



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

Μελέτη και Σχεδίαση Μηχανών Εναλλασσόμενης Μαγνητικής Ροής

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Γ. Αναγνωστόπουλος

Επιβλέπων : Αντώνιος Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2015



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

Μελέτη και Σχεδίαση Μηχανών Εναλλασσόμενης Μαγνητικής Ροής

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Γ. Αναγνωστόπουλος

Επιβλέπων : Αντώνιος Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 23η Ιουλίου 2015

.....
Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Στέφανος Μανιάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

Αθήνα, Ιούλιος 2015

.....

Κωνσταντίνος Γ. Αναγνωστόπουλος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π. Copyright © Κωνσταντίνος Γ. Αναγνωστόπουλος, 2015 Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η παρούσα εργασία αναφέρεται στη μελέτη και σχεδίαση ηλεκτρικών μηχανών εναλλασσόμενης μαγνητικής ροής με διέγερση μονίμων μαγνητών για εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων, όπως ορισμένα κινητήρια συστήματα αεροπορικής τεχνολογίας. Συγκεκριμένα επιχειρείται η σχεδίαση μιας ηλεκτρικής μηχανής η οποία να μπορεί να αναπτύσσει ροπή τουλάχιστον 1.8 Nm σε ταχύτητα 7500 Σ.Α.Λ. ενώ προσδιορίζονται επίσης, με βάση τις αντίστοιχες προδιαγραφές, οι εξωτερικές τις διαστάσεις.

Η μέθοδος που ακολουθείται αποτελείται από τα εξής στάδια: Αρχικά γίνεται σχεδίαση μέσω αναλυτικών σχέσεων εναλλακτικών τοπολογιών προκειμένου να αποφασιστούν τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά και να επιλεγεί ο αριθμός των πόλων δρομέα και στάτη. Οι τοπολογίες που προκύπτουν αναλύονται μέσω προγράμματος προσημείωσης. Στη συνέχεια πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας γεωμετρικών παραμέτρων με σκοπό τον προσδιορισμό της βέλτιστης θέσης του διακένου μέσω αριθμητικών τεχνικών επίλυσης των εξισώσεων του μαγνητικού πεδίου. Σε ένα επόμενο βήμα επιχειρείται συνδυασμός της μεθοδολογίας σχεδιασμού πειραμάτων Taguchi με τις αριθμητικές τεχνικές επίλυσης των εξισώσεων του μαγνητικού πεδίου ώστε να επιλεγεί ένας συνδυασμός παραμέτρων που να ικανοποιεί τις προδιαγραφές. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής υποβάλλονται σε ανάλυση διακύμανσης με σκοπό να αναδειχθεί η επίδραση συγκεκριμένων παραμέτρων της τοπολογίας στα λειτουργικά χαρακτηριστικά της. Αφού επιλεγεί ο τελικός συνδυασμός των παραμέτρων, πραγματοποιείται εκ νέου πεδιακή ανάλυση μέσω προγράμματος προσομοίωσης και αποτιμώνται τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της μηχανής.

Προκειμένου να επιλεγεί η καταλληλότερη γεωμετρία και να αναδειχθούν οι επιμέρους διαφορές τους η προαναφερθείσα μεθοδολογία εφαρμόζεται σε τρεις διαφορετικούς τύπους μηχανών εναλλασσόμενης μαγνητικής ροής: στη μηχανή εναλλασσόμενης ροής με πυρήνα τύπου «C», στη μηχανή εναλλασσόμενης ροής με πυρήνα τύπου «E» και στη μηχανή εναλλασσόμενης ροής με τμηματικό δρομέα.

Λέξεις κλειδιά: Μηχανές Εναλλασσόμενης Ροής, προκαταρκτικής σχεδίαση, μέθοδοι Taguchi, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, πολύστροφες ηλεκτρικές μηχανές

Abstract

This diploma thesis undertakes the study and design of permanent magnet flux switching machines used for high-speed applications, i.e. specific aerospace drive systems. More specifically an electrical machine capable of producing 1.8 Nm at 7500 RPM is designed, while the outer dimensions of the machine are also defined by respective specifications.

