να υποστηρίξει το αυτοκίνητο σε συνθήκες μέγιστου φορτίου και κλίση δρόμου 15% (8.53°) με ταχύτητα κίνησης τα 72 km/h. Αυτή αποτελεί και τη δυσκολότερη κατάσταση στην οποία καλείται να ανταπεξέλθει το αυτοκίνητο και μάλιστα πρόκειται για καλή επίδοση.

Λαμβάνουμε συντελεστή αντίστασης κατά την ολίσθηση (Rolling Resist. Coefficient)

$\mu_{rc} = 0.014$ για άσφαλτο,

σύμφωνα με το εργαλείο στη διεύθυνση <https://hpwizard.com/tire-friction-coefficient.html> .



Σχ.52 Αναπαράσταση δυνάμεων κατά την άνοδο σε ανηφόρα.

Στο σχήμα φαίνονται οι δυνάμεις που πρέπει να υπερνικήσει ο κινητήρας :

- Οπισθέλκουσα δύναμη: $F_{\text{air}} = 0.5 \cdot C_d \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A = 0.5 \cdot 0.35 \cdot 1.225 \cdot 20^2 \cdot 2.4 = 206 \text{ N}$
- Οριζόντια συνιστώσα του βάρους λόγω της κλίσης : $W_x = \sin\theta \cdot m \cdot g = 1804 \text{ N}$
- Αντίσταση των τροχών κατά την κύλιση : $T = c_{cr} \cdot m \cdot g \cdot \cos\theta = 168 \text{ N}$

$$\Sigma F = F_m - (F_{\text{air}} + W_x + T) = m \cdot a \Rightarrow F_m - 2178 = 1240 \cdot 0.5$$

Επομένως η μέγιστη δύναμη για επιτάχυνση είναι : $F_m = 2798 \text{ N}$

και άρα η μέγιστη ροπή στους τροχούς $T = 2798 \cdot 0.288 = 806 \text{ Nm}$.

Λαμβάνοντας υπόψη τη σταθερή σχέση μετάδοσης 1:20 του κιβωτίου ταχυτήτων θα πρέπει ο κινητήρας να αποδίδει μέγιστη ροπή $806/20 = \sim 40 \text{ Nm}$.

Η ισχύς που θα πρέπει να αποδίδει ο κινητήρας είναι : $P = T \cdot \omega = 40 \cdot 1390 = \sim 55.6 \text{ kW}$ ή 75 hp .

Για κίνηση στην ευθεία με σταθερή μέγιστη ταχύτητα (**85 km/h**) :

- Οπισθέλκουσα δύναμη: $F_{\text{air}} = 0.5 \cdot C_d \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A = 0.5 \cdot 0.35 \cdot 1.225 \cdot 23.6^2 \cdot 2.4 = 286 \text{ N}$
- Αντίσταση των τροχών κατά την κύλιση : $T = c_{cr} \cdot m \cdot g \cdot \cos\theta = 170 \text{ N}$

Η ροπή στους τροχούς είναι $T = (286+170) \cdot 0.288 = 131 \text{ Nm}$ και θα πρέπει ο κινητήρας να αποδίδει ροπή $131/20 = \sim 6.5 \text{ Nm}$.

Για κίνηση στην ευθεία με ονομαστική σταθερή μέση ταχύτητα (**40 km/h**) :

- Οπισθέλκουσα δύναμη: $F_{\text{air}} = 0.5 \cdot C_d \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A = 0.5 \cdot 0.35 \cdot 1.225 \cdot 11.1^2 \cdot 2.4 = 64 \text{ N}$

- Αντίσταση των τροχών κατά την κύλιση : $T = ccr*m*g*\cos\theta = 170 \text{ N}$

Η μέγιστη ροπή στους τροχούς $T = (64+170)*0.288 = 67 \text{ Nm}$ και θα πρέπει ο κινητήρας να αποδίδει ροπή $67/20 = \sim 3.5 \text{ Nm}$.

Η μέγιστη επιτάχυνση κατά την εκκίνηση προκύπτει με πλήρες φορτίο ίση με $\sim 2.1 \text{ m/s}^2$ όπως ζητάμε, αφού :

$$F_m = 2800 \text{ N} , \Sigma F = F_m - T = 2630 \text{ N} = m*a_{\max} ,$$

και με τον οδηγό μόνο (70 kg) , $a_{\max} = 2.6 \text{ m/s}^2$, δηλαδή θα πιάνει επίδοση 0-85 km/h σε περίπου 9 s.

Επομένως, ζητείται για το μικρό αυτοκίνητο πόλης ένας κινητήρας με ονομαστική ροπή 3.5 Nm, ικανότητα μέγιστης ροπής 40 Nm και ικανότητα μέγιστης ισχύος 55 kW.

Για την κατασκευή της μηχανής θα θεωρηθεί ότι η μέγιστη ροπή των 40 Nm αντιστοιχεί στα 4 A/mm^2 πυκνότητα ρεύματος, που είναι η μέγιστη επιθυμητή εμπειρικά για να έχουμε φυσική ψύξη του κινητήρα.

7. ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ

Εισαγωγικό

Το πλήθος των παραμέτρων που πρέπει να καθοριστούν είναι τόσο μεγάλο που αν θεωρηθούν όλες οι μεταβλητές τότε το πρόβλημα της εύρεσης βέλτιστης λύσης καθίσταται υπολογιστικά μη επιλύσιμο. Αντί αυτού, από τη εμπειρία και τα δεδομένα που υπάρχουν από όλες τις προηγούμενες σχεδιάσεις, μπορούμε να κάνουμε κάποιες υποθέσεις και να αφήσουμε τη χρήση υπολογιστή για τον καθορισμό συγκεκριμένων παραμέτρων. Έτσι, και με βάση όλες τις πληροφορίες που έχουν παρατεθεί, θα γίνει η σχεδίαση μιας τριφασικής μηχανής μονίμων μαγνητών εσωτερικού δρομέα και ακτινικής ροής. Έτσι, θεωρούνται δεδομένα τα κυριότερα χαρακτηριστικά του στάτη και το ενδιαφέρον θα εστιαστεί στα χαρακτηριστικά του δρομέα.

Τα χαρακτηριστικά της μηχανής που θα θεωρηθούν μεταβλητές και θα με βάση αυτά θα γίνει η βελτιστοποίηση είναι :

- Θέση και διαμόρφωση των μαγνητών στο δρομέα
- Αριθμός πόλων και συχνότητα λειτουργίας
- Πάχος γεφυρών και στηριγμάτων του στάτη

Πάχος διακένου

Το πάχος διακένου είναι καθοριστικό στα χαρακτηριστικά που θα εμφανίζει μια μηχανή. Μεγάλο διάκενο συνεπάγεται αυξημένη δυνατότητα σκέδασης της μαγνητικής ροής αλλά μικρότερη αλληλεπίδραση μεταξύ των πεδίων στάτη και δρομέα. Γενικά γίνεται προσπάθεια για όσο το δυνατόν μικρότερο διάκενο είναι επιτρεπτό κατασκευαστικά. Μια “καλή” τιμή που χρησιμοποιείται συνήθως είναι το $\delta = 0.7 \text{ mm}$ για τη μηχανή με τα δεδομένα χαρακτηριστικά.

Ειδική Μαγνητική Φόρτιση

Η ειδική μαγνητική φόρτιση $\bar{B} = \frac{P \cdot \Phi}{\pi \cdot D \cdot L}$, όπου Φ η μαγνητική ροή ανά πόλο, είναι ενδεικτική της δυνατότητας παραγωγής ροπής αλλά και των απωλειών χαλκού καθώς δείχνει πόσο “πολύ” πυκνό σε Tesla είναι το μαγνητικό πεδίο που διαμορφώνεται. Συνήθεις τιμές για ηλεκτρικές μηχανές είναι 0.4 - 0.7 T και ιδιαίτερα για μονίμων μαγνητών είναι πιο κοντά στο 0.7 T λόγω της ικανότητας των μαγνητών δημιουργίας

πυκνού μαγνητικού πεδίου. Ανάλογα το σιδηρομαγνητικό υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του πυρήνα μπορεί να φτάσει και σε υψηλότερες τιμές καθώς συνήθως παίρνει τιμές στο $\frac{1}{3}$ του σημείου κορεσμού της πυκνότητας του πεδίου του υλικού ($J_{sat, CoFe} = 2.4$, και άρα $\bar{B} \sim 0.8$ T). Για την εφαρμογή μας, μια τιμή κοντά στο 0.6 είναι ικανοποιητική.

Ειδική Ηλεκτρική Φόρτιση

Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση $a_c = \frac{2 * m * N * I_{rms}}{\pi * D}$, είναι ενδεικτική της δυνατότητας παραγωγής ροπής αλλά και των απωλειών χαλκού καθώς δείχνει πόσο “πολύ” ρεύμα σε A-ε/m παρέχουμε στα τυλίγματα του στάτη. Συνήθεις τιμές για ηλεκτρικές μηχανές μονίμων είναι $15-45 * 10^3$ Aε/m.

Πυκνότητα ρεύματος τυλίγματος

Για λόγους απλότητας και ευκολίας κατασκευής, ο κινητήρας σχεδιάζεται ώστε η ψύξη του να συμβαίνει με φυσικό τρόπο χωρίς την παρουσία συστήματος ψύξης με υγρό ή με εξαναγκασμένη ροή αέρα. Επομένως, στη μέγιστη φόρτιση δε θα πρέπει η πυκνότητα ρεύματος να ξεπερνά τα $4-5$ A/mm². Από την ανάλυση που προηγήθηκε διαπιστώνουμε ότι τα 4 A/mm² αντιστοιχούν στα 40 Nm μέγιστης ροπής και σε ονομαστική λειτουργία 3.5 Nm στα 0.35 A/mm². Επομένως από άποψη θερμικής ασφάλειας και λαμβάνοντας υπ’ όψιν ότι ο κινητήρας συνήθως κινείται κοντά στις συνθήκες ονομαστικής λειτουργίας, διαπιστώνεται ότι δε θα υφίσταται σημαντική καταπόνηση και θα έχει πολύ υψηλό προσδόκιμο χιλιάδων ωρών λειτουργίας.

Διαμόρφωση Τυλίγματος

Τα τυλίγματα στις ηλεκτρικές μηχανές έχουν γενικά αποτελέσει αντικείμενο αρκετής έρευνας καθώς αυτά προσφέρουν τη διέγερση κυρίως, επιτελώντας και κάποιες άλλες λειτουργίες σε ορισμένες περιπτώσεις. Όλη η ανάλυση βασίζεται στην αρχή ότι ένας αγωγός που διαρρέεται από ρεύμα δημιουργεί γύρω του μαγνητικό πεδίο και αντίστροφα, σε αγωγό που κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο αναπτύσσεται τάση και δημιουργούνται ρεύματα. Αρχικά θα παρουσιαστούν τα τυλίγματα που συναντάμε σε μια ηλεκτρική μηχανή τα οποία ανάλογα με τη λειτουργία τους χωρίζονται στις εξής κατηγορίες :

- Τύλιγμα στάτη

Το τύλιγμα αυτό είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου που αποτελεί τη διέγερση.

- Τύλιγμα δρομέα

Σε μηχανές επαγωγής ή σύγχρονες με τύλιγμα στο δρομέα, στο τύλιγμα αυτό δημιουργείται το πεδίο του δρομέα που αλληλεπιδρά με το πεδίο του στάτη και παράγεται η απαιτούμενη ροπή.

- Τύλιγμα απόσβεσης (damper winding)

Χρησιμοποιούνται για την απόσβεση ανεπιθύμητων φαινομένων όπως η ύπαρξη ταλαντώσεων και η δημιουργία αντίθετων πεδίων στο κύριο πεδίο. Στις σύγχρονες μηχανές κρατούν σταθερή τη ροή διακένου κατά τα μεταβατικά φαινόμενα.

- Τύλιγμα μεταγωγής (commutating winding)

- Τύλιγμα αντιστάθμισης (compensating winding)

Χρησιμοποιούνται στις μηχανές συνεχούς ρεύματος για τη βελτίωση της απόδοσής τους με τη δημιουργία βοηθητικών πεδίων και δε συμμετέχουν στην ηλεκτρομηχανική μετατροπή.

Στις μηχανές μονίμων μαγνητών που απαντώνται συχνότερα με μαγνήτες στο δρομέα, τα τυλίγματα χαλκού βρίσκονται στο στάτη και αποτελούν τη διέγερση του τυλίγματος, διαμορφώνοντας το πεδίο με το οποίο αλληλεπιδρά το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τους μαγνήτες του δρομέα. Για την επίτευξη μέγιστης απόδοσης θα προτιμήσουμε τύλιγμα στάτη που να δίνει αρκετά ημιτονική ροή στο διάκενο ώστε να έχουμε μικρό αρμονικό περιεχόμενο στη ροή του διακένου. Κατανομημένο τύλιγμα διπλής στρώσης με δύο αυλάκια ανά πόλο και φάση και κλασματικό βήμα 5/6 είναι μια επιλογή με ικανοποιητικό αποτέλεσμα.

Έξοδος Ηλεκτρικής Μηχανής

Η ηλεκτρική μηχανή παράγει ισχύ εξόδου :

$$S = 3 E_{rms} * I_{rms} ,$$

όπου η ενεργός τιμή της επαγόμενης τάσης ισούται με

$$E_{rms} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} k_w f N \Phi$$

και η ενεργός τιμή του ρεύματος της φάσης από τη σχέση της ειδικής ηλεκτρικής φόρτισης.

Επομένως προκύπτει,

$$S = 3 \frac{2\pi}{\sqrt{2}} k_w f N \Phi \pi D a c \frac{1}{6N} = 3 \frac{2\pi}{\sqrt{2}} k_w f N \pi D L \frac{B}{p} \pi D a c \frac{1}{6N} = \frac{2\pi}{4\sqrt{2}} \pi^2 k_w B a c D^2 L \frac{f}{p/2} \Rightarrow$$

$$S = 1.11 \pi^2 k_w B a c D^2 L \omega_m ,$$

$$\text{με } \omega_m = \frac{f}{p/2} \Sigma \Delta \Delta.$$

Διαστάσεις Διακένου και μήκους μηχανής

Το εμβαδόν του διακένου ισούται με $A = \pi D L$, και αν διαιρεθεί με τη φυγόκεντρο δύναμη του δρομέα $F = m \omega_r^2 R$ δίνει την οριακή τάση του διακένου F/A που αποτελεί ποιοτικό χαρακτηριστικό της μηχανικής αντοχής και δε πρέπει να υπερβαίνει την τιμή των 10 tn/cm^2 .

Η ροπή διακένου T_e που θα μπορεί να αναπτύξει ο κινητήρας υπολογίζεται προσεγγιστικά με βάση τη μέση εφαπτομενική πίεση των μαγνητικών δυνάμεων στο διάκενο P_t και την επιφάνεια του διακένου A ως

$$T_e = \frac{1}{2} D F_t = \frac{1}{2} D P_t A = \frac{\pi}{2} D^2 L P_t$$

Η δύναμη του διακένου δίνεται από τη σχέση

$$F_t = \frac{L}{\mu_o c} \int B_n B_t dc = \frac{L}{\mu_o} \pi D B_n B_t \text{ και}$$

$$P_t = \frac{F_t}{A} = \frac{1}{\mu_o} B_n B_t$$

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

Επομένως,

$$T_e = \frac{\pi}{2\mu_o} D^2 L B_n B_t$$

Για $B_t = B_n$ και $B_t^2 + B_n^2 = 0.6^2$ προκύπτει $B_t = B_n = 0.424$.

Η μέγιστη ηλεκτρική φόρτιση στον κινητήρα όπως αναφέρθηκε μπορεί να είναι $15-45 \cdot 10^3$ Aε/m επομένως για μια τιμή κοντά στα 35.000 Aε/m είναι $B_t = 0.044$

και για μέγιστη ροπή 40 Nm προκύπτει

$$D^2 L = \frac{2\mu_o T}{\pi B_n B_t} = 1716 \text{ cm}^3$$

Για τον κινητήρα δεδομένου ότι πρόκειται για μικρή μηχανή μπορεί να οριστεί η διάμετρος διακένου D να είναι ίση με το ενεργό μήκος της μηχανής L.

Έτσι, προσανατολιζόμαστε στην κατασκευή μηχανής με διάμετρο διακένου και ενεργό μήκος :

$$D = L \sim 12\text{cm ή } 120 \text{ mm}$$

Μια εκτίμηση για τη μάζα του κινητήρα μαζί με τα τυλίγματα χαλκού αν υποθεθεί εξωτερική ακτίνα στάτη 1.5 φορές την ακτίνα του δρομέα και πυκνότητα κινητήρα $\sim 8 \text{ g/cm}^3$ είναι περίπου $m = \rho \cdot V = \rho \cdot L \cdot \pi \cdot \left(\frac{1}{2}D \cdot 1.5\right)^2 = 24.4 \text{ kg}$

Συχνότητα Λειτουργίας - Πόλοι μηχανής

Ο αριθμός των πόλων της μηχανής δεδομένου του μεγέθους της και της λειτουργίας της θα επιλεγεί να είναι 4 ή 6 ή 8. Όσο λιγότεροι πόλοι τόσο γρηγορότερα θα στρέφεται η μηχανή για δεδομένη συχνότητα. Από τα δεδομένα των απαιτήσεων σε ταχύτητα της μηχανής προκύπτει η συχνότητα που θα πρέπει να αποδίδει ο κινητήρας ονομαστική και μέγιστη ταχύτητα από τη σχέση $n = \frac{120f}{p}$ (ΣΑΛ) όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί :

Ταχύτητα / Αριθμός Πόλων	4	6	8
770 rad/s = 7360 ΣΑΛ	246 Hz	368 Hz	490 Hz
1640 rad/s = 15660 ΣΑΛ	522 Hz	784 Hz	1044 Hz

Σχ.54 Πίνακας με τιμές συχνότητας ρευμάτων κινητήρα για επιλογή ταχύτητας και αριθμού πόλων.

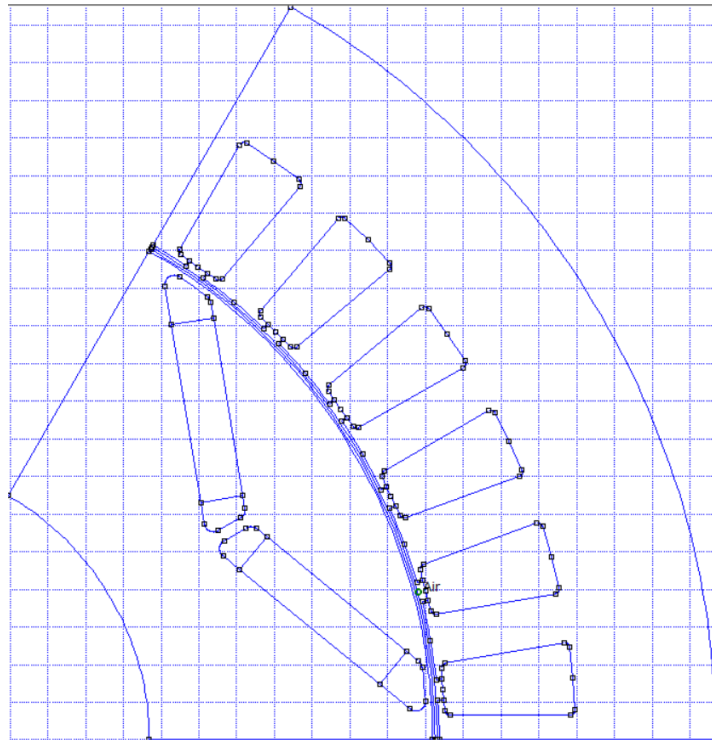
Χαρακτηριστικά στάτη

Για το στάτη, θα χρησιμοποιηθεί η διαμόρφωση τυλίγματος που αναφέρθηκε. Τα χαρακτηριστικά του στάτη επιλέγονται ως ποσοστά σε σχέση με τις διαστάσεις του διακένου (εξωτερική ακτίνα δρομέα) και είναι κοντά σε σχεδιάσεις κινητήρων που έχουν υλοποιηθεί.

Επιλέγονται :

- Εξωτερική ακτίνα στάτη : $R_{so} = 1.5 \cdot R_{ro} = 90 \text{ mm}$
- Αριθμός αυλακιών ανά πόλο και φάση : $S_{pp} = 2$
- Σώμα σιδήρου σώματος στάτη σε σχέση με το πλάτος των δοντιών του στάτη : 2.8
- Ποσοστό του πλάτους των δοντιών ως προς το βήμα αύλακας : 60%
- Ποσοστό πλάτους πεδίων δοντιών ως προς το βήμα αύλακας : 80%
- Ποσοστό ύψους του πεδίου του δοντιού ως προς το ύψος του δοντιού : 5%
- Ποσοστό ύψους του κατωτέρου μέρους του πεδίου του δοντιού ως προς το ύψος του πεδίου του δοντιού : 10%

Ακολουθεί το σχήμα για καλύτερη κατανόηση :



Σχ.55 Γεωμετρία στάτη και δρομέα.

Επιλογή Υλικών

Μαγνήτες

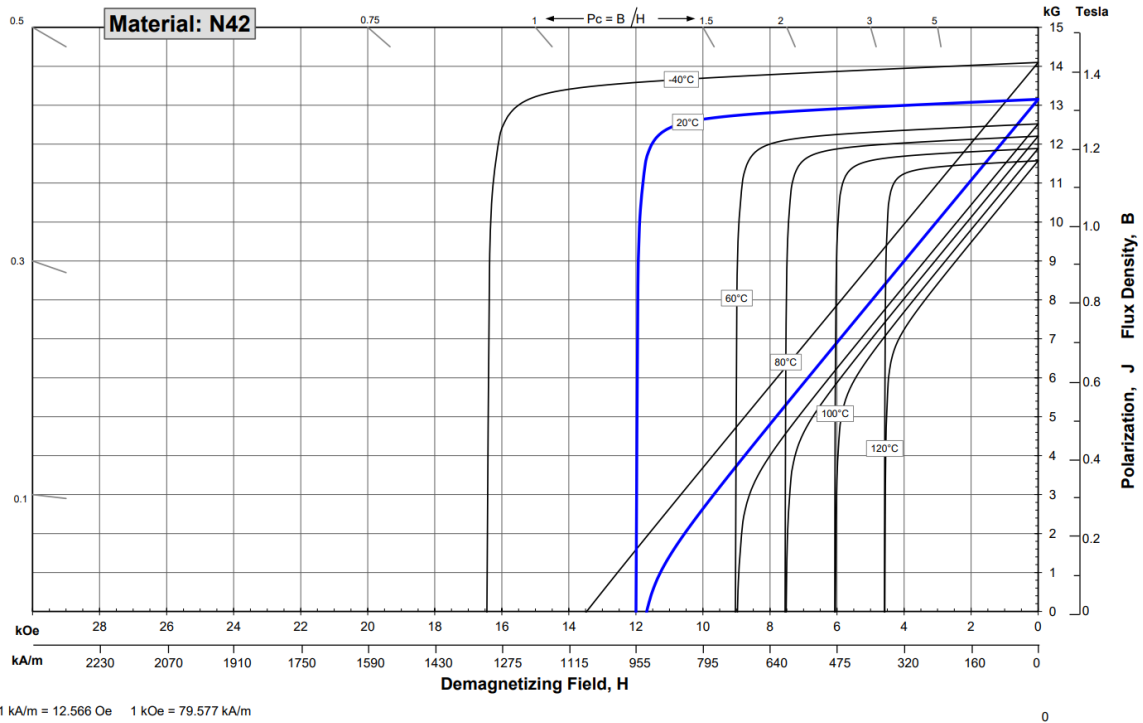
Για το δρομέα επιλέγονται μαγνήτες νεοδυμίου N42 καθώς είναι μια λύση με καλά μαγνητικά χαρακτηριστικά και φυσιολογικό κόστος.

Magnetic Properties	Characteristic	Units	min.	nominal	max.
	Br , Residual Induction		Gauss	12,800	13,150
		mT	1280	1315	1350
H_{cB} , Coercivity		Oersteds	10,800	11,850	12,900
		kA/m	860	943	1027
H_{cJ} , Intrinsic Coercivity		Oersteds	12,000		
		kA/m	955		
BHmax , Maximum Energy Product		MGOe	40	42	44
		kJ/m ³	318	334	350

Σχ.56 Μαγνητικές ιδιότητες μαγνήτη N42. [35]

Thermal Properties	Characteristic	Units	C //	C ⊥
	Thermal Properties	Reversible Temperature Coefficients ⁽¹⁾		
of Induction, α(Br)		%/°C		-0.12
of Coercivity, α(H _{cj})		%/°C		-0.62
Coefficient of Thermal Expansion ⁽²⁾		ΔL/L per °C×10 ⁻⁶	7	-1
Thermal Conductivity		kcal/mhr°C	5.3	5.8
Specific Heat ⁽³⁾		cal/g°C		0.11
Curie Temperature, T _c	°C		310	
Other Properties	Flexural Strength	psi		41,300
		MPa		285
	Density	g/cm ³		7.6
	Hardness, Vickers	Hv		620
	Electrical Resistivity, ρ	μΩ • cm		150 // 130 ⊥

Σχ.57 Θερμικές και άλλες ιδιότητες του μαγνήτη N42. [35]



Σχ.58 Χαρακτηριστική καμπύλη πεδίου απομαγνήτισης του μαγνήτη σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. [35]

Στάτης

Για το στάτη επιλέγεται σίδηρος με χαμηλές απώλειες. Σε αντίθεση με το δρομέα που δέχεται δυνάμεις λόγω της περιστροφής σε υψηλές στροφές, εδώ δεν υπάρχει ανάγκη για υλικό υψηλής αντοχής.

Επιλέγεται το ακόλουθο υλικό από το φυλλάδιο με τα δεδομένα της Arcelormittal :

ArcelorMittal name	Conventional density (kg/dm ³)	Max. loss (W/kg) at 400 Hz at 1T [Guaranteed]	Max. loss (W/kg) at 700 Hz at 1T [Indicative]	Min. polarisation (T) at 2,500 A/m [Guaranteed]	Min. polarisation (T) at 5,000 A/m [Guaranteed]	Min. polarisation (T) at 10,000 A/m [Indicative]	Max. anisotropy of loss (±%) at 400 Hz at 1T [Guaranteed]	Min. stacking factor [Guaranteed]
Save 20-13	7.6	13	29	1.49	1.60	1.70	15	0.93
ArcelorMittal name	Direction	R _e (MPa)	R _m (MPa)	R _e /R _m	A ₈₀ (%)	HV		
Save 20-13	L	410 - 450	520 - 560	0.78 - 0.83	10 - 20	200 - 230		
	T	425 - 465	535 - 575	0.78 - 0.83	10 - 20	200 - 230		

Σχ.59 Μαγνητικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του επιλεγμένου ατσαλιού για το στάτη. [24]

Δρομέας

Για τον δρομέα επιλέγεται υλικό υψηλής μηχανικής αντοχής. Όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο της μηχανικής ανάλυσης, το μειονέκτημα με την συγκεκριμένη επιλογή είναι οι υψηλότερες απώλειες σε σχέση με το ηλεκτρικό ατσάλι του στάτη.

Επιλέγεται το ακόλουθο υλικό από το φυλλάδιο με τα δεδομένα της Arcelormittal :

ArcelorMittal name	Conventional density (kg/dm ³)	Max. loss (W/kg) at 400 Hz at 1T [Guaranteed]	Max. loss (W/kg) at 700 Hz at 1T [Indicative]	Min. polarisation (T) at 2,500 A/m [Guaranteed]	Min. polarisation (T) at 5,000 A/m [Guaranteed]	Min. polarisation (T) at 10,000 A/m [Indicative]	Max. anisotropy of loss (±%) at 400 Hz at 1T [Guaranteed]	Min. number of bends [Guaranteed]	Min. stacking factor [Guaranteed]
Speed 35-510	7.6	28	65	1.51	1.62	1.72	15	5	0.95

ArcelorMittal name	Direction	R _e (MPa)	R _m (MPa)	R _e /R _m	A ₈₀ (%)	HV
Speed 35-510	L	510 - 560	605 - 655	0.80 - 0.92	20 - 30	210 - 240
	T	540 - 590	625 - 675	0.80 - 0.92	20 - 30	210 - 240

Σχ. 60 Μαγνητικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του επιλεγμένου ατσαλιού για το δρομέα.. [24]

Προηγουμένως γίνεται αναφορά για απώλειες σιδήρου, επομένως είναι χρήσιμο να αναφερθούν κάποια σχετικά εισαγωγικά στοιχεία ή δεδομένα για λόγους πληρότητας. Λόγω του εναλλασσόμενου ρεύματος που εφαρμόζεται στη διέγερση, δημιουργείται εναλλασσόμενη μαγνητική ροή στο σιδηρομαγνητικό μέρος της μηχανής με που οδηγεί σε απώλειες. Η συχνότητα του πεδίου του στάτη ισούται με τη συχνότητα του ρεύματος είτε από το δίκτυο (50-60 Hz), είτε από το μετατροπέα ισχύος (έως μερικά kHz), ενώ του δρομέα για τις σύγχρονες μηχανές είναι ίδια με το στάτη και τις ασύγχρονες λίγο μικρότερη. Επιπλέον, η παρουσία αρμονικών σε πολύ μεγαλύτερες συχνότητες προσθέτει απώλειες, καθώς οι απώλειες σιδήρου εξαρτώνται από τη συχνότητα f και τη μαγνητική επαγωγή ή πυκνότητα μαγνητικής ροής B . Οι απώλειες σιδήρου χωρίζονται σε απώλειες δινορρευμάτων και απώλειες υστέρησης.

Τυπικές τιμές πάχους των μαγνητικών λαμαρίνων είναι 0.2, 0.35, 0.5, 0.65, 1 mm ενώ για εφαρμογές πολύ υψηλών συχνοτήτων και στροφών μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμα πιο λεπτές λαμαρίνες.

Επειδή το πεδίο στο δρομέα δε παρουσιάζει τόσο μεγάλες μεταβολές όπως στο στάτη, σε αρκετές περιπτώσεις ο δρομέας κατασκευάζεται από ενιαίο σώμα σιδήρου και όχι από φύλλα λαμαρίνας.

Για τις απώλειες υστέρησης υπάρχει ο προσεγγιστικός εμπειρικός τύπος

$$P_{\text{υστ}} = \eta * V * f * B_{\text{max}}^n,$$

όπου η είναι ένας πειραματικός συντελεστής, V ο όγκος για τον οποίο θα υπολογιστούν οι απώλειες σε watt, f η συχνότητα του πεδίου (κάθε αρμονική συνιστώσα έχει διαφορετική συχνότητα και τη δική της μέγιστη μαγνητική επαγωγή και δίνει διαφορετικές απώλειες που αθροίζονται για τον υπολογισμό των συνολικών) και εκθέτης n με τιμές 1.5-2.5.

8. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟΥ ΔΙΣΚΟΥ

Γενικά στοιχεία

Σημαντικές σταθερές των υλικών της μηχανής που επηρεάζουν τη μηχανική συμπεριφορά της είναι :

- Ο συντελεστής του Young (Young Modulus $E = \frac{\text{stress}}{\text{strain}} = \frac{\sigma}{\varepsilon}$, $\sigma = \frac{F}{A}$, $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$) ή συντελεστής ελαστικότητας, αποτελεί εγγενή μηχανική ιδιότητα κάθε υλικού και ισούται με το λόγο της τάσης ή πίεσης που απαιτείται για να προκαλέσει συγκεκριμένη παραμόρφωση προς την παραμόρφωση αυτή στο υλικό και έχει μονάδες πίεσης. Για τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις μηχανικές εφαρμογές π.χ ατσάλια έχει υψηλές τιμές της τάξης των 200 GPa.
- Ο συντελεστής Poisson (Poisson ratio) ν , είναι ο λόγος της πλευρικής παραμόρφωσης προς την παραμόρφωση στη διεύθυνση που ασκείται η πίεση και για τα ατσάλια είναι περίπου 0.28-0.30. Γενικά όταν ένα σώμα δέχεται πίεση, μειώνεται η διάσταση της διεύθυνσης που δέχεται την πίεση και αυξάνεται η διάσταση της κάθετης στη διεύθυνση της πίεσης.
- Συμπιεστότητα (Compressibility) $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$, είναι ο λόγος της μεταβολής του όγκου ενός ελαστικού στερεού προς την μεταβολή της υδροστατικής πίεσης.
- Συντελεστής ακαμψίας (Rigidity) $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ που αναφέρεται στην αντίσταση ενός σώματος στη διάτμηση [28].

Οι τέσσερις αυτές σταθερές δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, όπως φαίνεται, και αρκεί να γνωρίζουμε δύο για να υπολογίσουμε τις υπόλοιπες.

Περίληπτικά αναφέρονται κάποια κριτήρια που χρησιμοποιούνται για να ελεγχθεί αν ένα υλικό αντέχει τις μηχανικές φορτίσεις-καταπονήσεις και ονομάζονται κριτήρια αποτυχίας (failure criteria) :

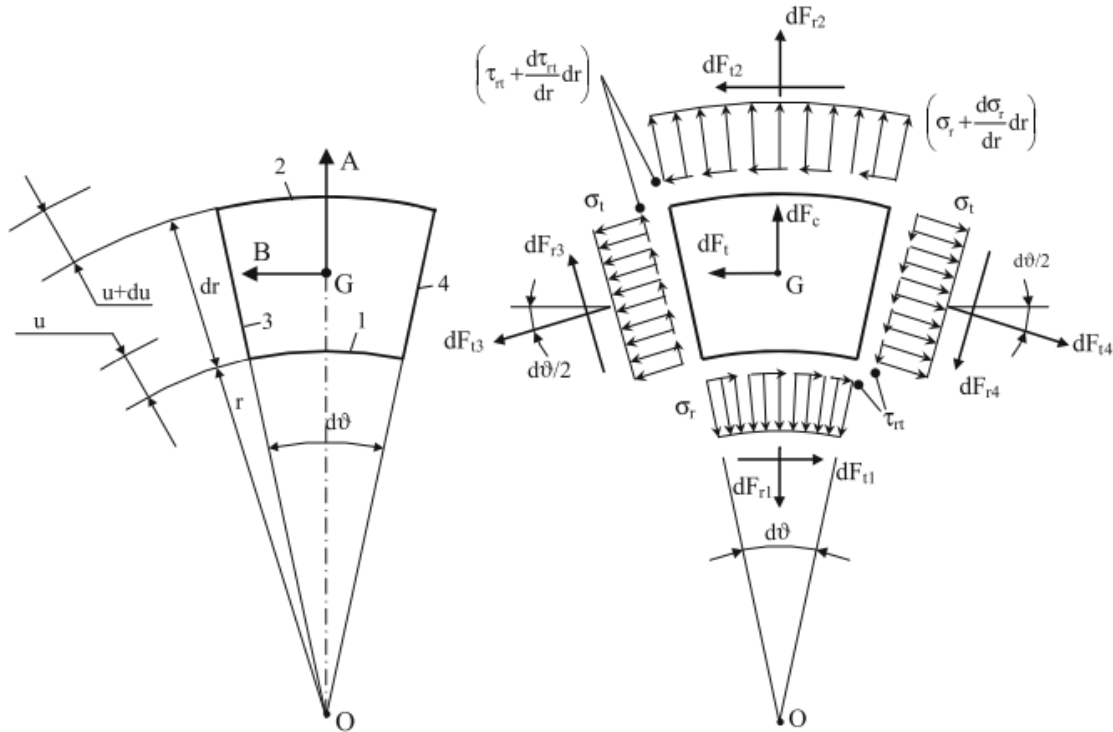
- Το κριτήριο μέγιστης πίεσης (maximum normal stress- σ_{\max} - Coulomb criterion)
 $\sigma_{\varepsilon} = \max \{ \sigma_t, \sigma_r, \sigma_z \}$
- Το κριτήριο μέγιστης τάσης (maximum strain- ε_{\max} - Saint Venant criterion)
 $\sigma_{\varepsilon} = \max \{ | \sigma_t - \nu^*(\sigma_r + \sigma_z) |, | \sigma_r - \nu^*(\sigma_t + \sigma_z) |, | \sigma_z - \nu^*(\sigma_r + \sigma_t) | \}$
- Το κριτήριο μέγιστης πίεσης καταπόνησης (maximum shear stress- τ_{\max} -Tresca criterion)
 $\sigma_{\varepsilon} = \max \{ | \sigma_t - \sigma_r |, | \sigma_t - \sigma_z |, | \sigma_r - \sigma_z | \}$
- Το κριτήριο μέγιστης ενέργειας παραμόρφωσης (maximum distortion energy- Von Mises criterion)

$$\sigma_{\varepsilon} = \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_r^2 + \sigma_z^2 - \sigma_t \sigma_r - \sigma_r \sigma_z - \sigma_z \sigma_t}$$

όπου σ_r η ακτινική τάση, σ_t η εφαπτομενική τάση και σ_z η κάθετη τάση που όμως στην ανάλυση αυτής της εργασίας θεωρείται μηδέν.

Σε αυτή την εργασία όπως και συνηθίζεται στη βιβλιογραφία και την έρευνα η ανάλυση γίνεται με βάση το κριτήριο Von Mises.

Στοιχεία θεωρίας ελαστικότητας σε λεπτό δίσκο ως προς μια διάσταση (ακτινική)



Σχ.62 Στοιχειώδης μάζα δρομέα με τις δυνάμεις και τις τάσεις που δρουν πάνω σε αυτό. [37]

Θεωρείται ως βάση της ανάλυσης το στοιχειώδες τμήμα του δρομέα που φαίνεται ανωτέρω και για πολικές συντεταγμένες με συμμετρία ως προς τον κατακόρυφο άξονα z , και το οποίο στρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω και γωνιακή επιτάχυνση $\omega_{\gamma\omega\nu}$. Το τμήμα αυτό δέχεται κατά τη περιστροφή φυγόκεντρες και εφαπτομενικές δυνάμεις που προκαλούν την τάση-πίεση (stress) και την καταπόνηση (strain) του υλικού. Η ακτινική τάση σ_r , η τάση στεφάνης (hoop stress) σ_t και η ακτινική μετατόπιση είναι συνάρτηση της ακτινικής απόστασης r από το κέντρο του δίσκου.

Οι δυνάμεις που ασκούνται στη στοιχειώδη μάζα είναι αναλυτικά :

- ακτινική φυγόκεντρος δύναμη λόγω περιστροφής

$$dF_c = r * \omega^2 * dm = r * \omega^2 * \rho * dV = r^2 * \omega^2 * \rho * H * d\theta dr$$
- εφαπτομενική δύναμη λόγω γωνιακής επιτάχυνσης

$$dF_t = r * \omega * dm = r * \omega * \rho * dV = r^2 * \omega * \rho * H * d\theta dr$$

- ακτινική δύναμη στην εσωτερική επιφάνεια της μάζας

$$dFr_1 = \sigma_r * r * H * d\theta$$

- εφαπτομενική δύναμη στην εσωτερική επιφάνεια της μάζας

$$dFt_1 = \tau_{rt} * H * r * d\theta$$

- ακτινική δύναμη στην εξωτερική επιφάνεια της μάζας

$$dFr_2 = \left(\sigma_r + \frac{d\sigma_r}{dr} dr \right) * \left(H + \frac{dH}{dr} dr \right) * (r + dr) * d\theta = r\sigma_r H d\theta + \frac{d(\sigma_r H r)}{dr} dr d\theta$$

- εφαπτομενική δύναμη στην εξωτερική επιφάνεια της μάζας

$$dFt_2 = \left(\tau_{rt} + \frac{d\tau_{rt}}{dr} dr \right) * \left(H + \frac{dH}{dr} dr \right) * (r + dr) * d\theta = r\tau_{rt} H d\theta + \frac{d(\tau_{rt} H r)}{dr} dr d\theta$$

- ακτινικές δυνάμεις στις πλαϊνές επιφάνειες της μάζας

$$dFr_{3,4} = \tau_{rt} * H * dr$$

- εφαπτομενικές δυνάμεις στις πλαϊνές επιφάνειες της μάζας

$$dFt_{3,4} = \sigma_t * H * dr$$

Από τις εξισώσεις ισορροπίας στους άξονες A και B για τις ανωτέρω δυνάμεις όπως φαίνεται και στο σχήμα, προκύπτουν οι εξισώσεις που περιγράφουν το συγκεκριμένο φαινόμενο :

$$\frac{d}{dr} (r\sigma_r H) - \sigma_t H + r^2 * \omega^2 * \rho * H = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d}{dr} (r\tau_{rt} H) + \tau_{rt} H + r^2 * \omega_{\gamma\omega\nu} * \rho * H = 0 \quad (2)$$

Για αξονική συμμετρία, οι καταπονήσεις (ακτινική- ε_r , εφαπτομενική- ε_t , διατμητική- γ_{rt}) προκύπτουν από τις παραγώγους των μετατοπίσεων (ακτινική-u, εφαπτομενική-v) ως εξής :

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}, \quad \varepsilon_t = \frac{u}{r}, \quad \gamma_{rt} = \frac{dv}{dr} - \frac{v}{r}$$

Για ομογενές ιστροπικό υλικό οι καταπονήσεις σχετίζονται με τις τάσεις μέσα από τη σχέση :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_t \\ \gamma_{rt} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 \\ \frac{-\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_t \\ \tau_{rt} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Οι σχέσεις (1),(2),(3) περιγράφουν συνολικά τη συμπεριφορά λεπτού δίσκου που στρέφεται υπό τις υποθέσεις που έχουν τεθεί.

Η επίλυση της (3) ως προς τις τάσεις δίνει :

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_r + \nu * \varepsilon_t) = \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{du}{dr} + \nu * \frac{u}{r} \right) \\ \sigma_t &= \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_t + \nu * \varepsilon_r) = \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{u}{r} + \nu * \frac{du}{dr} \right) \end{aligned}$$

Με παραγωγή των ανωτέρω σχέσεων και αντικατάσταση στην (1) προκύπτει η ακόλουθη διαφορική εξίσωση δευτέρου βαθμού που περιγράφει τη συμπεριφορά του δίσκου :

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \left(\frac{dH}{Hdr} + \frac{1}{r} \right) \frac{du}{dr} + \left(\frac{\nu}{Hr} \frac{dH}{dr} - \frac{1}{r^2} \right) u + (1 - \nu^2) \frac{r\omega^2\rho}{E} = 0 ,$$

όπου $H = H(r)$ το πάχος συναρτήσει της ακτίνας.

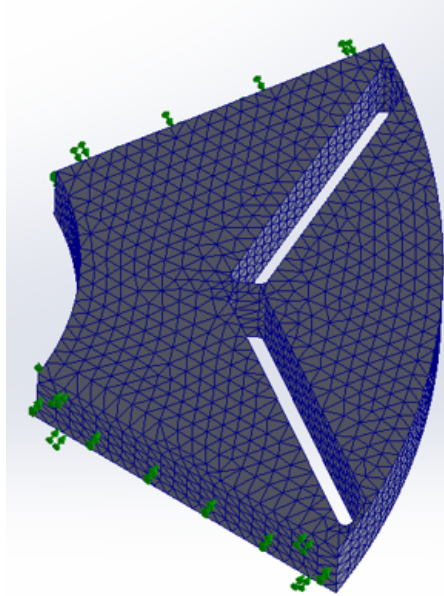
Για δίσκο σταθερού πάχους, η ανωτέρω εξίσωση παίρνει τη μορφή :

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} = - (1 - \nu^2) \frac{r\omega^2\rho}{E}$$

Συμπληρωματικά με την ανάλυση με τη βοήθεια του MATLAB, μπορεί να γίνει και χρήση του εργαλείου **Solidworks**.