The followed procedure has can be divided into the following five steps. Firstly, an initial motor design is extracted using analytical formulas. These formulas take into account the desired specifications concerning the nominal torque, the nominal speed and the supply voltage. The results of the mentioned designs are updated through simulation. In a next step sensitivity analysis is conducted in order to define the optimal position of the air gap. After that we use the Taguchi design of experiments method in order to choose the best combination of dimensions, which guarantee the desired operational characteristics. The results of design of experiments are implemented in order to conduct analysis of variance and identify the influence of the variation of the selected dimensions on the operational characteristics of the machine. Finally, the machine with the chosen combination of dimensions is simulated. Except the first step, all others employ the Finite Element Method Magnetics (FEMM) software to conduct the needed simulations.

In order to choose the best machine type and to show their respective performance differences three types of permanent magnet flux switching motors are analyzed: namely, "C Core" permanent magnet flux switching machine, "E core" permanent magnet flux switching machine and segmental rotor permanent magnet flux switching machine.

Keywords: Flux switching machines, preliminary design, Taguchi methods, finite element method, high-speed electrical machines

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσης διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους με βοήθησαν κατά την εκπόνησή της.

Πρωτίστως, ευχαριστώ θερμά, τον Καθηγητή μου κ. Αντώνιο Κλαδά, για την καθοδήγησή του και την άψογη συνεργασία για την περάτωση της εργασίας, διαφωτίζοντας τις όποιες απορίες μου επί του θέματος της σχεδίασης και λειτουργίας των ηλεκτρικών μηχανών. Ιδιαίτερώς ευχαριστώ τον Διδάκτορα Μ. Μπενιακάρ που με στήριξε σε όλα τα καθοριστικά σημεία της διπλωματικής μου εργασίας. Ακόμα τον ευχαριστώ για όλες τις συζητήσεις επιστημονικού και μη περιεχομένου που μου έδιναν δυνατότητα να αντιμετωπίζω τη διαδικασία εκπόνησης της διπλωματικής αυτής πολύ ευχάριστα.

Ευχαριστίες οφείλω στον υποψήφιο Διδάκτορα Θανάση Σαρηγιαννίδη για τις πολύτιμες συμβουλές του, τις κατατοπιστικές επισημάνσεις καθώς και την παροχή βοήθειας όποτε του ζητήθηκε.

Ευχαριστώ θερμά την οικογένεια μου για την αμέριστη στήριξη της όλα αυτά τα χρόνια. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω όσους με στήριξαν με τη φιλία τους καθόλη αυτή τη προσπάθεια.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1. Πολύστροφες Μηχανές.....	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Προδιαγραφές	1
1.3 Μικροτουρμπίνες.....	2
1.4 Συμπιεστές	4
1.5 Γεννήτριες Αεροπλάνων	5
1.6 Βιβλιογραφία κεφαλαίου	10
Κεφάλαιο 2. Μηχανές Εναλλασσόμενης Ροής	11
2.1 Υπόβαθρο και Ορισμός.....	11
2.2 Τρόποι Εναλλαγής Ροής.....	12
2.3 Εξέλιξη των μηχανών εναλλασσόμενης ροής	14
2.3.1 Ο επαγωγικός εναλλάκτης	15
2.3.2 Ο εναλλάκτης ροής.....	17
2.3.3 Η μηχανή αντιστροφής ροής.....	17
2.4 Σύγχρονες τοπολογίες μηχανών εναλλασσόμενης ροής που χρησιμοποιούν έκτυπο δρομέα	19
2.5 Μηχανές εναλλασσόμενης ροής με τμηματικό δρομέα	23
2.6 Ανάλυση της λειτουργίας με διέγερση μόνιμου μαγνήτη μέσω της εννοιας των θεμελιωδών κελιών	24
2.7 Σύγκριση τοπολογιών μηχανών εναλλασσόμενης ροής έκτυπου δρομέα και τμηματικού δρομέα	25
2.8 Βιβλιογραφία κεφαλαίου	27
Κεφάλαιο 3. Μεθοδολογίες Σχεδίασης Ηλεκτρικών Κινητήρων Μονιμων Μαγνητών	29
3.1 Εισαγωγή	29
3.2 Επιλογή τοπολογίας κινητήρα	29
3.3 Προκαταρκτική σχεδίαση	29
3.4 Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία.....	38
3.5 Βιβλιογραφία κεφαλαίου	47
Κεφάλαιο 4. Μέθοδοι Taguchi και Ανάλυση Διακύμανσης (ANOVA).....	48
4.1 Μέθοδοι Taguchi	48
4.1.1 Εισαγωγή.....	48
4.1.2 Συναρτήσεις Απωλειών.....	48
4.1.3 Έλεγχος ποιότητας εκτος γραμμής παραγωγής	50
4.1.4 Σχεδιασμός Πειραμάτων	50
4.1.5 Η μέθοδος σχεδιασμού πειραμάτων Taguchi	50
4.1.6 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου.....	52
4.2 Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA)	53
4.2.1 Εισαγωγή	53
4.2.2 Η κατανομή F.....	54
4.3 Βιβλιογραφία κεφαλαίου	66

Κεφάλαιο 5. Μηχανή Εναλλασσόμενης Ροής Τοπολογία τύπου «πιρήνα C».....	67
5.1 Εισαγωγή.....	67
5.2 Προκαταρκτική Σχεδίαση.....	68
5.3 Επιλογή Βέλτιστου D_g	72
5.4 Εφαρμογή μεθοδολογίας Taguchi	73
5.5 Ανάλυση Ευαισθησίας.....	79
5.6 Τελικό Σχέδιο	80
5.7 Βιβλιογραφία κεφαλαίου	83

Κεφάλαιο 6: Μηχανή Εναλλασσόμενης Ροής Τοπολογία τύπου «πιρήνα E»

6.1 Εισαγωγή.....	84
6.2 Προκαταρκτική Σχεδίαση.....	85
6.3 Επιλογή Βέλτιστου D_g	87
6.4 Εφαρμογή μεθοδολογίας Taguchi	87
6.5 Ανάλυση Ευαισθησίας.....	93
6.6 Τελικό Σχέδιο.....	95
6.7 Βιβλιογραφία κεφαλαίου.....	97

Κεφάλαιο 7: Μηχανή Εναλλασσόμενης Ροής Τμηματικού Δρομέα

98	98
7.1 Εισαγωγή.....	98
7.2 Προκαταρκτική Σχεδίαση.....	99
7.3 Επιλογή Βέλτιστου D_g	101
7.4 Εφαρμογή μεθοδολογίας Taguchi	102
7.5 Ανάλυση Ευαισθησίας.....	107
7.6 Τελικό Σχέδιο.....	109
7.7 Βιβλιογραφία κεφαλαίου	111

Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα

8.1 Κυριότερα Συμπεράσματα	112
8.2 Σημεία Επιστημονικής Συνεισφοράς	113
8.3 Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση	113

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΟΛΥΣΤΡΟΦΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

1.1 Εισαγωγή

Η ταχύτητα λειτουργίας της μηχανής, ιδιαίτερα όταν αυτή είναι ιδιαίτερα υψηλή (άνω των 5000 ΣΑΛ), είναι ένας παράγοντας που διαμορφώνει πολλά χαρακτηριστικά της. Αναλυτικότερα, η συχνότητα των ρευμάτων που διαρρέουν τη μηχανή είναι ανάλογη με την ταχύτητα περιστροφής της. Επίσης η υψηλή συχνότητα λειτουργίας συνεπάγεται μείωση των διαστάσεων της μηχανής, μιας και η ισχύς που αποδίδει η μηχανή ισούται με το γινόμενο ηλεκτρομαγνητικής ροπής επί την ταχύτητα λειτουργίας.