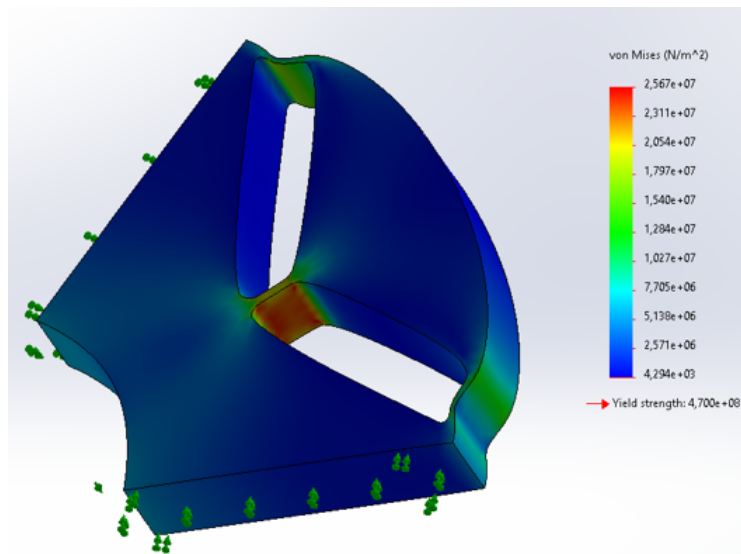
Αρχικά δημιουργείται, με εισαγωγή από αρχείο CAD, η γεωμετρία του δρομέα για ένα πόλο και στη συνέχεια ο επιμερισμός της στα πεπερασμένα στοιχεία, με πλέγμα τόσο πυκνό ώστε να παίρνουμε αξιόπιστο αποτέλεσμα χωρίς υπερβολική χρήση των υπολογιστικών πόρων και τη συνεπαγόμενη απαίτηση για μεγάλο υπολογιστικό χρόνο. Για την προσομοίωση, ορίζονται ακλόνητα τα σημεία επαφής του δρομέα με τον άξονα της μηχανής, για την τοποθέτηση του οποίου εφαρμόζεται τεχνική θέρμανσης του δρομέα ώστε να διασταλεί η οπή που προορίζεται να τοποθετηθεί και στη συνέχεια

αφήνεται να επανέλθει στη φυσιολογική θερμοκρασία (shrink fit). Ακλόνητα ορίζονται και τα πλαϊνά του τμήματος του δρομέα και εφαρμόζεται φορτίο που προκαλεί μηχανική τάση η φυγόκεντρη δύναμη που δρα στο σώμα του σιδήρου. Στο παράδειγμα φαίνεται μια γεωμετρία που αναλύθηκε στις 3000 ΣΑΛ.



Σχ.63 Ανάλυση γεωμετρίας δρομέα σε πεπερασμένα στοιχεία με το εργαλείο Solidworks.

Η γεωμετρία αυτή έχει λεπτό το τμήμα που συγκρατεί το τμήμα σιδήρου μπροστά από τις θέσεις των μαγνητών και του σιδήρου-γέφυρα που συνδέει το ένα ζεύγος πόλων με το διπλανό ώστε να περιοριστεί η σκέδαση μαγνητικής στο σώμα του σιδήρου. Φαίνεται ότι στις 3000 ΣΑΛ για αυτή τη γεωμετρία η μέγιστη πίεση είναι 27 MPa με όριο θραύσης του συγκεκριμένου τύπου σιδήρου τα 470 MPa.



Σχ.64 Στην εικόνα φαίνεται μεγεθυμένη η μετατόπιση του σιδήρου λόγω της φυγόκεντρου δύναμης

9. ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ / ΑΝΑΛΥΣΗ FEMM

Γενικά στοιχεία

	LPMC Model	Analytical model	2-D TS-FEA	3-D TS-FEA	CE-FEA
Accuracy	Relatively low due to coarse discretization of field solutions	Relatively low due to neglected local saturations	High because of almost no simplification	Highest because the whole geometry is considered	High (almost the same as TS-FEA)
Computation speed	Fastest due to its simplicity	Fast	Slow since large amount of data are required	Much slower than 2-D TS-FEA	Fast because the electric and magnetic symmetry are fully exploited
Incorporated into optimization	Easy	Easy	Difficult	Very difficult	Easy
Understanding for influence of geometrical parameters on performance	Best because of the straightforward relationship	Bad because of the ambiguous relationship	Relatively good because of the visualized structure	Better than 2-D TS-FEA	Relatively good (the same as TS-FEAs)

Σχ.65 Σύγκριση των χαρακτηριστικών των διαφόρων μεθόδων ανάλυσης πεδίου μηχανών. [17]

Αν και ο πίνακας αναφέρεται σε FSPM, ισχύει για ανάλυση όλων των μηχανών.

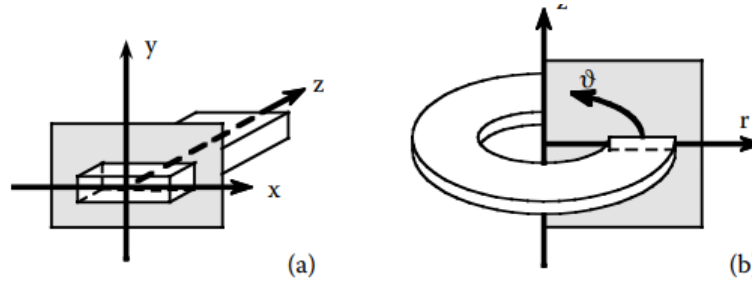
Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων βασίζεται στον χωρισμό της γεωμετρίας σε στοιχειώδεις περιοχές που ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία, συνήθως τρίγωνα ή τετράγωνα στο διδιάστατο επίπεδο, και εφαρμογή των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν το πεδίο σε κάθε ένα από αυτά τα στοιχεία.

Μια βασική ανάλυση των προς σχεδίαση ηλεκτρικών μηχανών γίνεται με τη χρήση δισδιάστατης 2D ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Βασικοί περιορισμοί είναι η απαίτηση για επαρκή υπολογιστική ισχύ, που σε περίπτωση μη πρόσβασης σε υπερυπολογιστές απαιτεί αρκετό χρόνο για εξαγωγή αποτελέσματος. Γρηγορότερο αποτέλεσμα δίνει η αριθμητική / αναλυτική επίλυση με χρήση μαγνητικών κυκλωμάτων με περιορισμό ωστόσο, στην ακρίβεια και τη δυνατότητα

Η ανάλυση του μαγνητικού πεδίου αποτελεί τη βάση στην ανάλυση της ηλεκτρικής μηχανής. Όπως έχει αναφερθεί, η συμμετρία που παρουσιάζει η μηχανή μας επιτρέπει να επιταχύνουμε την υπολογιστική διαδικασία, αναλύοντας το δισδιάστατο αντί για το τρισδιάστατο πρόβλημα και μάλιστα να περιοριστούμε σε ένα μόνο πόλο της μηχανής.

Αυτό συμβαίνει καθώς θεωρούμε δύο συμμετρίες :

- τη συμμετρία στο επίπεδο όπου αγνοούμε τα φαινόμενα που εμφανίζονται στις άκρες της μηχανής και θεωρούμε ότι έχουμε ίδια συμπεριφορά σε όλο το μήκος της μηχανής,
- και την αξονική συμμετρία όπου θεωρούμε ότι το μαγνητικό πεδίο επαναλαμβάνεται για κάθε πόλο της μηχανής.



Σχ.66 Σχήμα με τη συμμετρία επιπέδου(a) και την αξονική συμμετρία(b). [37]

Η επίλυση του προβλήματος, τελειώνει με τον υπολογισμό του δυναμικού του μαγνητικού πεδίου σε κάθε στοιχειώδες τμήμα της γεωμετρίας και γι' αυτό χρειάζονται οι εξισώσεις που περιγράφουν το πεδίο και οι αρχικές συνθήκες. Η πυκνότητα του μαγνητικού πεδίου και τα διανύσματα των δυνάμεων από την αλληλεπίδραση των πεδίων είναι αποτέλεσμα της γνώσης του δυναμικού A .

Η πυκνότητα του μαγνητικού πεδίου υπολογίζεται ως εξής : $B_x = \frac{\partial A}{\partial y}$, $B_y = \frac{\partial A}{\partial x}$ και η ροή του πεδίου που είναι το ολοκλήρωμα της μαγνητικής επαγωγής σε μια επιφάνεια S , $\Phi = \int_S \vec{B} \cdot \hat{n} dS$, στη δισδιάστατη ανάλυση είναι το γραμμικό ολοκλήρωμα της μαγνητικής επαγωγής σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο της γεωμετρίας.

Η δύναμη από την αλληλεπίδραση των πεδίων υπολογίζεται από τον ταυνοση πίεσης του

$$\text{Maxwell ως εξής : } F_t = \int_S \frac{1}{\mu} B_t B_n dS \text{ και } F_n = \int_S \frac{1}{2\mu} (B_n^2 - B_t^2) dS .$$

Ορίζονται οι συνοριακές συνθήκες που θέτουν την τιμή που λαμβάνει το διάνυσμα του δυναμικού A του μαγνητικού πεδίου στα άκρα του και χωρίζονται στις εξής ομάδες :

- Οριακή συνθήκη Dirichlet

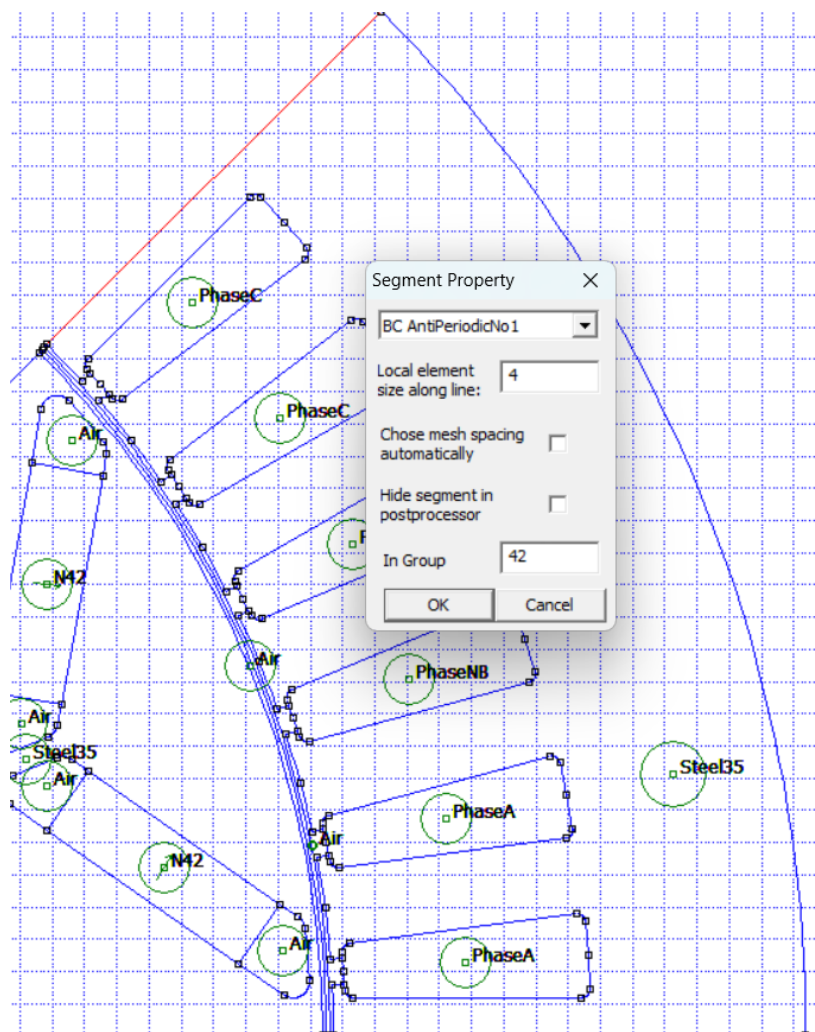
Σε αυτή την ομάδα ορίζεται απευθείας η τιμή που λαμβάνει το δυναμικό A . Συγκεκριμένα ορίζεται η μηδενική οριακή συνθήκη $A = 0$ για το εξωτερικό όριο του στάτη και για το εσωτερικό όριο του δρομέα όπου οι μαγνητικές γραμμές διέρχονται εφαιπτομενικά και δεν τέμνουν το όριο, γεγονός που αποτελεί παραδοχή και θα συνέβαινε μόνο αν η μηχανή περιβαλλόταν από υλικό με μηδενική μαγνητική διαπερατότητα.

- Οριακή συνθήκη Neumann

Σε αυτή την ομάδα, ορίζεται απευθείας η τιμή που λαμβάνει η πρώτη παράγωγος του δυναμικού A πάνω στο σύνορο δύο επιφανειών. Σε ομογενή οριακή συνθήκη Neumann (δηλαδή η πρώτη παράγωγος είναι ίση με μηδέν) οι μαγνητικές γραμμές τέμνουν κάθετα το σύνορο της επιφάνειας και ισοδυναμεί κατ' αντιστοιχία με το παράδειγμα που αναφέρεται στη συνθήκη Dirichlet με την ύπαρξη υλικού με άπειρη μαγνητική διαπερατότητα έξω από την επιφάνεια στην οποία ορίζεται η συνθήκη.

- Περιοδική και αντιπεριοδική οριακή συνθήκη

Σε αυτή την ομάδα, συσχετίζονται δύο σύνορα επιφανειών σα να υπάρχει συνέχεια μεταξύ τους και το δυναμικό A να είναι είτε ίδιο (περιοδική συνθήκη) είτε αντίθετο (αντιπεριοδική συνθήκη). Ορίζονται αντιπεριοδικές συνθήκες στα πλευρικά άκρα της γεωμετρίας όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα,



Σχ.67 Αντιπεριοδικές συνθήκες στο στάτη της μηχανής.

δεδομένης της συμμετρίας που υπάρχει και επιτρέπει να αναλυθεί μόνο ο ένας πόλος της μηχανής. Ορίζονται τόσες περιοδικές συνθήκες όσα και τα σύνορα επιφανειών που θεωρείται ότι αποτελούν συνέχεια.

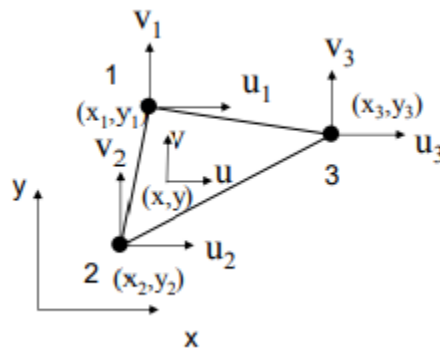
Επιπλέον, να σημειωθεί ότι για τους μαγνήτες της V-type γεωμετρίας που χρησιμοποιείται γίνεται χρήση τέτοιας συνθήκης ώστε να προσομοιωθεί ότι αυτοί ακουμπάνε στο πάνω μέρος τους στο σίδηρο του στάτη ενώ στο κάτω μέρος τους δε βρίσκονται σε επαφή με το στάτη, αφού κατά την περιστροφή τείνουν να φύγουν προς τα έξω και βρίσκονται απλά τοποθετημένοι στις σχισμές που έχουν δημιουργηθεί στο σώμα του στάτη.

Θεωρία Τριγώνου Σταθερής Τάσης - CST (Constant Strain Triangle Theory)

Όπως έχει αναφερθεί η ανάλυση πραγματοποιείται με τη χρήση Matlab. Μετά την εισαγωγή της γεωμετρίας ακολουθεί ο διαχωρισμός της σε πεπερασμένα στοιχεία τα οποία στην ανάλυσή μας είναι τρίγωνα. Η τιμή της μηχανικής τάσης (αντίστοιχα με την τιμή του δυναμικού στην ηλεκτρομαγνητική ανάλυση με τη χρήση του FEMM) που λαμβάνει κάθε τρίγωνο θεωρείται ότι αποτελεί χαρακτηριστικό του κάθε τριγώνου και είναι ίδια, για όλη την επιφάνεια του τριγώνου. Έτσι έχουμε το τρίγωνο σταθερής τάσης (constant strain triangle) που θα συμβολίζουμε CST στη συνέχεια.

Το CST υπήρξε το πρώτο στοιχείο που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων κατά τη δεκαετία του '60 και έκτοτε αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν και πιο πολύπλοκα στοιχεία που σε αρκετές περιπτώσεις αντικατέστησαν το CST στην ανάλυση. Στη δημοσίευση [29] του 1992 τονίζεται η ακαταλληλότητα για χρήση αυτού του στοιχείου λόγω των υψηλών σφαλμάτων από την πραγματική τιμή, αγνοώντας όμως τη ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστών και την τεράστια υπολογιστική ισχύ που θα αρχίσει να εμφανίζεται και να είναι διαθέσιμη στους ερευνητές τα επόμενα χρόνια.

Έτσι, πλέον είναι δυνατό με τη δημιουργία πυκνού πλέγματος να χρησιμοποιηθεί το CST για την πολύ καλή ανάλυση που είναι επιθυμητή στο δισδιάστατο επίπεδο.



Σχ.68 Διάνυσμα θέσης τριγώνου σταθερής τάσης. [30]

Στο σχήμα φαίνεται το CST που αποτελείται από 3 κόμβους που ανά δύο ανήκουν και σε διπλανό τρίγωνο. Κάθε κόμβος μπορεί να μετακινηθεί στη διεύθυνση x και y κατά u, v αντίστοιχα καθώς στην ανάλυσή μας θεωρούμε ότι δέχεται τις μηχανικές φορτίσεις στο επίπεδο. Το διάνυσμα της μετατόπισης (displacement - d) για κάθε τρίγωνο είναι :

$$\bar{d} = \{ u_1 \ v_1 \ u_2 \ v_2 \ u_3 \ v_3 \}^T,$$

με u, v να είναι η εκτίμηση της μετατόπισης για κάθε κόμβο όπως φαίνεται στο ανωτέρω σχήμα με βάση και το σχήμα του τριγώνου.

Θεωρώντας γραμμική διακύμανση της μετατόπισης στο πεπερασμένο τριγωνικό στοιχείο το μοντέλο της μετατόπισης εκφράζεται ως εξής :

$$\begin{aligned} u(x,y) &= a_1 + a_2x + a_3y \\ v(x,y) &= a_4 + a_5x + a_6y \end{aligned}$$

Οι μηχανικές τάσεις (στις διευθύνσεις x, y και διατμητική) είναι

$$\varepsilon_x = \frac{du}{dx}, \quad \varepsilon_y = \frac{dv}{dy}, \quad \gamma_{xy} = \frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx}$$

και

$$\begin{aligned} u &= N_1u_1 + N_2u_2 + N_3u_3 \\ v &= N_1v_1 + N_2v_2 + N_3v_3 \end{aligned}$$

Το N είναι η συνάρτηση που δείχνει το σχήμα του τριγώνου :

$$N(x,y) = \begin{bmatrix} N_1(x,y) & 0 & N_2(x,y) & 0 & N_3(x,y) & 0 \\ 0 & N_1(x,y) & 0 & N_2(x,y) & 0 & N_3(x,y) \end{bmatrix}$$

$$N_1(x,y) = \frac{1}{2A} [(y_3 - y_2)(x - x_2) - (x_3 - x_2)(y - y_2)]$$

$$N_2(x,y) = \frac{1}{2A} [(y_1 - y_3)(x - x_3) - (x_3 - x_1)(y - y_3)]$$

$$N_3(x,y) = \frac{1}{2A} [(y_2 - y_1)(x - x_1) - (x_2 - x_1)(y - y_1)]$$

ή στη μορφή :

$$N_1 = \frac{a_1 + b_1x + c_1y}{2A}, \quad N_2 = \frac{a_2 + b_2x + c_2y}{2A}, \quad N_3 = \frac{a_3 + b_3x + c_3y}{2A}$$

Το εμβαδόν του τριγώνου είναι :

$$A = \frac{1}{2} \det \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}$$

και οι συντελεστές

$$a_1 = x_2 y_3 - x_3 y_2, b_1 = y_2 - y_3, c_1 = x_3 - x_2$$

$$a_2 = x_3 y_1 - x_1 y_3, b_2 = y_3 - y_1, c_2 = x_1 - x_3$$

$$a_3 = x_1 y_2 - x_2 y_1, b_3 = y_1 - y_2, c_3 = x_2 - x_1$$

Επομένως οι μηχανικές καταπονήσεις είναι αναλυτικά :

$$\varepsilon_x = \frac{dN1}{dx} u_1 + \frac{dN2}{dx} u_2 + \frac{dN3}{dx} u_3,$$

$$\varepsilon_y = \frac{dN1}{dy} v_1 + \frac{dN2}{dy} v_2 + \frac{dN3}{dy} v_3,$$

$$\gamma_{xy} = \frac{dN1}{dy} u_1 + \frac{dN1}{dx} v_1 + \frac{dN2}{dy} u_2 + \frac{dN2}{dx} v_2 + \frac{dN3}{dy} u_3 + \frac{dN3}{dx} v_3$$

Ο πίνακας ελαστικότητας είναι :

$$D = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix}$$

Οι μηχανικές τάσεις προκύπτουν από το γινόμενο του πίνακα των καταπονήσεων με τον πίνακα ελαστικότητας :

$$\sigma = [D] * \varepsilon,$$

$$\sigma = [\sigma_{xx} \ \sigma_{yy} \ \sigma_{xy}]^T, \varepsilon = [\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \gamma_{xy}]^T$$

[30]

10. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Η βελτιστοποίηση κατά το σχεδιασμό του κινητήρα, είναι η διαδικασία βελτίωσης της απόδοσής του με την εύρεση της καλύτερης διαμόρφωσης των μεταβλητών σχεδιασμού, όπως το μέγεθος και το σχήμα του στάτη και του δρομέα, ώστε να ικανοποιούνται συγκεκριμένα κριτήρια απόδοσης, όπως η μέγιστη ροπή και η πυκνότητα ισχύος. Αυτό επιτυγχάνεται συνήθως με τη χρήση διαφόρων τεχνικών.