Οι πολύστροφες μηχανές βρίσκουν εφαρμογή σε μια πλειάδα εφαρμογών όπως αντλίες, μηχανές ύφανσης, συμπιεστές, γεννήτριες οδηγούμενες από τουρμπίνες πολύ μικρού μεγέθους καθώς και ως γεννήτριες αεροπλάνων. Η χρήση τους μερικές φορές συνδυάζεται με χρησιμοποίηση μειωτήρων στροφών ή κιβωτίων ταχυτήτων αν και η τάση είναι αυτό να αποφεύγεται. Ο λόγος είναι ότι σε συστήματα που λειτουργούν σε υψηλές ταχύτητες βελτιώνεται αισθητά η απόδοση, μειώνονται σημαντικά οι διαστάσεις τους και ο μηχανικός θόρυβος κατά τη λειτουργία τους ενώ απλοποιείται η κατασκευή και η συντήρησή τους αν δεν χρησιμοποιηθούν επιπλέον συστήματα μετάδοσης κίνησης.

Η ισχύς των πολύστροφων ηλεκτρικών μηχανών που χρησιμοποιούνται αυτή τη στιγμή δεν ξεπερνά κατά βάση τα 500KW. Όμως οι ολοένα αυξανόμενες ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια ορισμένων εφαρμογών της αεροπορικής και στρατιωτικής βιομηχανίας βιομηχανίας, όπως όπλα κατευθυνόμενης ενέργειας και ραντάρ έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη γεννητριών ισχύος έως και 6MW με ταχύτητα περιστροφής έως και 15000 ΣΑΛ.

1.2 Προδιαγραφές

Το πλήθος των εφαρμογών που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι εφαρμογές αυτές είναι ιδιαίτερα εξειδικευμένες έχει ως αποτέλεσμα να μεταβάλλονται αρκετά τα επιμέρους χαρακτηριστικά των πολύστροφων ηλεκτρικών μηχανών. Παρόλα αυτά υπάρχουν ορισμένες βασικές σχεδιαστικές προδιαγραφές που ικανοποιούνται σχεδόν σε όλες τις μηχανές του είδους. Οι πιο κοινές είναι:

- Συμπιεσμένος όγκος
- Χρήση του ελάχιστου αριθμού μερών στην κατασκευή της μηχανής
- Σε περίπτωση χρήσης μόνιμου μαγνήτη, πρέπει οι μαγνήτες να διατηρούν τη μαγνήτισή τους σε υψηλές θερμοκρασίες
- Πολύ καλή σχέση επίδοσης-κόστους και απόδοσης-κόστους.
- Υψηλή αξιοπιστία (η πιθανότητα σφάλματος πρέπει να είναι χαμηλότερη του 5% για 80.000 ώρες λειτουργίας)

1.3 Μικροτουρμπίνες

Οι μικροτουρμπίνες είναι μικρού μεγέθους αεριωθούμενες τουρμπίνες-στροβιλομηχανές, κύριο χαρακτηριστικό των οποίων είναι ότι άξονας τους είναι κοινός με την γεννήτρια που περιστρέφουν. Αυτό βρίσκεται σε αντίθεση με την πρακτική που εφαρμόζεται σε όλα τα μεγάλα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας όπου χρησιμοποιούνται μειωτήρες στροφών μεταξύ του άξονα του στροβίλου και του άξονα της γεννήτριας.

Τα ελάσματα από τα οποία κατασκευάζονται είναι πάχους περίπου 0.2mm για συχνότητες λειτουργίας μέχρι 400 Hz, ενώ για συχνότητες άνω των 700 Hz απαιτείται χρήση ελασμάτων πάχους 0.1mm. Το υλικό κατασκευής τους είναι συχνά κράμα ατσαλιού-πυριτίου αλλά υπάρχουν και μηχανές που κατασκευάζονται από ελάσματα σιδήρου-κοβαλτίου.