Γενετικός Αλγόριθμος

Ένας γενετικός αλγόριθμος (ΓΑ) είναι μια τεχνική βελτιστοποίησης εμπνευσμένη από τις αρχές της φυσικής επιλογής της θεωρίας της εξέλιξης και της γενετικής του τομέα της βιολογίας. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορους τομείς της μηχανικής, συμπεριλαμβανομένης της βελτιστοποίησης του σχεδιασμού κινητήρων, για τη βελτίωση της απόδοσης των μηχανικών συστημάτων. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης στη σχεδίαση κινητήρων περιλαμβάνει την εύρεση της βέλτιστης διαμόρφωσης των μεταβλητών σχεδίασης, όπως το σχήμα και το μέγεθος του στάτη και του δρομέα, με στόχο να ικανοποιηθούν συγκεκριμένα κριτήρια απόδοσης, όπως η μέγιστη ροπή και η πυκνότητα ισχύος αλλά και περιορισμοί όπως ο όγκος της μηχανής, η ποσότητα των υλικών και άλλα.

Οι ΓΑ παρέχουν μια ευέλικτη και αποτελεσματική λύση σε αυτό το πρόβλημα βελτιστοποίησης, αναζητώντας το σύνολο των πιθανών σχεδίων χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση με βάση τον πληθυσμό, μιμούμενοι τη διαδικασία φυσικής επιλογής, και ενημερώνοντας τις μεταβλητές σχεδιασμού μέσω πράξεων ανασυνδυασμού και μετάλλαξης. Η βασική ιδέα πίσω από τους γενετικούς αλγορίθμους, είναι η εξελικτική διαδικασία των οργανισμών, κατά την οποία οι οργανισμοί στη φύση εξελίσσονται από απλούς σε όλο και πιο πολύπλοκους και κάθε φορά επικρατεί ο ισχυρότερος ανάλογα τα κριτήρια που καθορίζουν τι είναι η ισχύς. Οι μεταβλητές απόφασης αναπαριστώνται ως χρωμοσώματα και δημιουργείται ένας πληθυσμός στο πλαίσιο που καλούμαστε να λύσουμε το πρόβλημα της βελτιστοποίησης.

Αρχικά επιλέγεται ένας συνδυασμός μεταβλητών, που μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί στα δεδομένα του περιβάλλοντος και στη συνέχεια μετά από πολλά στάδια αλλαγών, επιλογής και διασταύρωσης, προκύπτει μια σειρά αποτελεσμάτων που θεωρούνται τα καταλληλότερα για τα δεδομένα κριτήρια.

Η λειτουργία του γενετικού αλγορίθμου χωρίζεται κυρίως στα ακόλουθα βήματα :

1. Επιλογή της μεθόδου κωδικοποίησης για τον προσδιορισμό του μήκους κωδικοποίησης. Ύστερα, κωδικοποίηση των μεταβλητών και ρύθμιση του αρχικού μεγέθους του πληθυσμού.
2. Υπολογισμός της τιμής καταλληλότητας από τη συνάρτηση καταλληλότητας για την επιλογή του κατάλληλου χρωμοσώματος.
3. Απόφαση για το αν θα τερματιστεί ο αλγόριθμος εξετάζοντας τη σύγκλιση του αλγορίθμου, καθώς σε διαφορετική περίπτωση συνεχίζεται η εκτέλεση των επόμενων βημάτων.
4. Επιλογή λειτουργίας με τον υπολογισμό της τιμής καταλληλότητας.
5. Πραγματοποίηση διασταυρώσεων σύμφωνα με την πιθανότητα αυτές να συμβούν.
6. Πραγματοποίηση μεταλλάξεων σύμφωνα με την πιθανότητα αυτές να συμβούν.
7. Δημιουργία της νέας γενιάς πληθυσμού.
8. Αν ο αλγόριθμος ικανοποιεί την επιθυμητή συνθήκη τερματισμού, τότε η διαδικασία τερματίζεται και επιλέγεται το καλύτερο άτομο, διαφορετικά ο αλγόριθμος επαναλαμβάνεται στο βήμα 2.

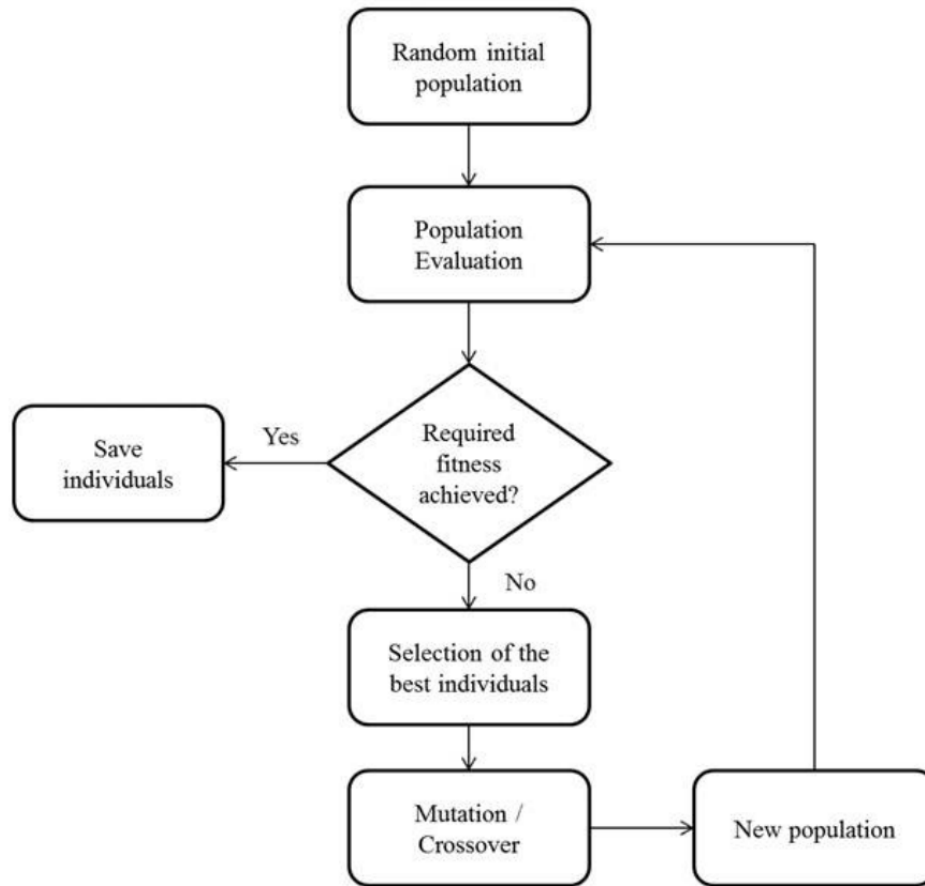
Παρακάτω εξηγούνται πιο αναλυτικά οι έννοιες που αναφέρονται στον ανωτέρω αλγόριθμο και σχετίζονται με τους γενετικούς αλγορίθμους στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού κινητήρων είναι:

- **Σχήμα κωδικοποίησης:** Οι μεταβλητές σχεδιασμού ενός κινητήρα μπορούν να αναπαρασταθούν ως χρωμόσωμα σε έναν γενετικό αλγόριθμο. Το σχήμα κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση του χρωμοσώματος επηρεάζει την απόδοση της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Για παράδειγμα, η δυαδική κωδικοποίηση, η κωδικοποίηση ακεραίων και η κωδικοποίηση πραγματικών τιμών χρησιμοποιούνται συνήθως σε προβλήματα βελτιστοποίησης σχεδιασμού κινητήρων.

- **Επιλογή:** Η λειτουργία επιλογής σε έναν γενετικό αλγόριθμο επιλέγει τα καταλληλότερα άτομα από τον τρέχοντα πληθυσμό για να συμμετάσχουν στην επόμενη γενιά. Η επιλογή ρουλέτας (Roulette wheel selection), η επιλογή τουρνουά (tournament selection) και η στοχαστική καθολική δειγματοληψία (stochastic universal sampling) είναι μερικές από τις δημοφιλείς μεθόδους επιλογής.
- **Διασταύρωση:** Η λειτουργία διασταύρωσης σε έναν γενετικό αλγόριθμο ανασυνδυάζει τα χρωμοσώματα δύο επιλεγμένων ατόμων για τη δημιουργία απογόνων που κληρονομούν τα χαρακτηριστικά και των δύο γονέων. Η διασταύρωση ενός σημείου, η διασταύρωση δύο σημείων και η ομοιόμορφη διασταύρωση είναι μερικές από τις πιο δημοφιλείς μεθόδους διασταύρωσης που χρησιμοποιούνται.
- **Μετάλλαξη:** Η λειτουργία μετάλλαξης σε έναν γενετικό αλγόριθμο αλλάζει τυχαία το χρωμόσωμα ενός ατόμου για να εισαχθούν νέες παραλλαγές στον πληθυσμό. Μερικές από τις πιο δημοφιλείς μεθόδους μετάλλαξης είναι η τυχαία μετάλλαξη, η μη ομοιόμορφη μετάλλαξη και η οριακή μετάλλαξη.
- **Συνάρτηση καταλληλότητας:** Η συνάρτηση καταλληλότητας σε έναν γενετικό αλγόριθμο αξιολογεί την απόδοση ενός ατόμου και αποδίδει μια τιμή καταλληλότητας που καθορίζει τις πιθανότητες επιλογής και αναπαραγωγής του. Η συνάρτηση καταλληλότητας σε προβλήματα βελτιστοποίησης σχεδιασμού κινητήρων αξιολογεί συνήθως την απόδοση ενός κινητήρα με βάση την αποδοτικότητα, τη ροπή, την πυκνότητα ισχύος και άλλες σχετικές παραμέτρους.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί, ότι η επιλογή του κατάλληλου σχήματος κωδικοποίησης, της μεθόδου επιλογής, της μεθόδου διασταύρωσης, της μεθόδου μετάλλαξης και της συνάρτησης καταλληλότητας είναι ζωτικής σημασίας για την απόδοση του γενετικού αλγορίθμου σε προβλήματα βελτιστοποίησης σχεδιασμού κινητήρων. Επιπλέον, οι παράμετροι του γενετικού αλγορίθμου, όπως το μέγεθος του πληθυσμού, ο αριθμός των γενεών και ο ρυθμός μετάλλαξης, διαδραματίζουν επίσης σημαντικό ρόλο στη διαδικασία βελτιστοποίησης.

Εφαρμογές: Οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν εφαρμοστεί σε ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων βελτιστοποίησης σχεδιασμού κινητήρων, συμπεριλαμβανομένης της βελτιστοποίησης σύγχρονων κινητήρων μονίμων μαγνητών (PMSM), επαγωγικών κινητήρων και άλλων τύπων ηλεκτρικών μηχανών. Ενδεικτικά αναφέρονται τρεις δημοσιεύσεις με χρήση γενετικών αλγορίθμων για προσδιορισμό της βέλτιστης μηχανής στην εκάστοτε εφαρμογή : [31] , [32], [33]



Σχ.69 Βήματα του γενετικού αλγορίθμου βελτιστοποίησης. [32]

Για την αύξηση της αντοχής του δρομέα, έχει προστεθεί το επιπλέον στήριγμα που βρίσκεται πάνω από τον μαγνήτη ώστε να περιορίζει την τάση του να φύγει προς τα έξω κατά την περιστροφή.

Στη συγκεκριμένη ανάλυση, έχει γίνει χρήση γενετικού αλγορίθμου για τον προσδιορισμό των καμπύλων επιφανειών του δρομέα που φαίνεται στο σχήμα με στόχο το πιο λεπτό πάχος της γέφυρας και του στηρίγματος του δρομέα, που όμως να μην υπερβαίνει τα 550 MPa που έχουν τεθεί ως το όριο.

Για την εκτέλεση του γενετικού αλγορίθμου χρησιμοποιείται η εργαλειοθήκη Global Optimization Toolbox της MATLAB που παρέχει συναρτήσεις που αναζητούν γενικές λύσεις σε προβλήματα που περιέχουν πολλαπλά μέγιστα ή ελάχιστα. Τα εργαλεία επίλυσης που διατίθενται περιλαμβάνουν τις ακόλουθες μεθόδους : υποκατάστατη (surrogate), αναζήτηση προτύπων (pattern search), γενετικό αλγόριθμο, σμήνος

σωματιδίων (particle swarm), προσομοιωμένη ανόπτηση (simulated annealing), πολλαπλή εκκίνηση (multistart) και παγκόσμια αναζήτηση (global search).

Η χρήση αυτών των μεθόδων μπορεί να γίνει για προβλήματα βελτιστοποίησης όπου η αντικειμενική συνάρτηση ή η συνάρτηση περιορισμών είναι συνεχής, ασυνεχής, στοχαστική, δεν διαθέτει παραγώγους ή περιλαμβάνει προσομοιώσεις. Για προβλήματα βελτιστοποίησης με πολλαπλούς αντικειμενικούς στόχους, μπορείτε να γίνει χρήση μετώπου Παρέτο (Pareto front) χρησιμοποιώντας επιλύτες γενετικού αλγορίθμου ή αναζήτησης προτύπων. [34]

Υλοποίηση Αλγορίθμου

Η βελτιστοποίηση που πραγματοποιείται σε αυτή την περίπτωση αφορά στην εύρεση του κατάλληλου δρομέα ώστε για δεδομένη μέγιστη τιμή yield strength να έχουμε το ελάχιστο πάχος στηρίγματος και γέφυρας σιδήρου στο δρομέα. Αρχικά, προσδιορίζονται οι μεταβλητές βελτιστοποίησης και οι περιορισμοί. Συνήθως έχουμε περισσότερες από μία μεταβλητές που αποτελούν το στόχο που πρέπει να εκπληρώνεται όπως εδώ είναι η μέγιστη τάση πλαστικής παραμόρφωσης. Στην περίπτωση που πρέπει να ικανοποιηθούν πολλαπλές μεταβλητές, συνήθως λαμβάνουμε ένα μέτωπο με πολλές λύσεις που ικανοποιούν το στόχο μας. Σε αυτή την περίπτωση είμαστε εμείς που αποφασίζουμε ποιο σχέδιο θα διαλέξουμε βάσει άλλων χαρακτηριστικών όπως για παράδειγμα μπορεί να είναι η μείωση του θορύβου ή κάποιο άλλο χαρακτηριστικό που δεν έχουμε προσθέσει στην προσομοίωση σαν χαρακτηριστικό.

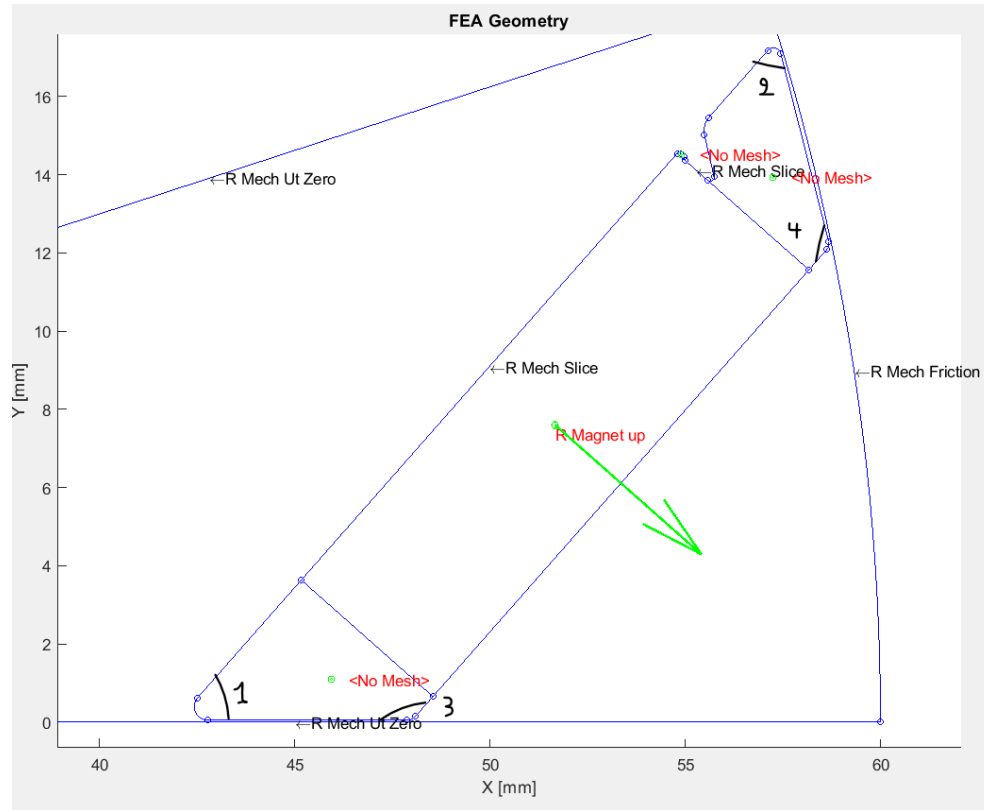
Αυτό συμβαίνει γιατί η βελτίωση της μιας μεταβλητής βελτιστοποίησης, θα προκαλεί την επιδείνωση των άλλων μεταβλητών βελτιστοποίησης. Η συνάρτηση συνολικού κόστους για την επιλογή του επιθυμητού σχεδίου, γίνεται με τη χρήση της αντικειμενικής συνάρτησης στην οποία προστίθενται συντελεστές βαρύτητας. Το ελάχιστο σημείο που αντιστοιχεί στη συνάρτηση κόστους είναι το καλύτερο σχέδιο που θα επιλέξουμε. Έτσι, μπορεί να επιτευχθεί η μετατροπή μεταξύ προβλημάτων βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων και προβλημάτων βελτιστοποίησης ενός στόχου, έτσι ώστε η συνάρτηση συνολικού κόστους να είναι η απαιτούμενη αντικειμενική συνάρτηση.

Σαν μεταβλητές βελτιστοποίησης λαμβάνονται το πάχος της γέφυρας, το πάχος του στηρίγματος στο δρομέα και η ακτίνα του καμπύλου τμήματος στην άκρη των μαγνητών στο τμήμα του αέρα που στόχο έχει τη μείωση της σκέδασης του αέρα. Έτσι έχουμε 6 μεταβλητές που βελτιστοποιούνται.

Το διάνυσμα των 6 μεταβλητών αναπαριστάται ως V .

$$V = [\text{rib_thickness} \quad \text{bridge_thickness} \quad R1 \quad R2 \quad R3 \quad R4]$$

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται σε ποια καμπύλωση του σιδήρου αντιστοιχούν οι ακτίνες $R1, R2, R3, R4$



Σχ.70 Σχήμα με την αντιστοίχιση των μεταβλητών του διανύσματος V με τις καμπυλώσεις στις θήκες του δρομέα.

Είναι σημαντικό να ορίσουμε κάποιες τιμές-περιορισμούς των μεταβλητών βελτιστοποίησης, ώστε ο γενετικός αλγόριθμος να γνωρίζει σε ποια όρια θα κυμανθεί ώστε η αναζήτηση να γίνει πιο γρήγορα και να μην εξετάζονται λύσεις που εκ των προτέρων γνωρίζουμε ότι δε θα δώσουν αποδεκτό αποτέλεσμα. Είναι ουσιαστικά ο καθορισμός του εύρους των μεταβλητών.

Στην δική μας περίπτωση, ορίζουμε το εύρος των τιμών βάσει της ανάλυσης μέγιστης τάσης και πάχους στηρίγματος και γέφυρας που έχει πραγματοποιηθεί για αριθμό πόλων από 4 έως 10.

Το εύρος είναι το εξής:

$$\begin{aligned}\text{Άνω όριο : UB} &= [6 \ 6 \ 3 \ 3 \ 3 \ 3] \\ \text{Κάτω όριο : LB} &= [0.3 \ 0.1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]\end{aligned}$$

Αφού καθορίσουμε τις μεταβλητές βελτιστοποίησης και την αντικειμενική συνάρτηση, στη συνέχεια εκτελείται ο αλγόριθμος. Ανάλογα το πλήθος των λύσεων που είναι επιθυμητό να επεξεργαστούν ταυτόχρονα, ορίζεται και το μέγεθος του αρχικού πληθυσμού. Για μεγάλο μέγεθος αρχικού πληθυσμού είναι πιο εύκολο να γίνει ο προσδιορισμός της συνολικής βέλτιστης λύσης αλλά αυξάνεται ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης.

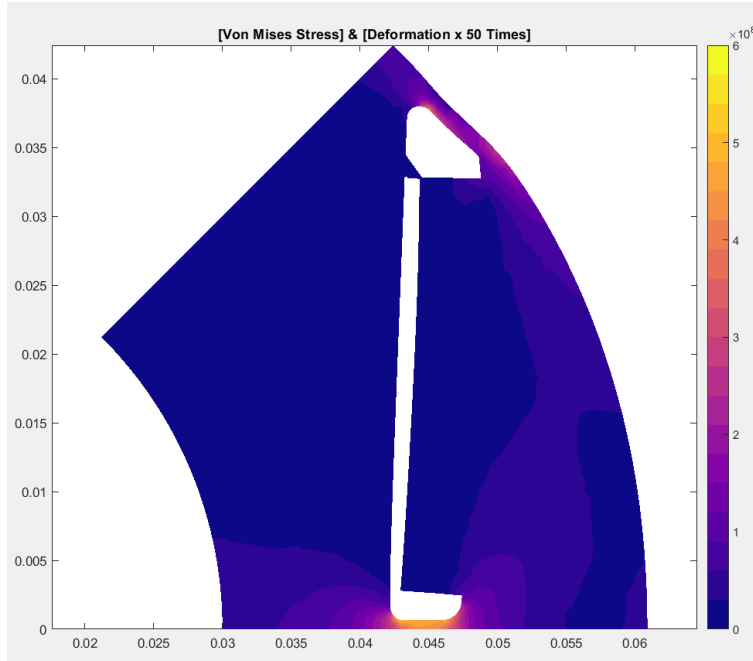
Αφού έχουμε τον αρχικό πληθυσμό, στη συνέχεια, αξιολογείται η καταλληλότητα κάθε σχεδίου που ανήκει στον πληθυσμό ως υποψήφια λύση. Εάν επιτευχθεί η απαιτούμενη καταλληλότητα, τα άτομα αποθηκεύονται. Σε διαφορετική περίπτωση επιλέγονται τα καλύτερα σχέδια και τροποποιούνται έτσι ώστε να προκύψει ένας νέος πληθυσμός, ο οποίος χρησιμοποιείται στην επόμενη επανάληψη της εκτέλεσης του αλγορίθμου. Η τροποποίηση των σχεδίων είναι ουσιαστικά πράξη μετάλλαξης και ανασυνδυασμού των χρωμοσωμάτων.

Ο νέος πληθυσμός που προκύπτει αξιολογείται και οι ίδιες λειτουργίες επαναλαμβάνονται μέχρι να επιτευχθεί το επίπεδο καταλληλότητας-στόχος ή να επιτευχθεί ο μέγιστος αριθμός γενεών. Στον αλγόριθμο έχουμε θέσει μέγιστο αριθμό γενεών τις 1000 αλλά ο αλγόριθμος τερματίζει συνήθως μετά από 50-60 γενιές στις προσομοιώσεις που τρέξαμε. Τα χρωμοσώματα των ατόμων αποτελούνται από τις παραμέτρους σχεδιασμού. Στη συνέχεια θα ακολουθήσει εισαγωγή των νέων παραμέτρων στο εργαλείο προσομοίωσης για να λάβουμε τα αποτελέσματα ροπής και ροής της μηχανής.

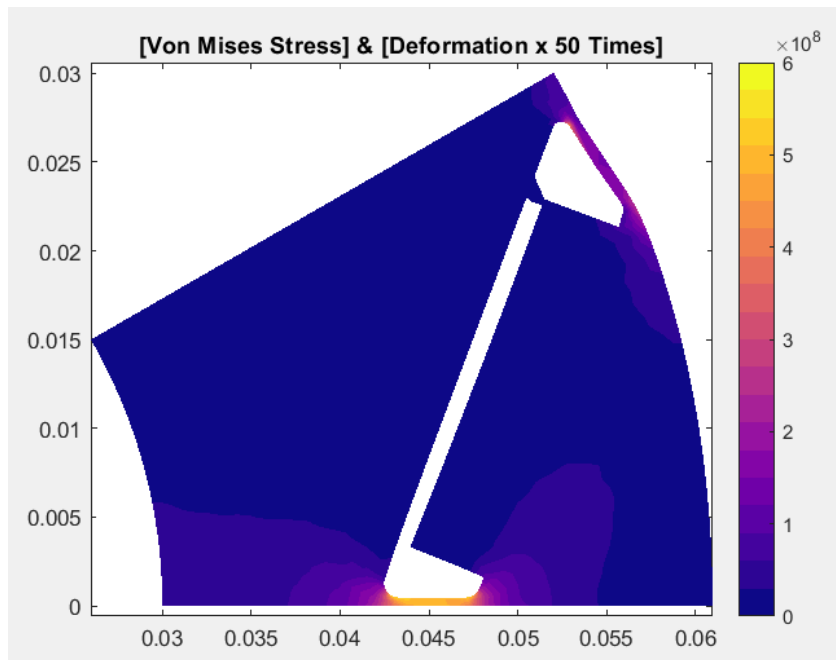
Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης με τη χρήση του ΓΑ

Στις εικόνες από τα αποτελέσματα της ανάλυσης που ακολουθούν, φαίνεται και η παραμόρφωση του δρομέα κατά την περιστροφή στις 15.000 ΣΑΛ μεγενθυμένη κατά 50 φορές για καλύτερη κατανόηση.

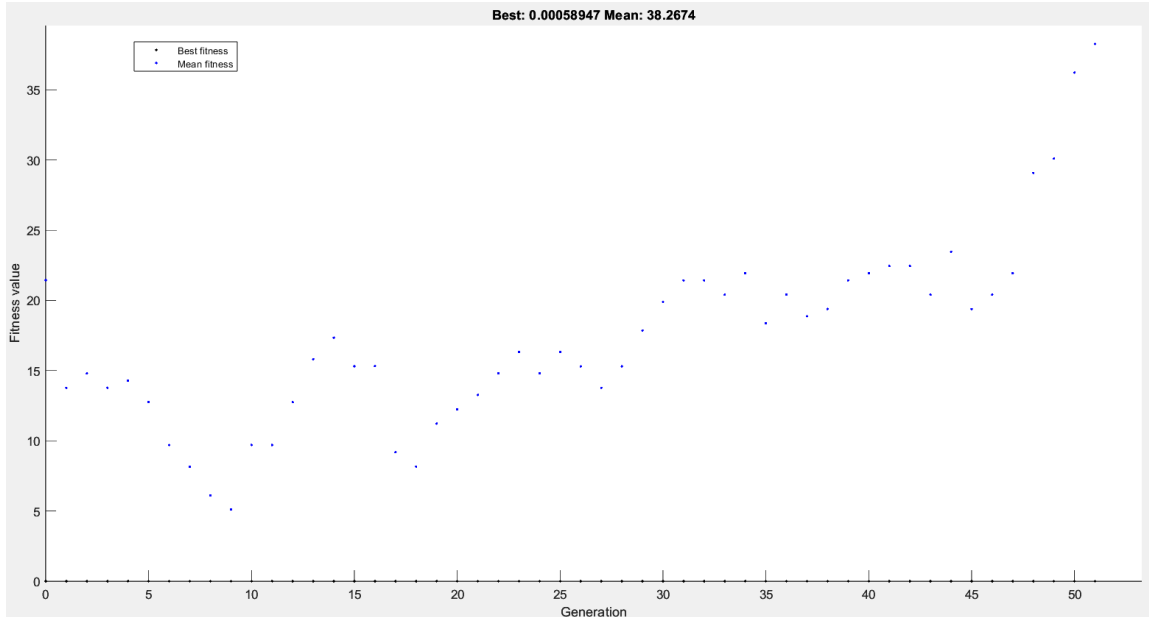
Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για αριθμό πόλων από 4 ως 10 :



$\Sigma\chi.71 P = 4$, Max Strength = 550 MPa,
 $V = [1.5274 \ 0.9990 \ 0.9742 \ 0.7888 \ 1.2751 \ 0.6051]$

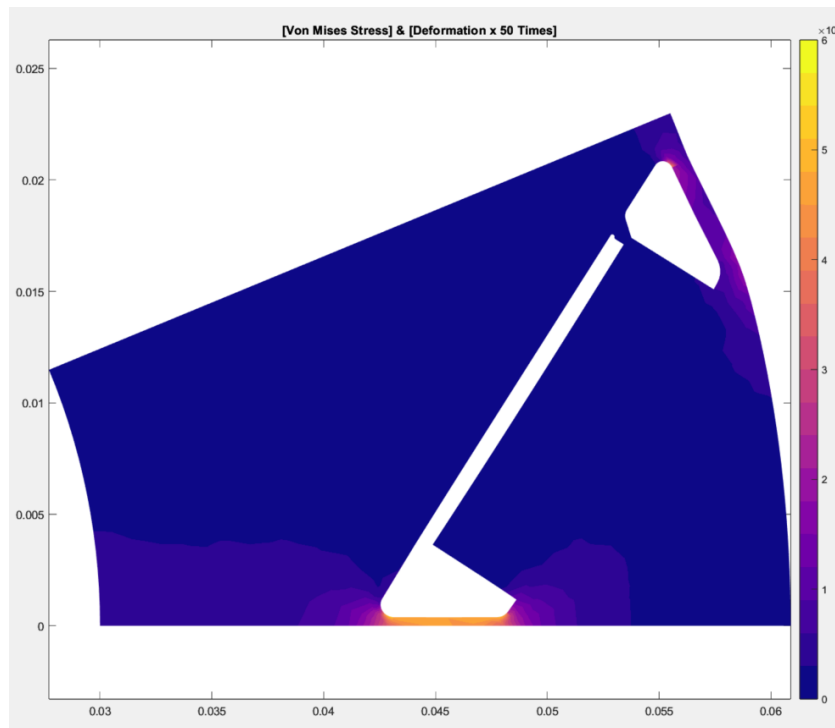


$\Sigma\chi.72 P = 6$, Max Stress : 550 MPa,
 $V = [1.1972 \ 0.6125 \ 0.7560 \ 0.4233 \ 0.7163 \ 0.6138]$

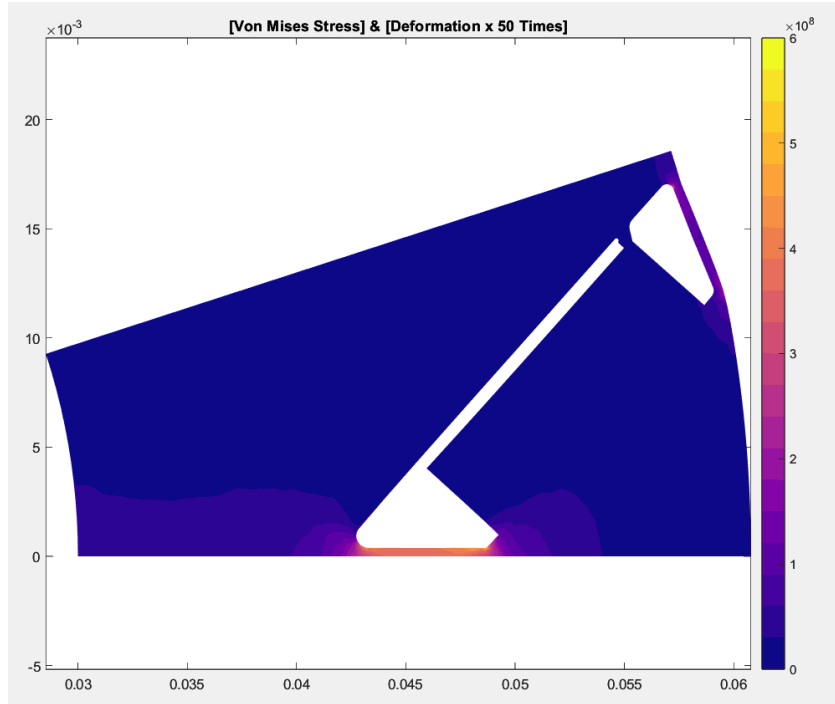


Σχ.73 Μέση και καλύτερη τιμή καταλληλότητας για κάθε γενιά του γενετικού αλγορίθμου.

Στο γράφημα αυτό, φαίνεται η καλύτερη και η μέση τιμή καταλληλότητας (fitness value) για τα άτομα του πληθυσμού σε κάθε γενιά που αναλύθηκε από τον αλγόριθμο.



Σχ.74 $P = 8$, $Max = 550 \text{ MPa}$, $V = [1.0390 \ 0.4006 \ 0.5482 \ 0.2301 \ 0.5622 \ 1.2001]$



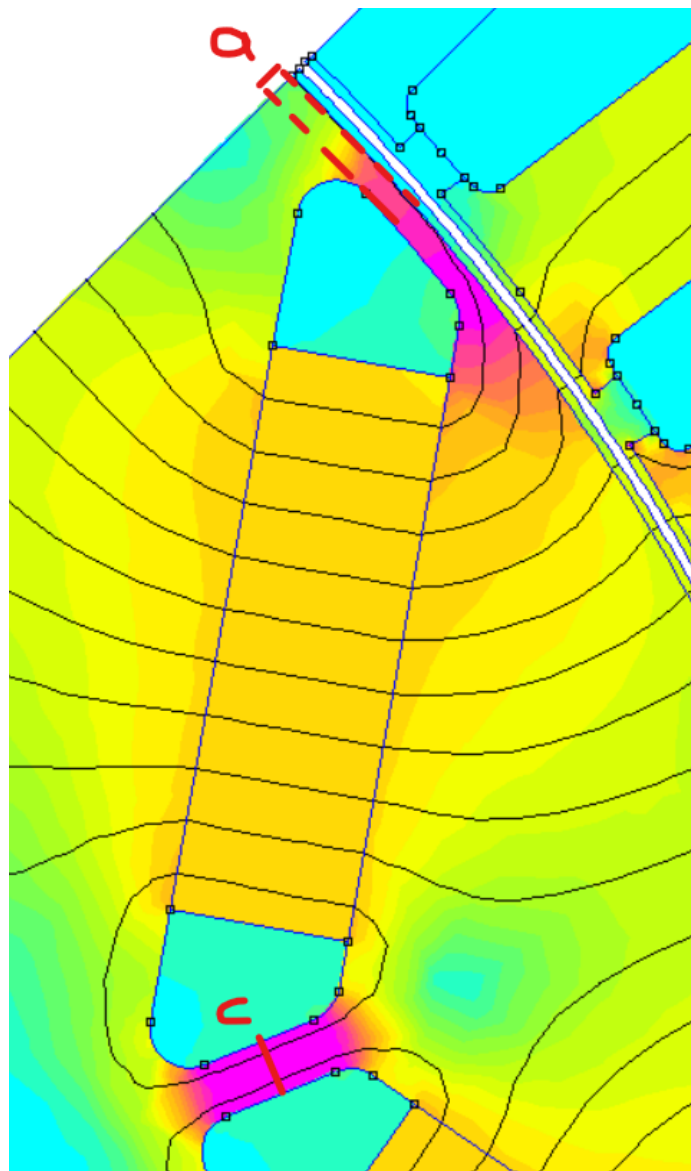
$\Sigma \chi.75 P = 10, Max = 550 MPa, V = [0.9069 \ 0.4091 \ 0.3461 \ 0.1930 \ 0.2860 \ 0.2136]$

11. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Η μηχανή που επιλέχθηκε να αναλυθεί, καθώς προσφέρει καλή αντοχή στις υψηλές στροφές, είναι η V-type. Μελετώντας συγκεκριμένα χαρακτηριστικά κάθε φορά προκύπτει μια βέλτιστη μηχανή. Τα χαρακτηριστικά που επιλέχθηκαν να αναλυθούν ακολουθούν και αναλύονται παρακάτω :

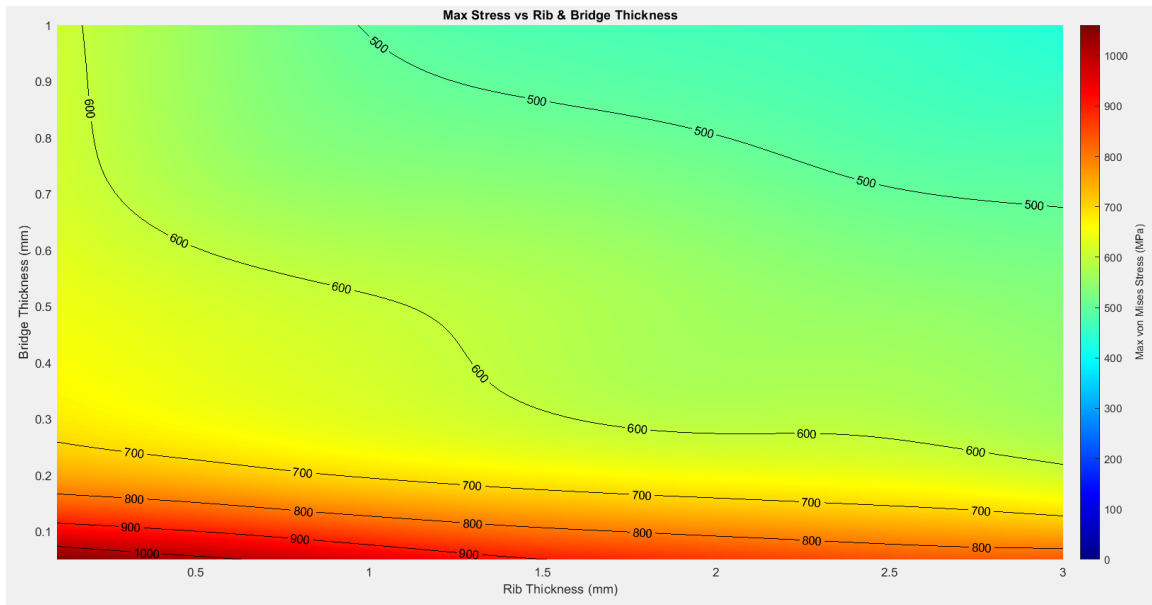
Σχέση συντελεστών a , c

Από το παρακάτω σχήμα φαίνονται οι συντελεστές a (Rib Thickness), c (Bridge Thickness) στην επιλεγμένη γεωμετρία για 6-πολική μηχανή.



Σχ.76 Σχήμα με τους συντελεστές a (Rib Thickness), c (Bridge Thickness).

Σε ταχύτητα 15.000 ΣΑΛ

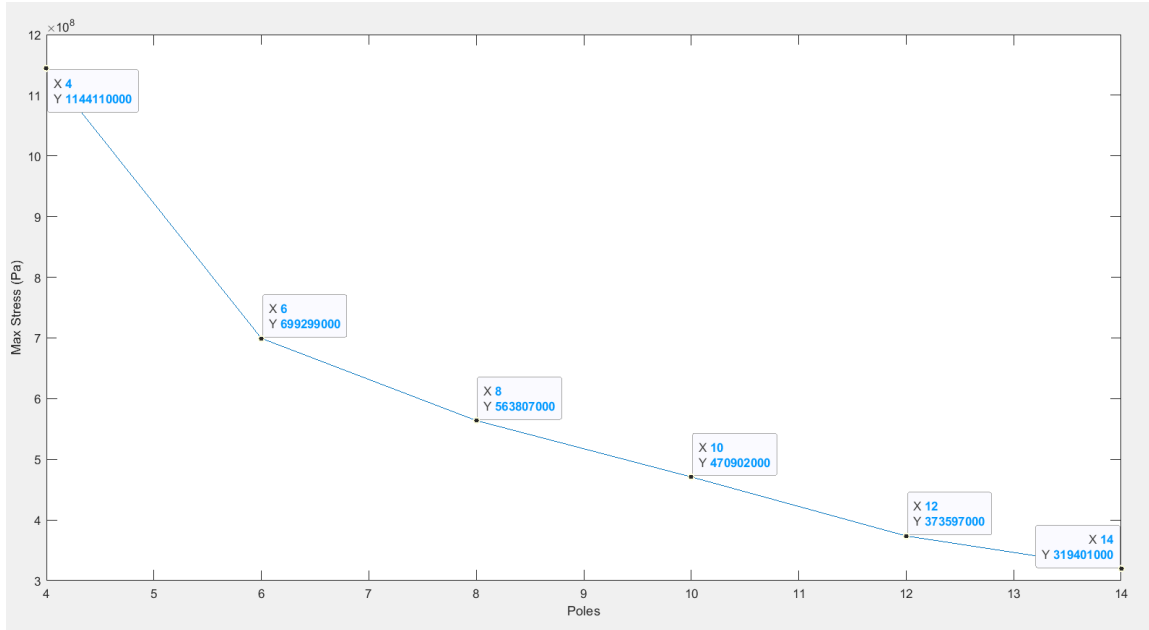


Σχ.77 Μέγιστη τάση στο δρομέα 6-πολικής μηχανής σε συνάρτηση με το πάχος γέφυρας και στηρίγματος.

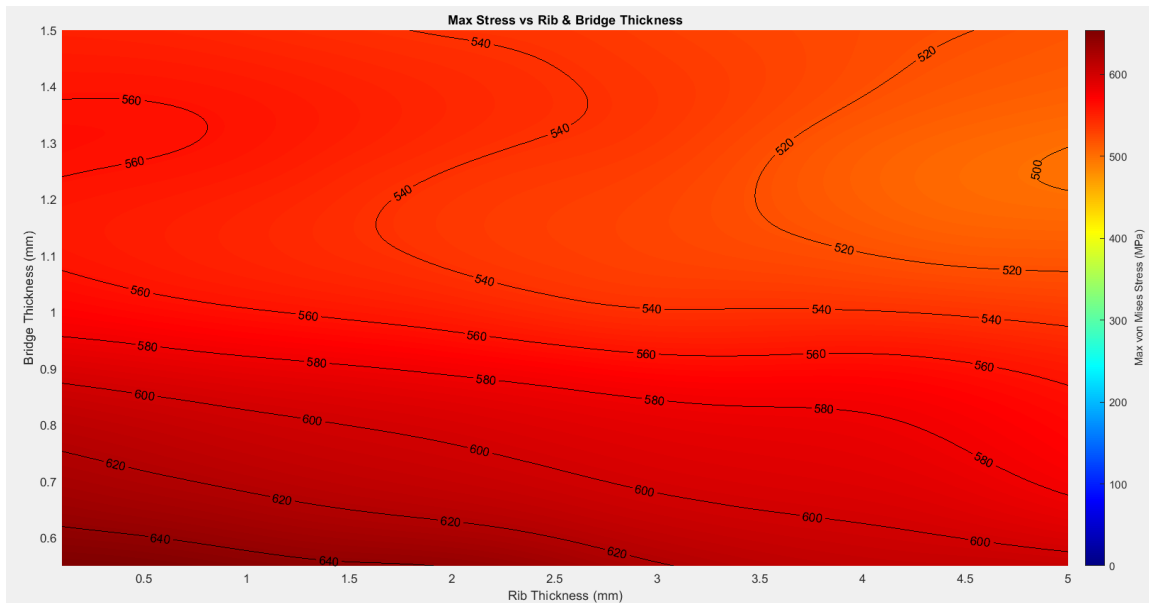
Ο περιορισμός του πάχους των γεφυρών και στηριγμάτων κοντά στους μαγνήτες της μηχανής έχει στόχο να περιορίσει στο νέο σχέδιο της μηχανής τη σκέδαση της ροής και την αύξηση της ροπής.