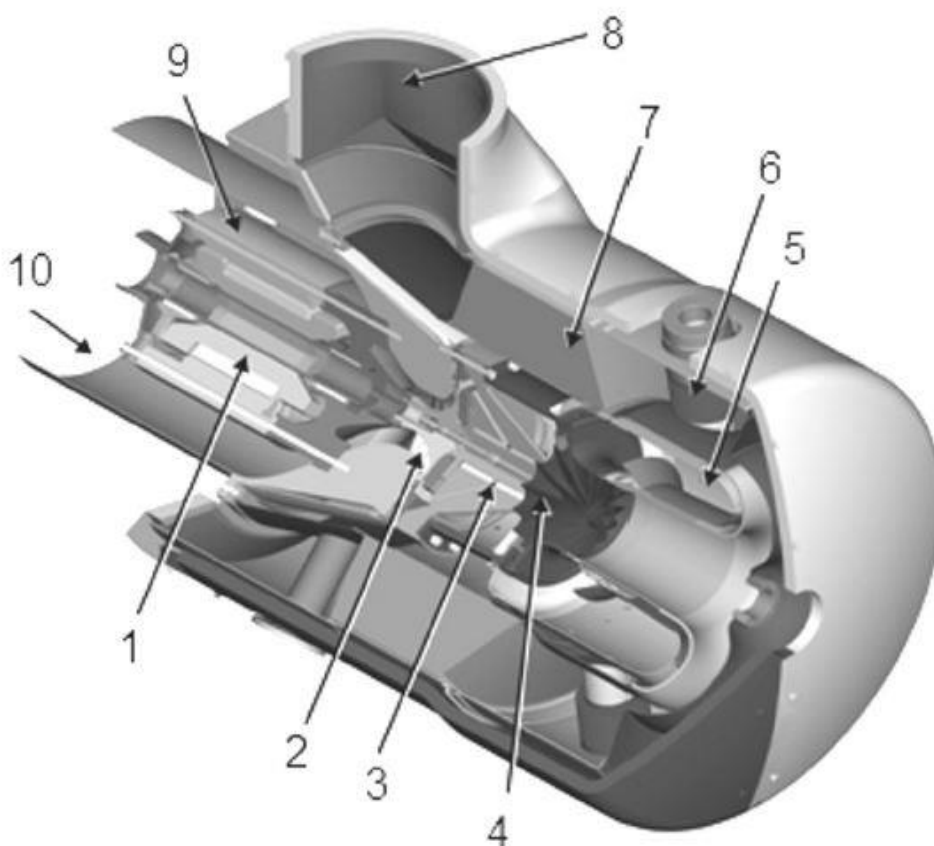
Εικόνα 1. Σύγχρονη μικροτουρπίνα. (Προσφορά της Capstone, Chatsworth, CA,U.S.A.)

Επίσης, σε περίπτωση που χρησιμοποιούνται μόνιμοι μαγνήτες στο δρομέα χρησιμοποιούνται συνήθως δακτύλιοι συγκράτησης, που περιβάλλουν τους μαγνήτες και αποτρέπουν την αποκόλληση τους από το δρομέα εξαιτίας των ισχυρών φυγόκεντρων δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά την περιστροφή. Οι δακτύλιοι αυτοί κατασκευάζονται από μη μαγνητικά υλικά ώστε να μην προκαλούν αύξηση της σκέδασης των μαγνητών. Τα υλικά αυτά πρέπει να έχουν επίσης μικρή πυκνότητα για να μην επηρεάζουν έντονα τη ροπή αδράνειας του δρομέα και υψηλή θερμική αγωγιμότητα. Ορισμένα από τα υλικά που συγκεντρώνουν αυτά τα χαρακτηριστικά είναι: κράματα του τιτανίου ή του αλουμινίου καθώς και σύνθετα υλικά με βάση τα ανθρακονήματα και ίνες γραφίτη.

Μιας και οι μικροτουρμπίνες χρησιμοποιούνται σε σταθμούς ενέργειας διεσπαρμένης παραγωγής πρέπει η σχεδίαση τους να εξασφαλίζει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Μη χρήση ψυκτών
- Ελάχιστος αριθμός συνολικών εξαρτημάτων
- Μικρός όγκος
- Υψηλή πυκνότητα ισχύος
- Υψηλή απόδοση
- Χαμηλό κόστος

Τα πρώτα 2 από τα παραπάνω χαρακτηριστικά αυξάνουν την αξιοπιστία της μηχανής καθώς και την ικανότητα της να λειτουργεί με μειωμένη ισχύ ακόμα και αν συμβεί σφάλμα. Τα επόμενα 4 είναι προαπαιτούμενα προκειμένου η γεννήτρια να είναι ανταγωνιστική σαν προϊόν για τους ενδιαφερόμενους επενδυτές.

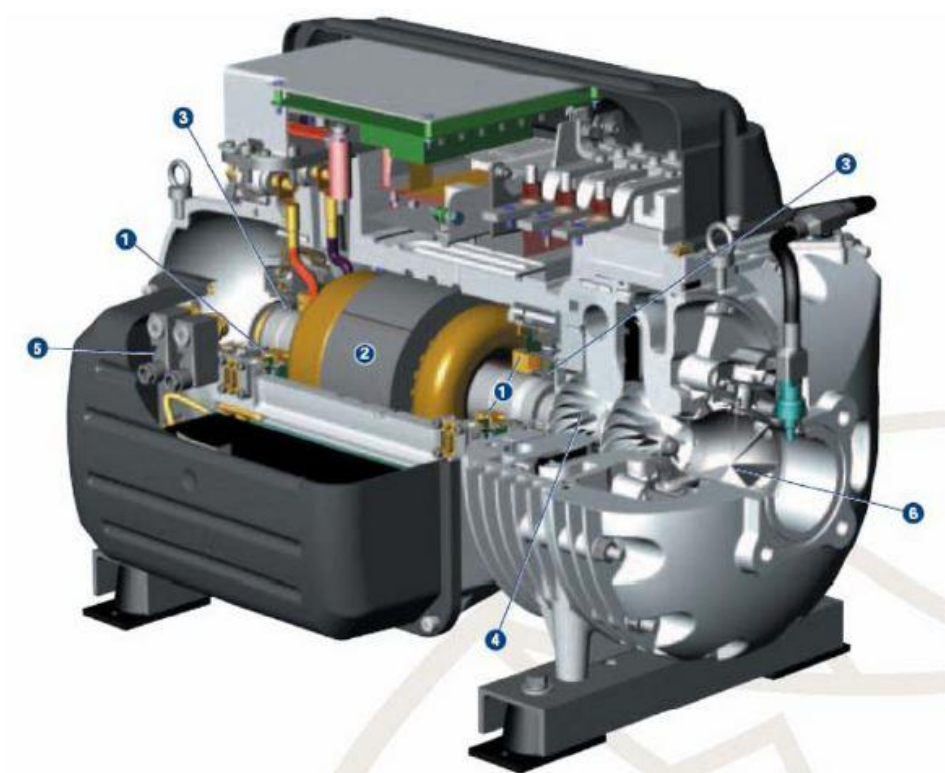


Εικόνα 2. Μικροτουρμπίνα με γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη. Διακρίνονται 1) η γεννήτρια, 2) ο συμπιεστής, 3) τα ρουλεμάν πεπιεσμένου αέρα, 4) η τουρμπίνα-στροβίλος, 5) ο θάλαμος καύσης, 6) ο εισαγωγέας καυσίμου, 7) ο εναλλάκτης θερμότητας, 8) η εξάτμιση, 9) τα πτερύγια ψύξης, 10) η εισαγωγή αέρα . (Προσφορά της Capstone, Chatsworth, CA, U.S.A.)