Αριθμός πόλων

Ενδιαφέρον παρουσιάζει στη συνέχεια η μελέτη της μέγιστης τάσης που υφίσταται ο σίδηρος του δρομέα ανάλογα των αριθμό των πόλων της μηχανής. Όπως αναμένουμε, για περισσότερους πόλους θα έχουμε για το ίδιο πάχος γέφυρας και στηριγμάτων μικρότερη τάση καθώς το τμήμα σιδήρου του δρομέα που πρέπει να συγκρατείται είναι μικρότερο αφού ο ένας πόλος καταλαμβάνει μικρότερο ποσοστό του δρομέα για σταθερό μέγεθος δρομέα. Εδώ έχει ενδιαφέρον να μελετηθεί και η σχέση ροπής ή απόδοσης με τον αριθμό των πόλων.



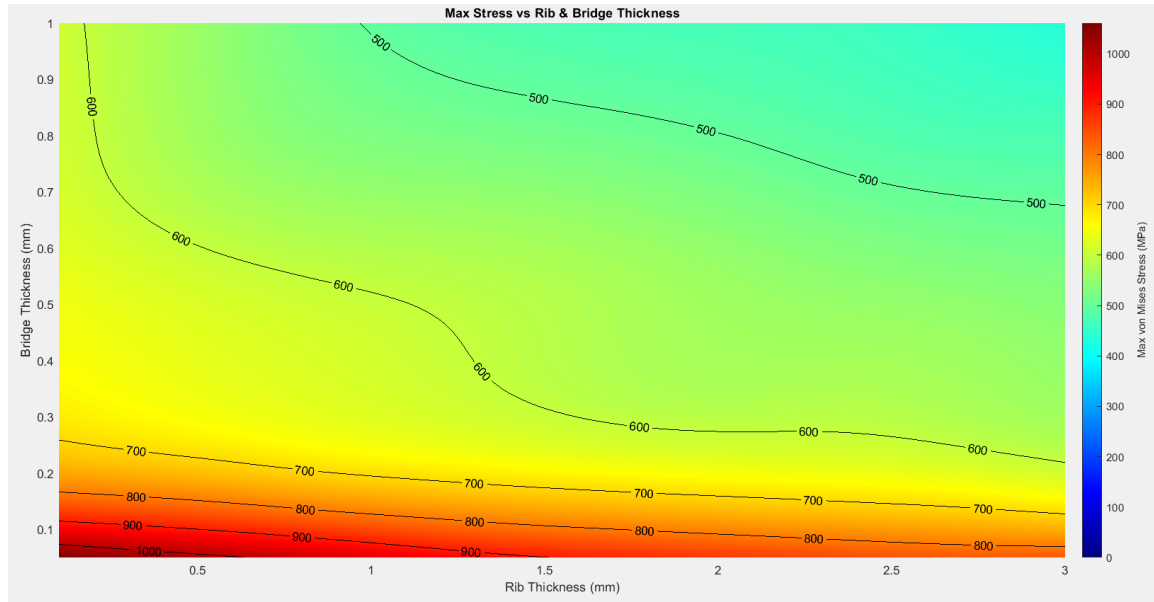
Σχ.78 Διάγραμμα μέγιστης τάσης στο δρομέα για ταχύτητα 15.000 ΣΑΛ με $c = 3.61 \text{ mm}$ και $a = 0.42 \text{ mm}$.



Σχ.79 $P = 4$, $V = [1.5274 \quad 0.9990 \quad 0.9742 \quad 0.7888 \quad 1.2751 \quad 0.6051]$

Για 4-πολική μηχανή παρατηρούμε ότι η μάζα του στάτη που βρίσκεται πάνω από τους μαγνήτες είναι μεγάλη και στις 15.000 ΣΑΛ χρειάζεται μεγάλο πάχος γέφυρας και στηρίγματος στο σίδηρο του δρομέα.

Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση των μηχανών με διαφορετικό αριθμό πόλων είναι αυτές που έχουν προκύψει από τη βελτιστοποίηση με την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου που αναφέρεται στο προηγούμενο κεφάλαιο.

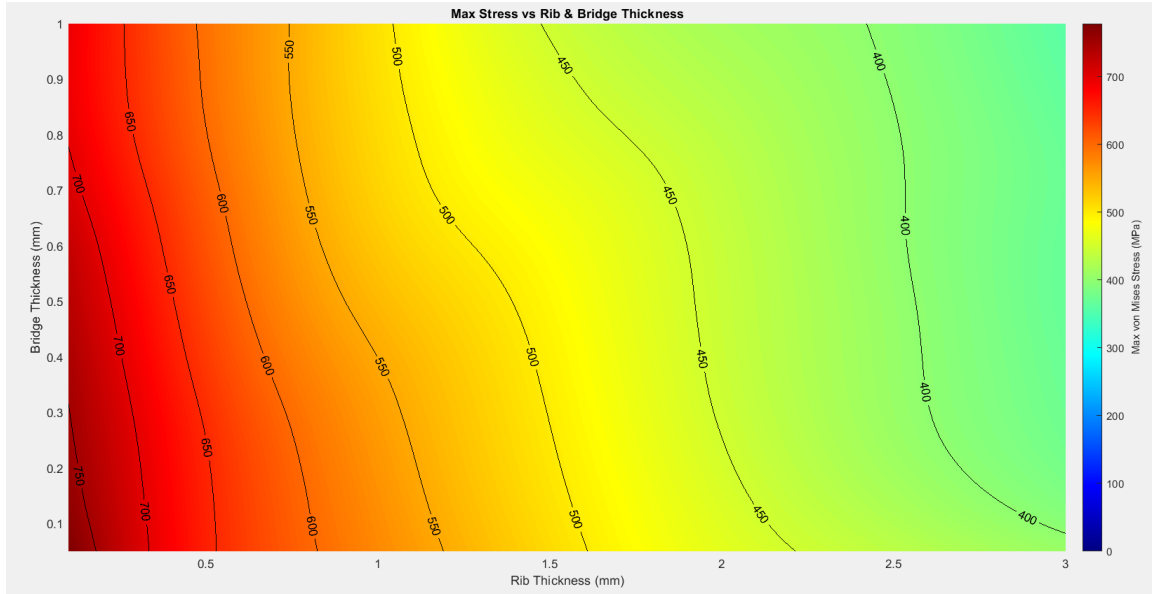


(το σχήμα είναι το ίδιο που αναφέρεται στην προηγούμενη υποενότητα αλλά προστίθεται και εδώ για λόγους πληρότητας)

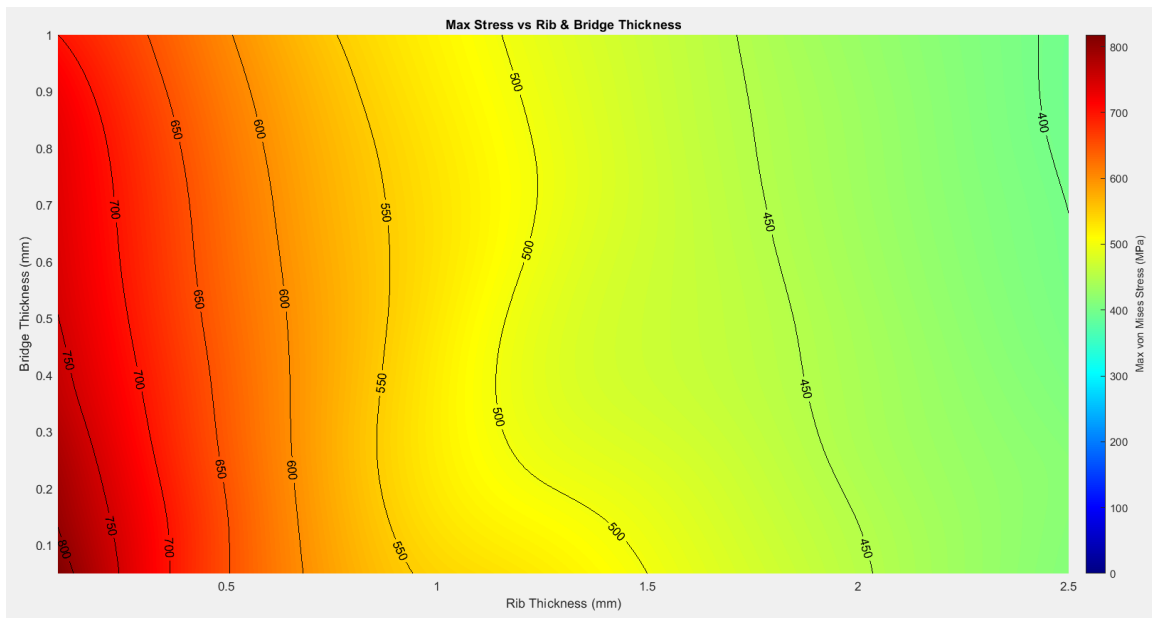
$$\Sigma \chi.80 P=6, V = [1.1972 \quad 0.6125 \quad 0.7560 \quad 0.4233 \quad 0.7163 \quad 0.6138]$$

Για 6 πόλους παρατηρούμε το εύρος των τιμών που πρέπει να λάβουν το πάχος γέφυρας και το πάχος του στηρίγματος ώστε στο δρομέα να εμφανίζεται μέγιστη τιμή τάσης 550 MPa για την οποία υπάρχουν αρκετές λύσεις υλικών που να μας καλύπτουν.

Για 8 και 10 πόλους βλέπουμε ότι για τιμές τάσης <550 MPa μπορούμε να έχουμε ακόμα μικρότερο πάχος στηρίγματος μέχρι και 1 mm το πάχος της γέφυρας σχεδόν μηδενίζεται στα 0.1 mm .



$$\Sigma\chi.81 P= 8, V = [1.039 \quad 0.4006 \quad 0.5482 \quad 0.2301 \quad 0.5622 \quad 1.2001]$$

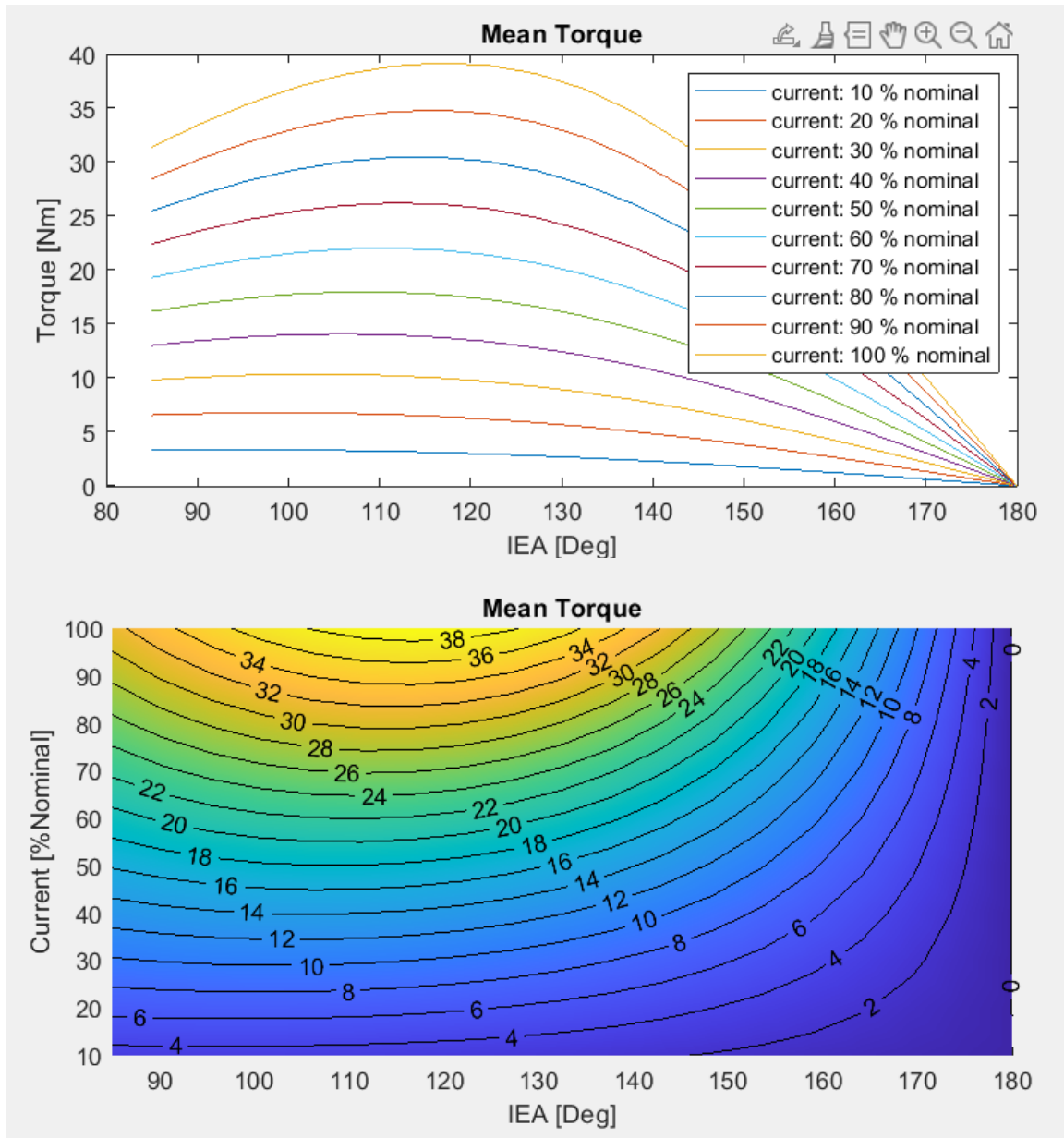


$$\Sigma\chi.82 P= 10, V = [0.9069 \quad 0.4091 \quad 0.3461 \quad 0.1930 \quad 0.2860 \quad 0.2136]$$

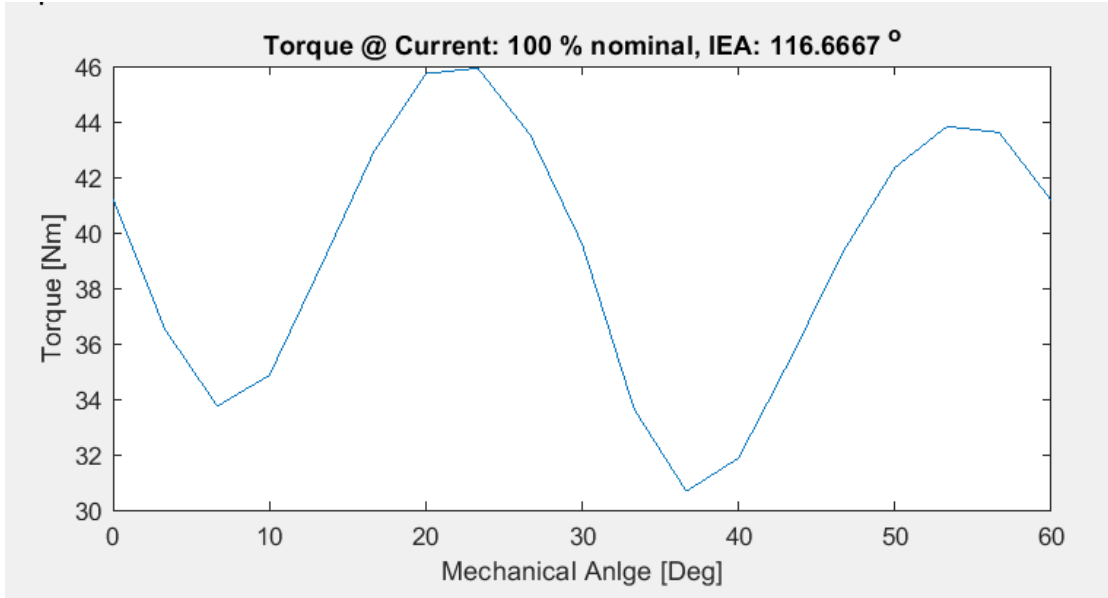
Αποτελέσματα Πριν και Μετά τη Βελτιστοποίηση

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για 6-πολική μηχανή πριν τη βελτιστοποίηση με το γνωστό διάνυσμα $V = [4.5 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]$:

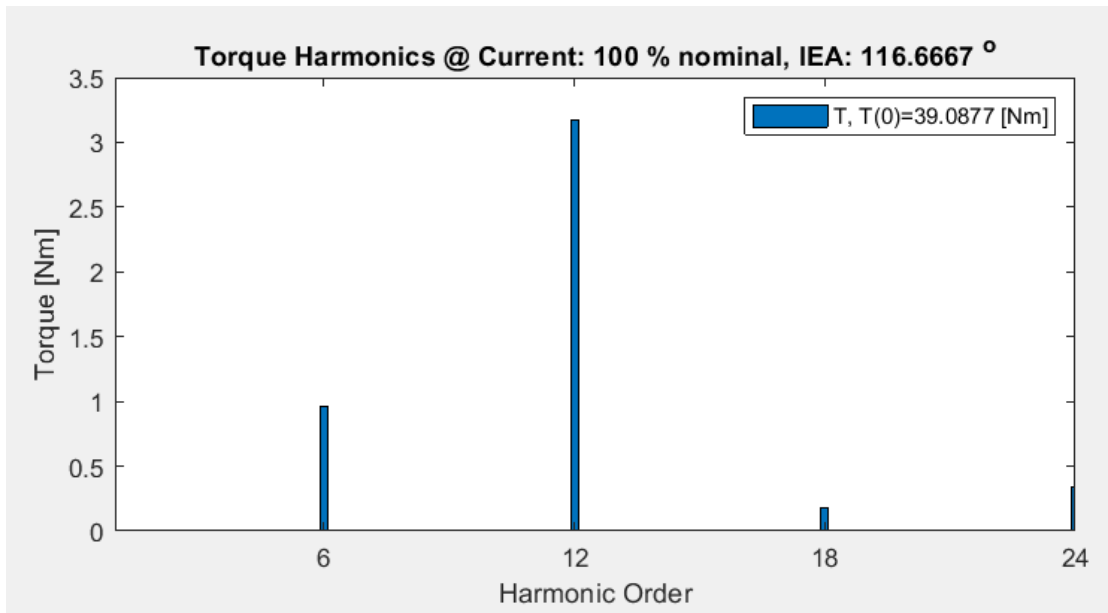
Γράφημα της ροπής σε σχέση με την εσωτερική ηλεκτρική γωνία (IEA).



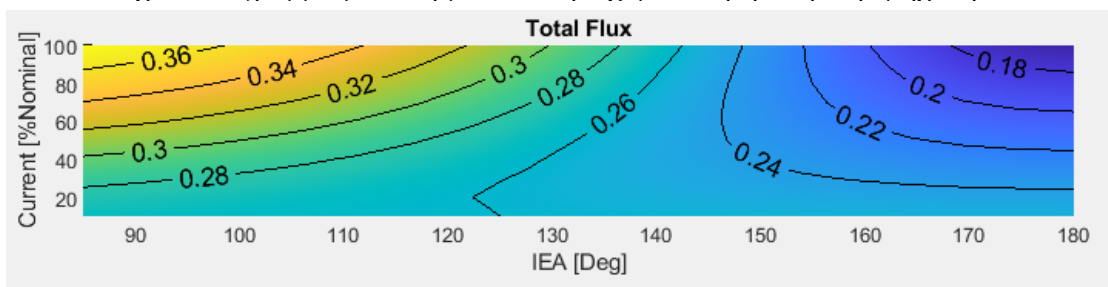
Σχ.83 Διαγράμματα μέσης ροπής σε συνάρτηση με την εσωτερική γωνία ροπής και το ρεύμα λειτουργίας.

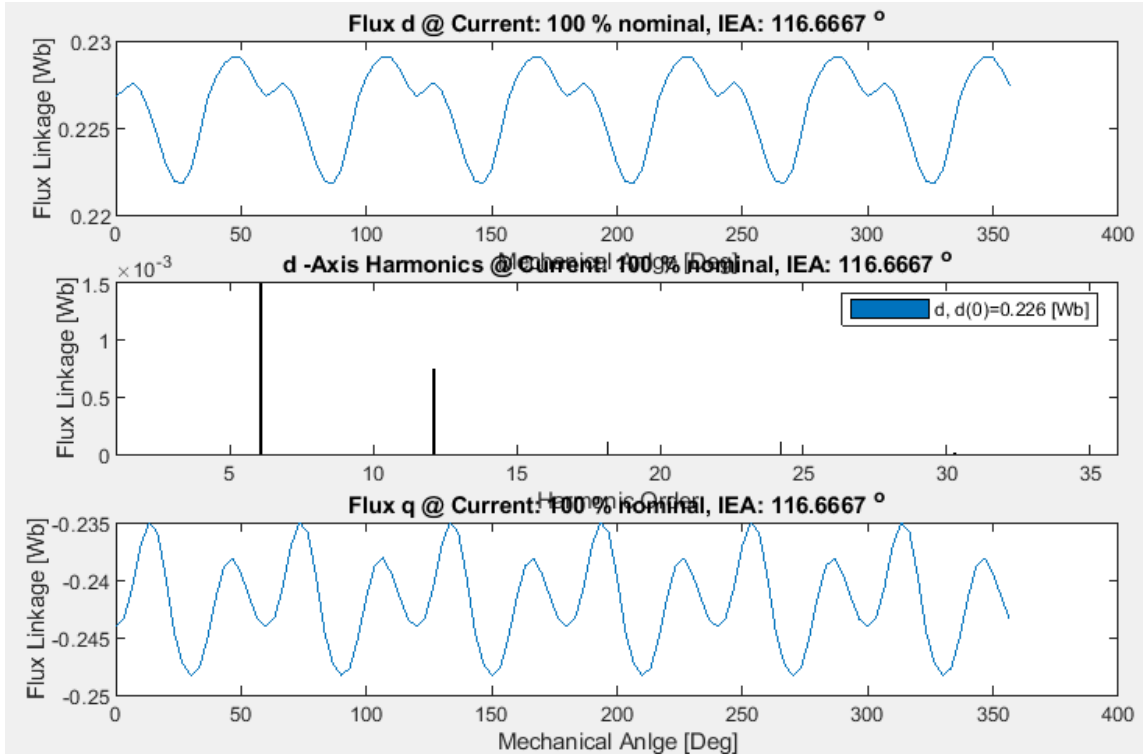


Σχ.84 Διάγραμμα ροπής σε μέγιστη φόρτιση σε συνάρτηση με τη θέση του δρομέα.

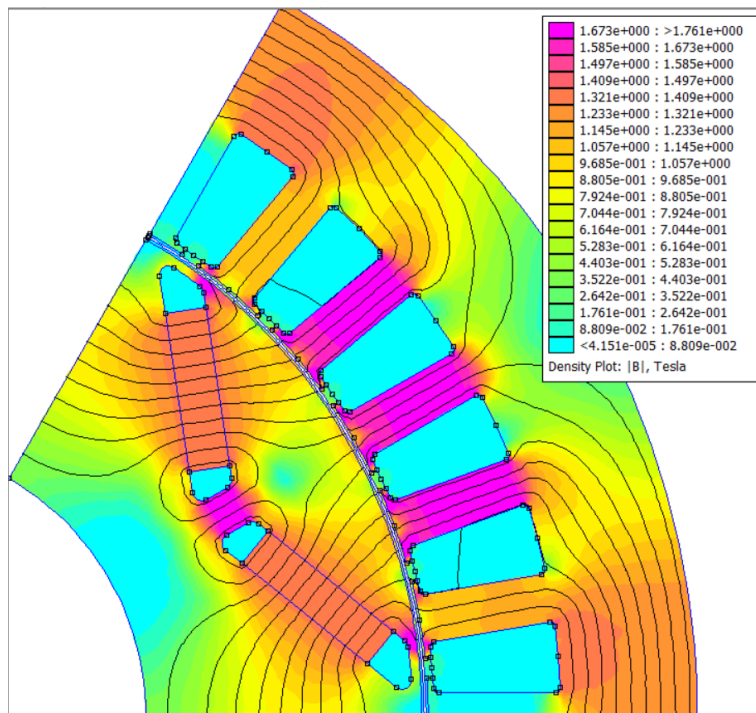


Σχ.85 Διάγραμμα με το αρμονικό περιεχόμενο της ροπής της μηχανής.



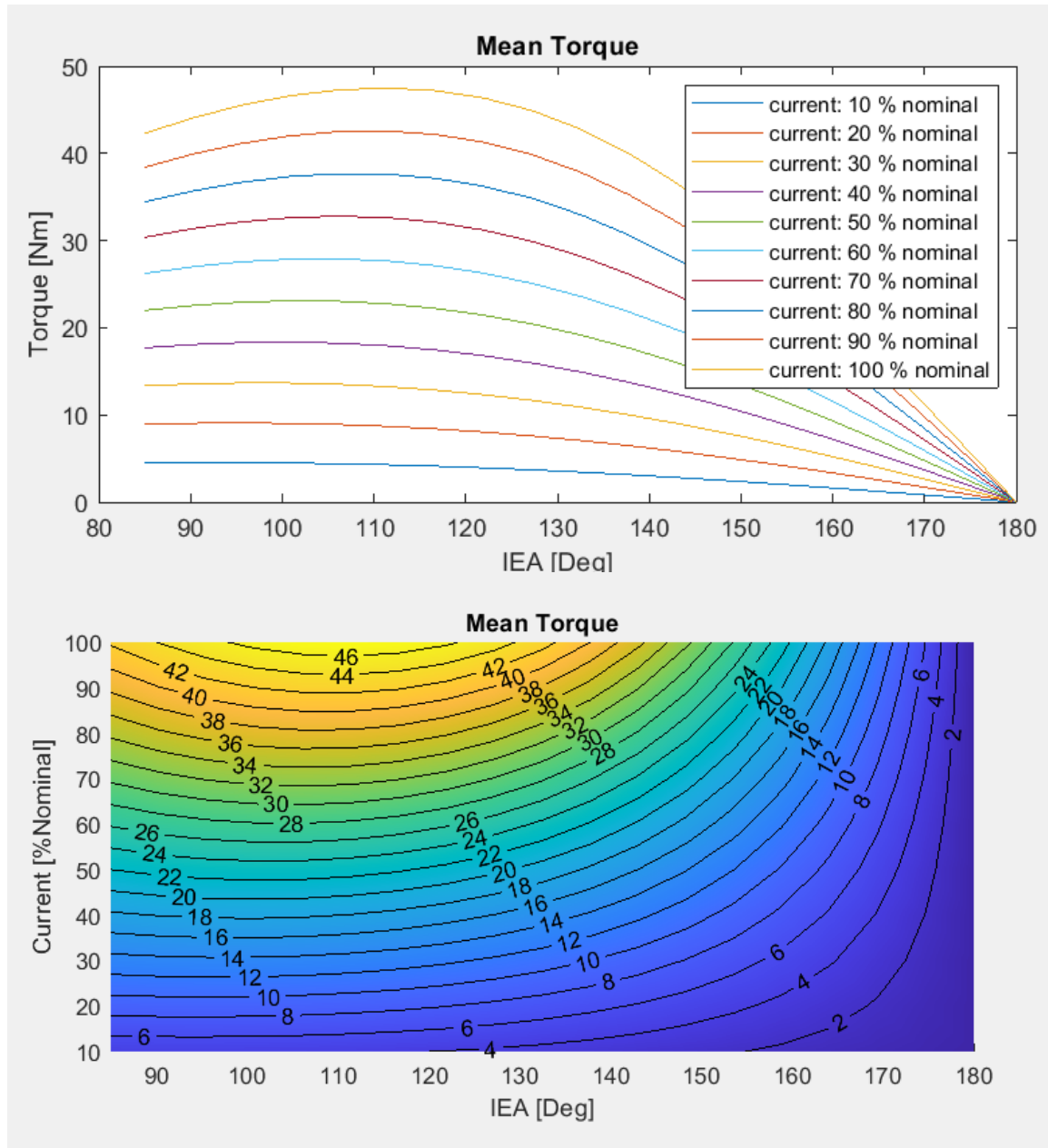


Σχ.86 Διαγράμματα ροής (ολικής, d και q) της μηχανής.

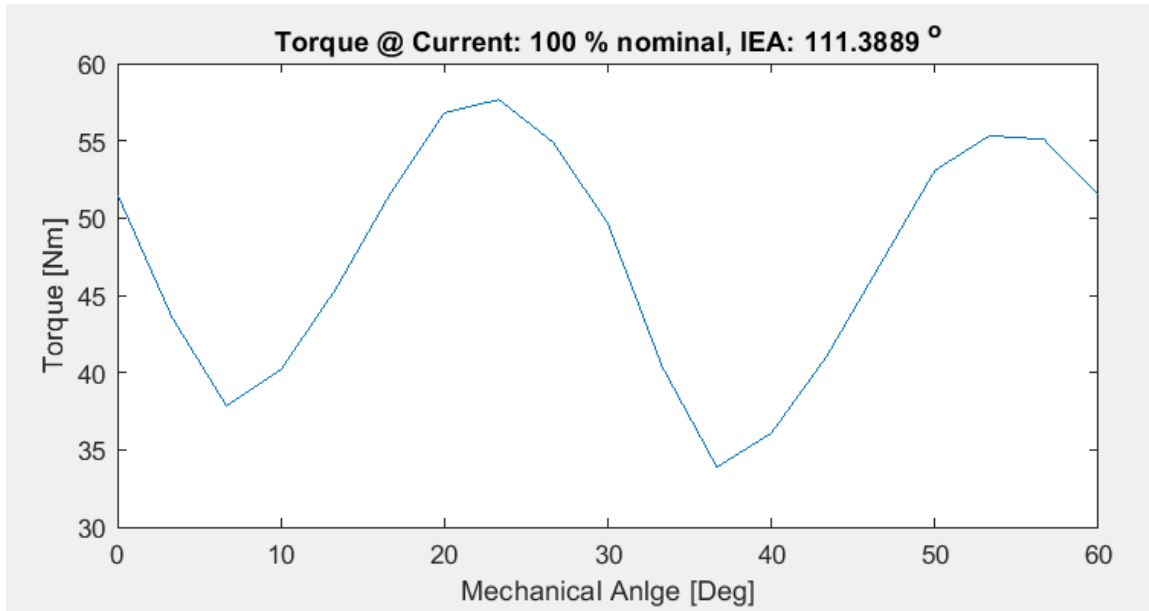


Σχ.87 Πεδίο μηχανής σε πλήρη φόρτιση και για γωνία $IEA = 116.67^\circ$

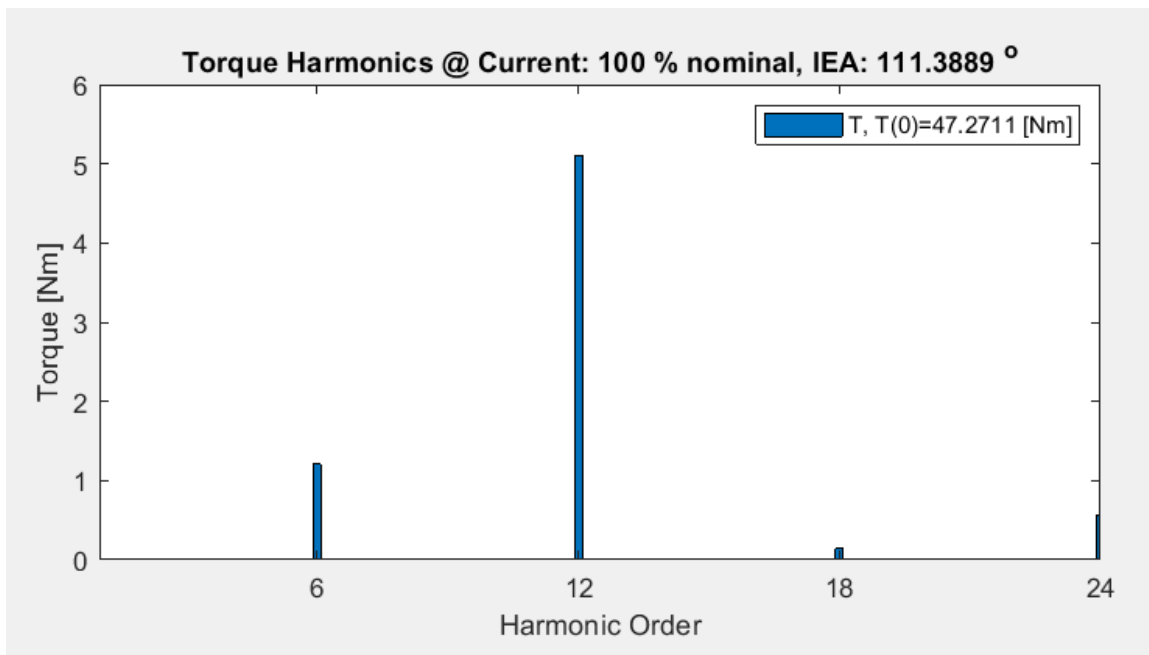
Τα αποτελέσματα μετά τη βελτιστοποίηση και για
 $V = [1.1972 \ 0.6125 \ 0.7560 \ 0.4233 \ 0.7163 \ 0.6138]$



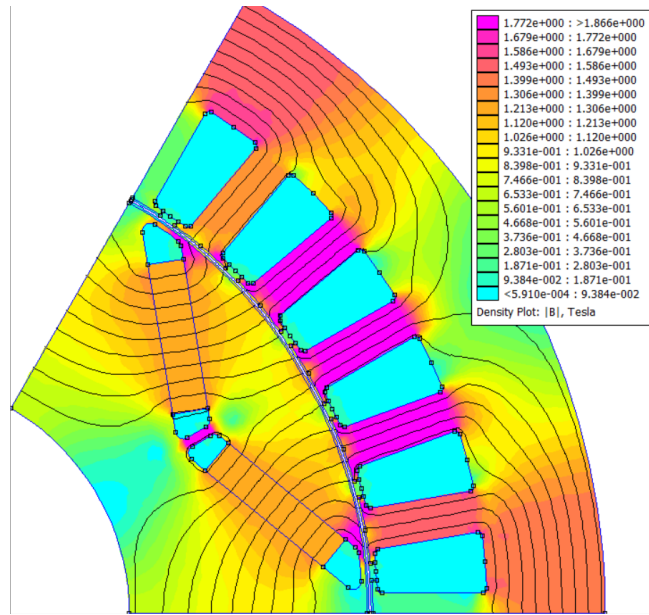
Σχ.88 Διαγράμματα μέσης ροπής σε συνάρτηση με την εσωτερική γωνία ροπής και το ρεύμα λειτουργίας.



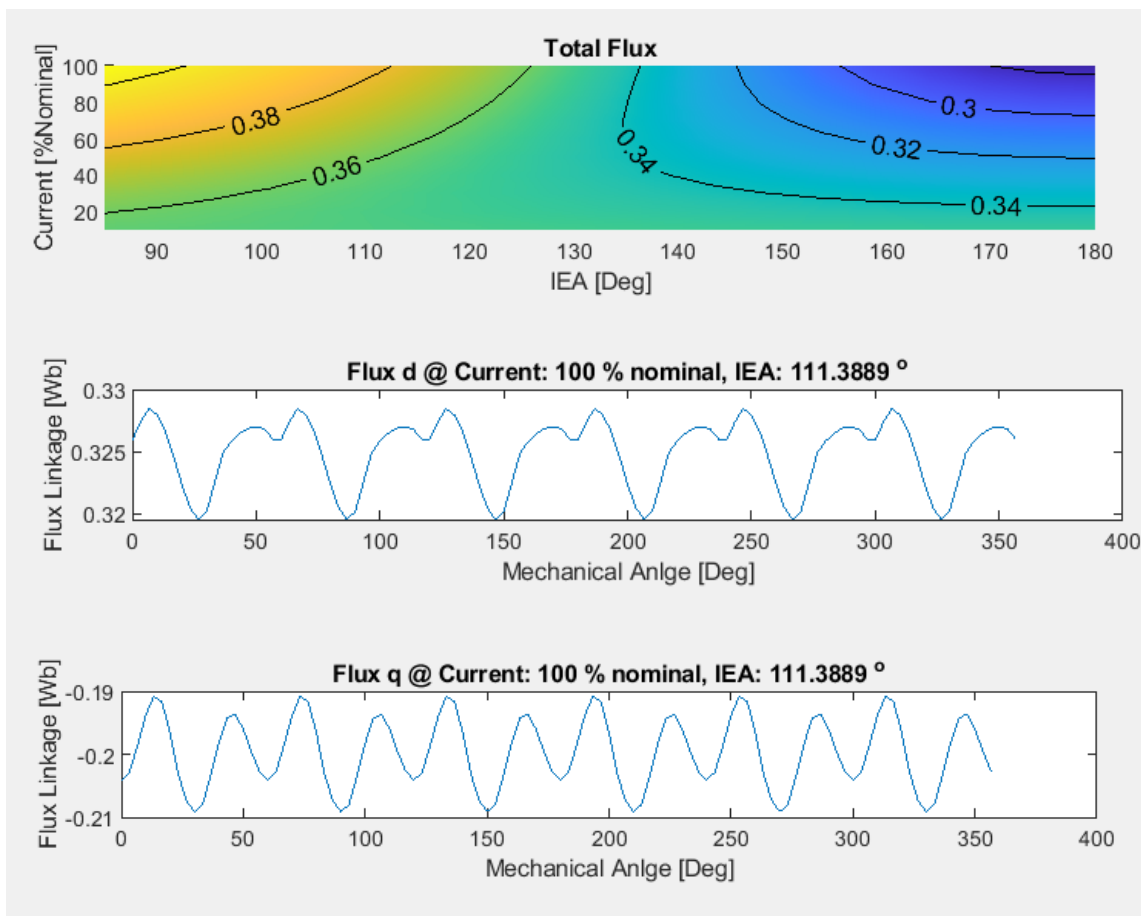
Σχ.89 Διάγραμμα ροπής σε μέγιστη φόρτιση σε συνάρτηση με τη θέση του δρομέα.



Σχ.90 Διάγραμμα με το αρμονικό περιεχόμενο της ροπής της μηχανής.



Σχ.91 Πεδίο μηχανής σε πλήρη φόρτιση και για γωνία $IEA = 111.39^\circ$



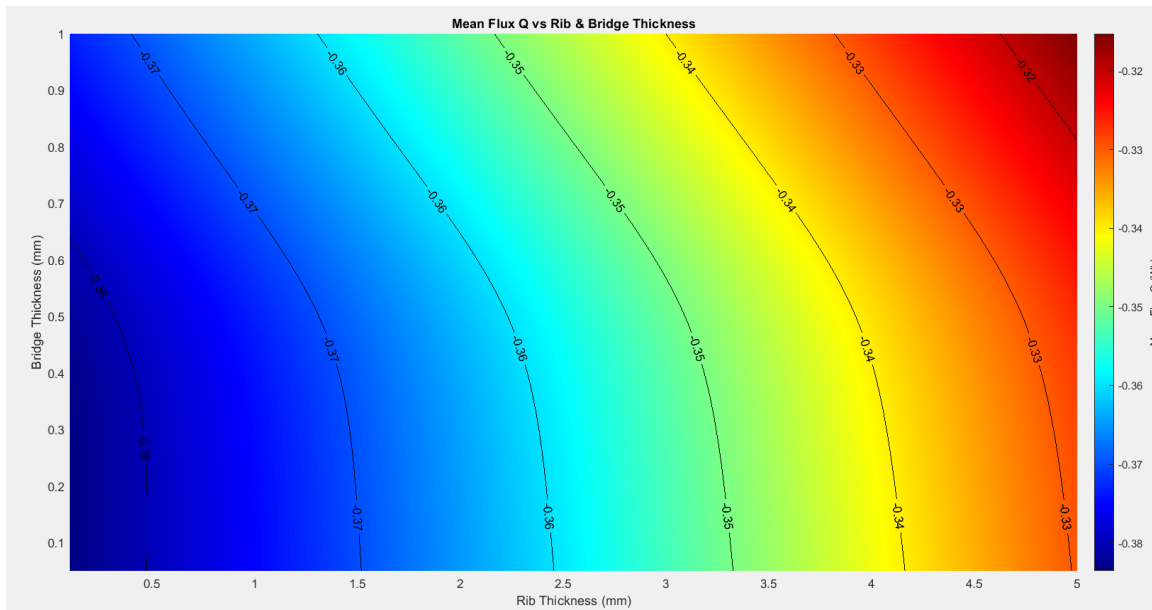
Σχ.92 Διαγράμματα ροής (ολικής, d και q) της μηχανής.

Φαίνεται η αύξηση της μέσης ροής και της ροπής μετά τη βελτιστοποίηση.

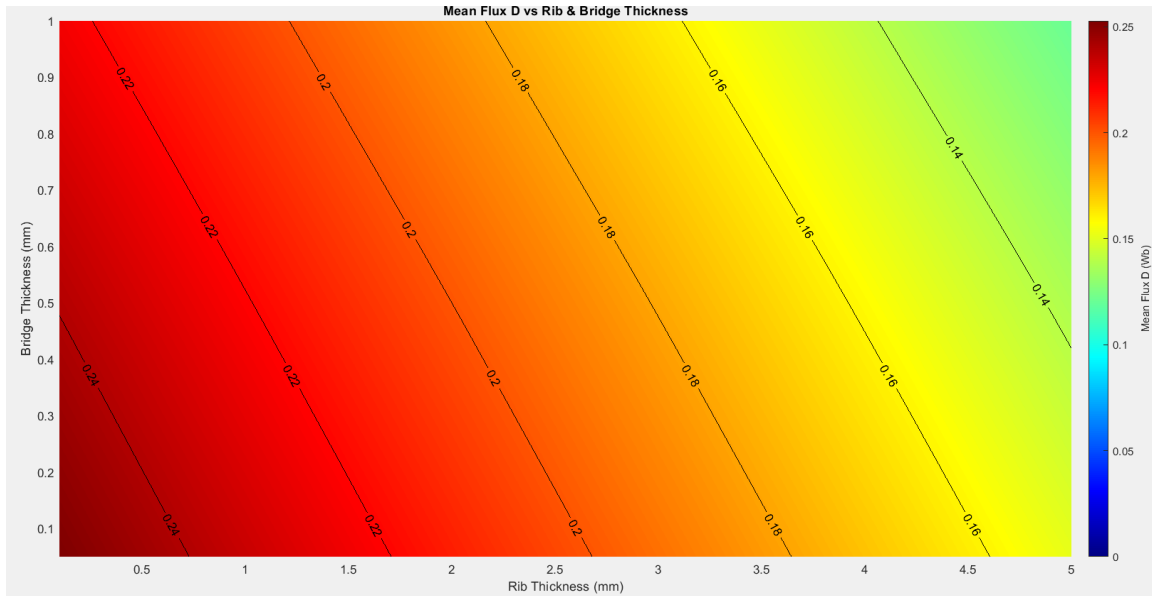
Συγκεκριμένα, έχουμε αύξηση της ροής κατά και της ροπής κατά $(\frac{47.27}{39.09}-1) * 100 \% = 20.9 \%$

Επομένως, μπορούμε να μειώσουμε τις διαστάσεις της μηχανής και συγκεκριμένα το μήκος της μηχανής l κατά 20% για να έχουμε την απαιτούμενη ροπή.