Όσον αφορά την ψύξη τους, χρησιμοποιούνται όλες οι γνωστές μέθοδοι (πχ. ψύξη με αέρα, ψύξη με νερό, ψύξη με λάδι κ.α) ενώ ως καύσιμο χρησιμοποιείται συνήθως φυσικό αέριο ή diesel. Σπανιότερα συναντάμε μικροτουρμπίνες βενζίνης ή βιοκαυσίμων.

1.4 Συμπιεστές

Η χρήση εξειδικευμένων μηχανών μόνιμου μαγνήτη ως κινητήρες συμπιεστών γίνεται ολοένα και πιο έντονη μιας και το λειτουργικό κόστος μπορεί να μειωθεί έως και 25% σε σχέση με τους ανταγωνιστικούς τύπους κινητήρων γι' αυτές τις εφαρμογές. Βέβαια σημαντικό μέρος της αγοράς συνεχίζει να χρησιμοποιεί κινητήρες επαγωγής ή κινητήρες μεταβλητής αντίδρασης (SRM).



Εικόνα 3 Πολύτροφος συμπιεστής με κινητήρα μόνιμων μαγνητών. 1) Μαγνητικά ρουλεμάν. 2) Κινητήρας μόνιμων μαγνητών. 3) Ρουλεμάν συγκράτησης (χρησιμοποιούνται όταν ο συμπιεστής δεν τροφοδοτείται με ρεύμα). 4) Άξονας και πτερύγια. 5) Σύστημα ψύξης. 6) Εισαγωγή αέρα.

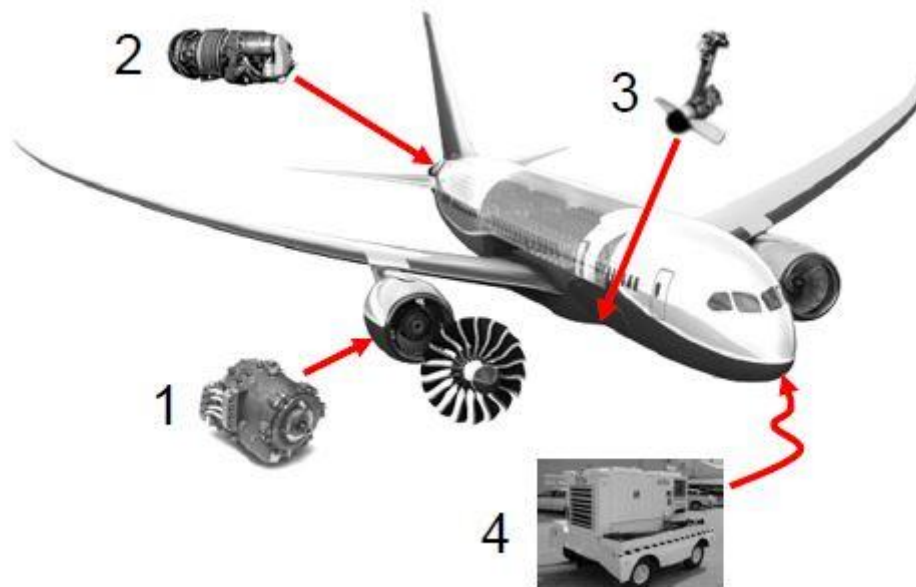
Στην εικόνα 3 αναπαριστάται ένας σύγχρονος συμπιεστής που χρησιμοποιεί κινητήρα μόνιμου μαγνήτη. Κύρια χαρακτηριστικά του είναι τα εξής:

- Φυγόκεντρη συμπίεση δύο σταδίων.
- Πολύτροφος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη με ταχύτητες περιστροφής από 18.000 έως και 45.000 ΣΑΛ.
- Ο άξονας του στροφείου ταυτίζεται με τον άξονα του κινητήρα (άμεση μετάδοση).