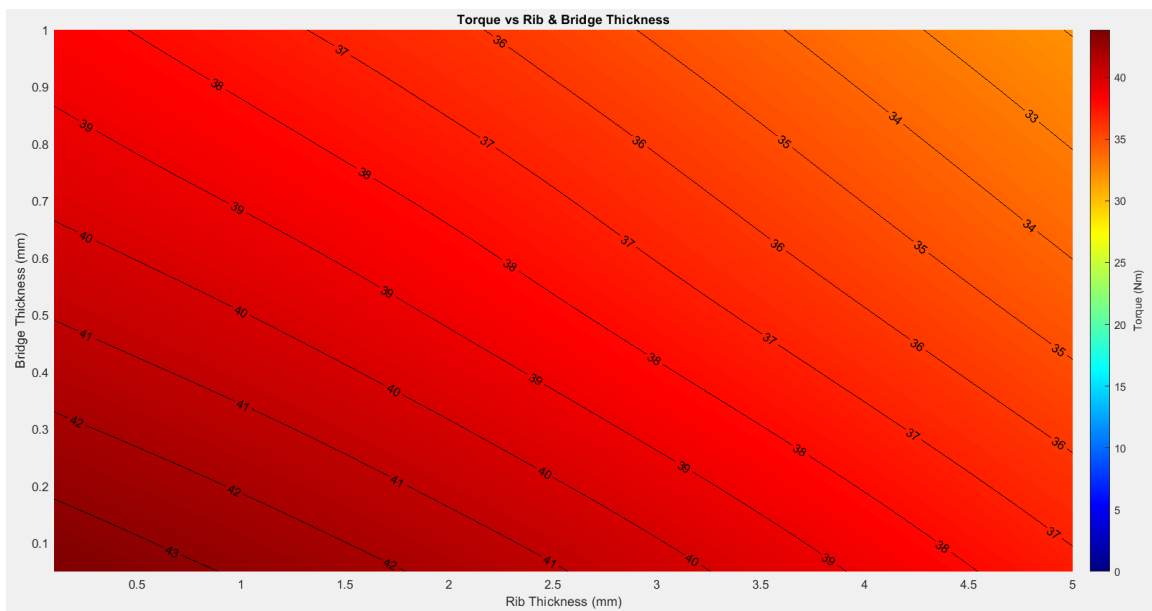
Στη συνέχεια παρατίθενται τα γράφηματα μέσης ροής d , q και ροπής σε σχέση με το πάχος γέφυρας και στηρίγματος του δρομέα για 6-πολική μηχανή.



Σχ.93 Μέση ροή στον άξονα Q σε συνάρτηση με το πάχος γέφυρας και στηρίγματος.



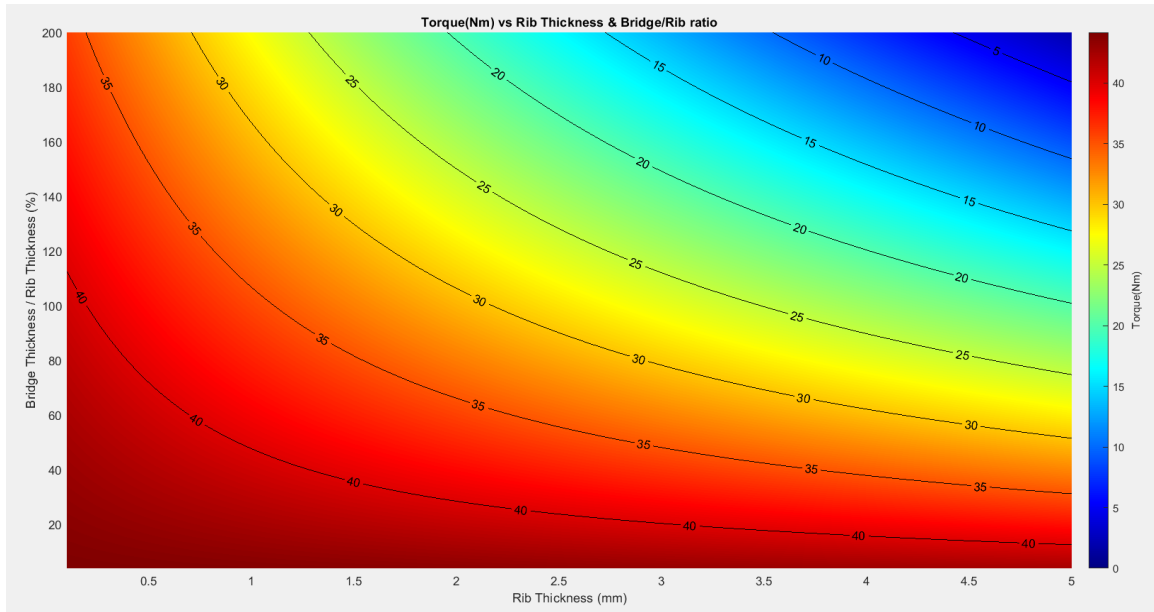
Σχ.94 Μέση ροή στον άξονα D σε συνάρτηση με το πάχος γέφυρας και στηρίγματος.



Σχ.95 Ροπή σε συνάρτηση με το πάχος γέφυρας και στηρίγματος.

Στην επόμενη γραφική παράσταση, φαίνεται η μέγιστη ροπή σε συνάρτηση με το πάχος του στηρίγματος και το λόγο $\mathbf{ratio} = \frac{a}{c}$ όπου α το πάχος της γέφυρας και c το πάχος του στηρίγματος του σιδήρου στο δρομέα. Ο λόγος ratio παίρνει τιμές από 4% έως και 200%, δηλαδή το πάχος της γέφυρας να είναι από 4% έως και διπλάσιο της τιμής του στηρίγματος. Προφανώς η πτώση της ροπής για πολύ μεγάλες τιμές πάχους στηρίγματος

οφείλεται στην μη ύπαρξη αρκετού χώρου για τους μαγνήτες με αποτέλεσμα τη μείωση του όγκου τους.



Σχ.96 Ροπή σε συνάρτηση με το πάχος στηρίγματος και το λόγο γέφυρας/στηρίγματος.

12. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύνοψη

Η εργασία αυτή, επικεντρώθηκε στη μηχανική ανάλυση ηλεκτρικών μηχανών μονίμων μαγνητών. Αναλύθηκαν τα κυριότερα φαινόμενα με τα οποία οφείλει να ασχοληθεί ο σύγχρονος σχεδιαστής ηλεκτρικών μηχανών για μηχανές υψηλών στροφών όπου η μηχανική αντοχή του δρομέα της μηχανής δεν είναι δεδομένη. Ειδικότερα και για κινητήρες μονίμων μαγνητών έγινε προσομοίωση των φαινομένων, βελτιστοποίηση γεωμετρικών χαρακτηριστικών του δρομέα όπως το πάχος των γεφυρών και των στηριγμάτων σε γεωμετρία με μαγνήτες σε σχήμα V και οι καμπυλώσεις στα άκρα των θηκών που δέχονται τους μαγνήτες.

Ανακεφαλαίωση

Στην διπλωματική αυτή εργασία μελετήθηκε η μηχανική συμπεριφορά μηχανής μονίμων μαγνητών σε υψηλές στροφές για εφαρμογή ηλεκτροκίνησης.

Αρχικά, μετά από μια σύντομη εισαγωγή για τη ηλεκτροκίνηση και σχετικά με αυτή θέματα, εξετάζονται οι διάφοροι τύποι μηχανών που θα συναντήσει κατά τη σχεδίαση ένας μηχανικός. Αναλύεται και τονίζεται η σημασία και των τριών τομέων στη σχεδίαση μιας μηχανής που είναι η ανάλυση των ηλεκτρομαγνητικών, των μηχανικών και των θερμικών φαινομένων ώστε να προκύψει ένα βελτιστοποιημένο σχέδιο μηχανής με καλύτερα χαρακτηριστικά από τα υπάρχοντα μοντέλα.

Στη συνέχεια, παρατίθεται η βασική θεωρία που αφορά στα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα, στη μέθοδο ανάλυσης μηχανών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων, και τη μηχανική ανάλυση στρεφόμενου δίσκου. Ακόμα έχουμε την παρουσίαση της διαστασιολόγησης της μηχανής για τον προσδιορισμό της απαραίτητης ροπής και ισχύος για την εφαρμογή ηλεκτροκίνησης που αφορά μικρό αυτοκίνητο πόλης και την προκαταρκτική σχεδίαση της μηχανής που θα δώσει τα αρχικά μεγέθη πριν την εφαρμογή αλγορίθμου βελτιστοποίησης.

Ύστερα, εφαρμόζεται γενετικός αλγόριθμος για τη βελτιστοποίηση του πάχους της γέφυρας, του στηρίγματος του δρομέα και των καμπυλώσεων των θηκών των μαγνητών. Στην ανάλυση ευαισθησίας που ακολουθεί μελετάται η επίδραση των χαρακτηριστικών του δρομέα ύστερα από τη βελτιστοποίηση στη ροπή και την αντοχή του δρομέα για τις 15.000 ΣΑΛ ταχύτητας που μελετάται σε όλη τη διάρκεια της εργασίας. Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και η σχετική της εργασίας βιβλιογραφία.

Κύρια Συμπεράσματα

Τα σημαντικότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτήν τη διπλωματική εργασία είναι :

- Είναι δυνατή από πλευράς μηχανικής αντοχής η κατασκευή μιας απλής μηχανής μονίμων μαγνητών τύπου V που να φτάνει τις 15.000 ΣΑΛ για εφαρμογή ηλεκτροκίνησης.
- Για λεπτό τμήμα σιδήρου στη γέφυρα και το στήριγμα του δρομέα σε V τύπου δρομέα, το μαγνητικό πεδίο τοπικά βρίσκεται σε κορεσμό, υπερβαίνει τα 2.1 T. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση υψηλότερων απωλειών σε αυτά τα σημεία.
- Η μείωση της γέφυρας στα άκρα του δρομέα πάνω από τους μαγνήτες οδηγεί σε μείωση της ροής σκέδασης και σε αύξηση της ροπής της μηχανής.
- Για να αντέξει στις υψηλότερες πιέσεις λόγω της υψηλής ταχύτητας, το ηλεκτρικό ατσάλι που χρησιμοποιείται στον δρομέα θα είναι διαφορετικό από αυτό που χρησιμοποιείται στο στάτη και θα προσφέρει μεγαλύτερη αντοχή αλλά θα έχει υψηλότερες απώλειες. Η κοπή λαμαρίνας από δύο διαφορετικά φύλλα θα οδηγήσει στην αύξηση του κόστους καθώς θα απορρίπτεται περισσότερο υλικό.
- Δεν υπάρχει κάποιος “χρυσός” λόγος μεταξύ πάχους γέφυρας και στηρίγματος στο δρομέα. Αντίθετα, γενικά το στήριγμα μεταξύ των μαγνητών είναι υπεύθυνο για τη συγκράτηση του τμήματος σιδήρου πάνω από τους μαγνήτες και όσο μικρότερο το πάχος της γέφυρας τόσο μικρότερη η σκέδαση ροής και υψηλότερη η ροπή.
- Η τοποθέτηση βοηθητικών στηριγμάτων συγκράτησης των μαγνητών στην πάνω πλευρά τους βοηθά στην αντοχή του δρομέα σε υψηλότερες στροφές.
- Η χρήση αλγορίθμων βελτιστοποίησης των χαρακτηριστικών του δρομέα και συγκεκριμένα πέρα από το πάχος γέφυρας και στηρίγματος που αναφέρθηκαν, της καμπυλότητας στις άκρες των θηκών των μαγνητών, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική βελτίωση των ηλεκτρομαγνητικών χαρακτηριστικών χωρίς να υπάρχει κίνδυνος μηχανικής αντοχής.

- Η αύξηση του αριθμού των πόλων οδηγεί σε μείωση της μέγιστης τάσης που υφίσταται ο δρομέας και επομένως για περισσότερους πόλους μπορούμε να οδηγηθούμε και σε ακόμα μεγαλύτερες ταχύτητες.
- Υπάρχει σημαντική τάση στην έρευνα για τις μηχανές μεταβλητού αριθμού πόλων, για τη βελτίωση των υλικών που χρησιμοποιούνται, αλλά και για πιο σύνθετες γεωμετρίες μηχανών ανάλογα την εφαρμογή.
- Είναι πολύ σημαντική η σύζευξη και η από κοινού μελέτη των ηλεκτρομαγνητικών, μηχανικών και θερμικών φαινομένων που εμφανίζονται στις μηχανές για την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού τους.

Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

Ορισμένα ζητήματα που φαίνεται με την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας ότι χρήζουν περαιτέρω διερεύνηση είναι τα ακόλουθα :

- Εξέταση της επίδρασης της αύξησης και διακύμανσης της θερμοκρασίας στην μηχανική συμπεριφορά του δρομέα. Αν και στις πηγές που μελετήθηκαν τονίζεται ότι η μεταβολή της θερμοκρασίας των μηχανών δεν έχουν σημαντική επίδραση που να οδηγήσει σε προβλήματα στις μηχανές από την άποψη της μηχανικής ανάλυσης, ωστόσο η διαστολή του σιδήρου στις υψηλές θερμοκρασίες καθιστά την ανάλυση αυτή το λιγότερο ενδιαφέρον.
- Εξέταση γεωμετριών δρομέα και λύσεων για ακόμη μεγαλύτερες ταχύτητες κοντά στις 20.000 ΣΑΛ. Υπάρχουν παραδείγματα ηλεκτρικών μηχανών που χρησιμοποιούνται στην αυτοκίνηση και φτάνουν τις 18.000 ΣΑΛ. Έχει μεγάλο ενδιαφέρον να δούμε την συμπεριφορά της μηχανής σε μεγαλύτερες ταχύτητες και να δούμε τις μετατροπές που χρειάζονται για να αντέχει τις μηχανικές καταπονήσεις που προκαλούνται σε τόσο υψηλές ταχύτητες.
- Εκτίμηση του κόστους για την κατασκευή της συγκεκριμένης μηχανής και σύγκριση με υπάρχοντα μοντέλα που κυκλοφορούν στο εμπόριο. Έχοντας μελετήσει την πλήρη συμπεριφορά της μηχανής, έχει ενδιαφέρον να υπολογίσουμε προσεγγιστικά το συνολικό κόστος για την κατασκευή της μηχανής και ενσωμάτωσής της σε αυτοκίνητο. Εκτιμάται λόγω των απλών χαρακτηριστικών της να είναι ιδιαίτερα χαμηλή και επομένως, ίσως μια δελεαστική πρόταση για την αυτοκινητοβιομηχανία.

13. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] International Energy Agency , <https://www.iea.org/regions/eurasia>
- [2] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (UNPD). World Population Prospects: The 2015 Revision, Key Findings And Advance Tables. (United Nations, 2015)
- [3] IEA (2020), Tracking Transport 2020, IEA, Paris
<https://www.iea.org/reports/tracking-transport-2020>
- [4] Σχεδίαση Φορτιστή Μπαταριών Ιόντων Λιθίου, Κωνσταντίνος Μπούργας, Διπλωματική Εργασία
- [5] Carole Mathieu, “Green Batteries: A Competitive Advantage for Europe’s Electric Vehicle Value Chain?”, Études de l’Ifri, Ifri, April 2021.
- [6] C. McCrossan and K. Shankaravelu, "A Review of the Second Life Electric Vehicle Battery Landscape from a Business and Technology Perspective," 2021 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech), 2021, pp. 416-423
- [7] Nee,H.-P., Rabkowski,J., Pefitsis,D., Tolstoy,G., Colmenares,J., Sadik,D., Antonopoulos, A., ... Zdanowski, M. (2013). High-Efficiency Power Conversion Using Silicon Carbide Power Electronics. Proc. of International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM) 2013, Miyazaki, Japan, Sept. 29–Oct. 4, 2013, 1083–1088
- [8] Gear, L. , Edmondson J., “Power Electronics for Electric Vehicles 2022-2032 Automotive Inverters, Onboard Chargers (OBC), Silicon Carbide (SiC) MOSFETs, Wide-bandgap (WBG) Semiconductors & 800V Platforms” , IDTechEx
- [9] A. Poorfakhraei, M. Narimani and A. Emadi, "A Review of Modulation and Control Techniques for Multilevel Inverters in Traction Applications,"
- [10] A Comparison of Radial and Axial Flux Structures in Electrical Machines Dean J Patterson^{1,3}, Jessica L Colton¹ , Brad Mularcik² , Rafal Rohoza³ ¹ Electrical Engineering Department University of Nebraska, Lincoln, NE 68588-0511, USA ² The Timken Company, Mail Code TEC-05, PO Box 6930, Canton, OH, 44706-0930 USA ³ Fasco Australia P/L, 1/14 Monterey Rd Dandenong South VIC Australia 3175

- [11] E. Levi, R. Bojoi, F. Profumo, H. A. Toliyat, and S. Williamson, "Multiphase induction motor drives - a technology status review," *IET Electric Power Applications*, vol. 1, no. 4, pp. 489–516, 2007.
- [12] F. Barrero and M. J. Duran, "Recent advances in the design, modeling, and control of multiphase machines—part i," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 1, pp. 449–458, 2016
- [13] M. Osama and T. A. Lipo, "Modeling and analysis of a wide-speed range induction motor drive based on electronic pole changing," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, no. 5, pp. 1177–1184, 1997.
- [14] Duran, M.J.; Levi, E.; Barrero, F. *Multiphase Electric Drives: Introduction*; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2017; pp. 1–26.
- [15] A. Toba and T. A. Lipo, "Generic torque-maximizing design methodology of surface permanent-magnet Vernier machine," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 36, no. 6, pp. 1539–1546, Nov./Dec. 2000
- [16] Fan Wu, Ayman M. El-Refaie, "Permanent magnet vernier machine: a review", *Electric Power Applications IET*, vol. 13, no. 2, pp. 127-137, 2019.
- [17] Flux-Switching Permanent Magnet Machines: A Review of Opportunities and Challenges—Part I: Fundamentals and Topologies Hao Chen , Member, IEEE, Ayman M. EL-Refaie , Fellow, IEEE, and Nabeel A. O. Demerdash, Life Fellow, IEEE
- [18] Flux-Switching Permanent Magnet Machines: A Review of Opportunities and Challenges-Part II: Design Aspects, Control, and Emerging Trends, Hao Chen , Member, IEEE, Ayman M. EL-Refaie , Fellow, IEEE, and Nabeel A. O. Demerdash, Life Fellow, IEEE.
- [19] Gao, Yuting & Liu, Yang. (2021). Flux Reversal Machine Design. 10.5772/intechopen.92428.
- [20] : Siddiqi, M.R.; Yazdan, T.Im, J.-H.; Humza, M.; Hur, J. "Design and Analysis of a Dual Airgap Radial Flux Permanent Magnet Vernier Machine with Yokeless Rotor." *Energies* 2021, 14, 2311. <https://doi.org/10.3390/en14082311>.

- [21] R. Zhang, J. Li, R. Qu and D. Li, "Analysis and design of triple-rotor axial-flux spoke-array vernier permanent magnet machines," 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Milwaukee, WI, USA, 2016, pp. 1-8, doi: 10.1109/ECCE.2016.7854870.
- [22] W. Kakihara, M. Takemoto and S. Ogasawara, "Rotor structure in 50 kW spoke-type interior permanent magnet synchronous motor with ferrite permanent magnets for automotive applications," 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Denver, CO, USA, 2013, pp. 606-613, doi: 10.1109/ECCE.2013.6646757.
- [23] Andreas Binder, Kersten Reis, Tutorial "High Speed Drives", ICEM 2014
- [24] https://ssc.arcelormittal.com/IMG/pdf/electricalsteelsbrochure_en.pdf
- [25] A. Boglietti, A. Cavagnino, D. Staton, M. Shanel, M. Mueller and C. Mejuto, "Evolution and Modern Approaches for Thermal Analysis of Electrical Machines," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 3, pp. 871-882, March 2009, doi: 10.1109/TIE.2008.2011622.
- [26] Staton D. Improving motor efficiency and motor miniaturization and the role of thermal simulation. [http:// richard.grisel.free.fr/ICEM2012/TUTORIALS/ TUT3.pdf](http://richard.grisel.free.fr/ICEM2012/TUTORIALS/TUT3.pdf)
- [27] ABB, Technical Application Papers No.7 Three-phase asynchronous motors Generalities and ABB proposals for the coordination of protective devices, 2013 Product guide, 1SDC007106G0201
- [28] F. G. Bell, in *ENGINEERING GEOLOGY | Rock Properties and their Assessment* (Eds: R. C. Selley, L. R. M. Cocks, I. R. Plimer), Elsevier, Oxford 2005, p. 571
- [29] The CST (Constant Strain Triangle) - An insidious survivor from the infancy of FEA
R.P. Pruki
- [30] The Finite Element Method in Engineering Sixth Edition Singiresu S. Rao
- [31] M. H. Sadeghi and A. Darabi, "Optimization of a new type of hysteresis motor using genetic algorithm," 2010 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Prague, Czech Republic, 2010, pp. 479-482, doi: 10.1109/EEEIC.2010.5490036.

[32] R. Benlamine, F. Dubas, S. -A. Randi, D. Lhotellier and C. Espanet, "Design by optimization of an axial-flux permanent-magnet synchronous motor using genetic algorithms," 2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Busan, Korea (South), 2013, pp. 13-17, doi: 10.1109/ICEMS.2013.6754546.

[33] X. Zhao, Z. Sun and Y. Xu, "Multi-Objective Optimization Design of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Genetic Algorithm," 2020 2nd International Conference on Machine Learning, Big Data and Business Intelligence (MLBDBI), Taiyuan, China, 2020, pp. 405-409, doi: 10.1109/MLBDBI51377.2020.00086.

[34] <https://mathworks.com/help/gads/>

[35] <https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/11/N42-151021.pdf>

Βιβλία-Εγχειρίδια

[36] PYRHÖNEN, J., JOKINEN, T., & HRABOVCOVÁ, V. (2008). "Design of rotating electrical machines"

[37] Vincenzo Vullo, Francesco Vivio. (2013) "Rotors: Stress Analysis and Design"

[38] Fitzgerald Electric Machinery 6th Edition

[39] Electrical Machine Analysis Using Finite Elements Nicola Bianchi

Διαδικτυακοί Σύνδεσμοι

Σχ. 1 : <https://tinyurl.com/mwzx3axm>

Σχ. 2 : <https://tinyurl.com/3h95t9h2>

Σχ. 3 : <https://tinyurl.com/4p2cb3bp>

Σχ. 4 : <https://tinyurl.com/3a7s8xw6>

Σχ. 5 : www.eea.europa.eu/ims/new-registrations-of-electric-vehicles

Σχ. 9 : <https://tinyurl.com/2p9wsbzb>

Σχ. 49 : <https://tinyurl.com/22mv99db>

Σχ. 50 : <https://tinyurl.com/3s7wr2nz>

Σχ. 51 : <https://tinyurl.com/2p95jryp>