- Μαγνητικά ρουλεμάν.
- Έλεγχος με PWM και ηλεκτρονικά ισχύος ενσωματωμένα στη συσκευασία μαζί με τους ψηφιακούς ελεγκτές.
- Επίπεδα θορύβου κάτω από 70dBA.

1.5 Γεννήτριες αεροπλάνων

Η έρευνα και η πρόοδος στο τομέα των πλήρως εξηλεκτρισμένων αεροπλάνων για πτήσεις μικρών αποστάσεων είναι συνεχής, έντονη [6][7] και δίνονται αυξημένες προοπτικές για μεγάλη ζήτηση στον κλάδο[1]-[5]. Όμως τα σχέδια αυτά δεν είναι άμεσα υλοποιήσιμα κυρίως λόγω της αδυναμίας των σύγχρονων μπαταριών να παρέχουν πυκνότητα ισχύος συγκρίσιμη με εκείνη των καυσίμων. Παρόλα αυτά οι ανάγκες των επιβατών των αεροπλάνων για ηλεκτρική ενέργεια αυξάνονται διαρκώς και έτσι αυξάνεται και η ανάγκη του αεροσκάφους να παράγει αποδοτικά την απαιτούμενη ενέργεια μιας και η χρήση μπαταριών δεν ενδείκνυται.



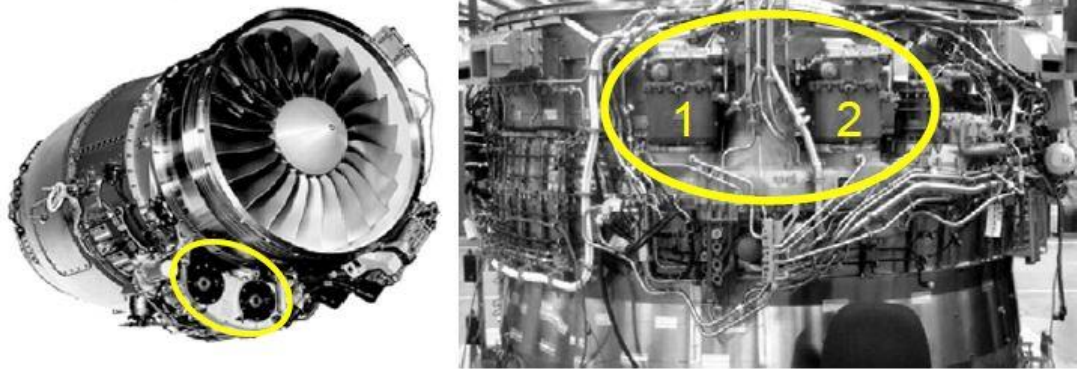
Εικόνα 4. Γεννήτριες που χρησιμοποιούνται σε επιβατικά αεροπλάνα: 1)Κύρια Γεννήτρια 2)Βοηθητική μονάδα ισχύος 3) τουρμπίνες κρουστικού αέρα 4)Μονάδα ισχύος εδάφους

Κάποια ηλεκτρικά συστήματα των αεροπλάνων είναι συνεχούς ρεύματος και κάποια εναλλασσόμενου. Τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα επίπεδα τάσης είναι 115 V AC και 28V DC. Οι γεννήτριες που χρησιμοποιούνται για να παραχθεί η ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να μπορούν να υποστηρίξουν μεγάλα φορτία και πάντα είναι περισσότερες σε αριθμό από τις απαιτούμενες. Σκοπός αυτού του πλεονασμού είναι να εξασφαλίζεται απρόσκοπτα η παροχή του ρεύματος στο αεροσκάφος σε περίπτωση σφάλματος.

Γενικότερα, οι ηλεκτρικές γεννήτριες που χρησιμοποιούνται σε αεροπορικές εφαρμογές μπορούν να χωριστούν στις εξής κατηγορίες:

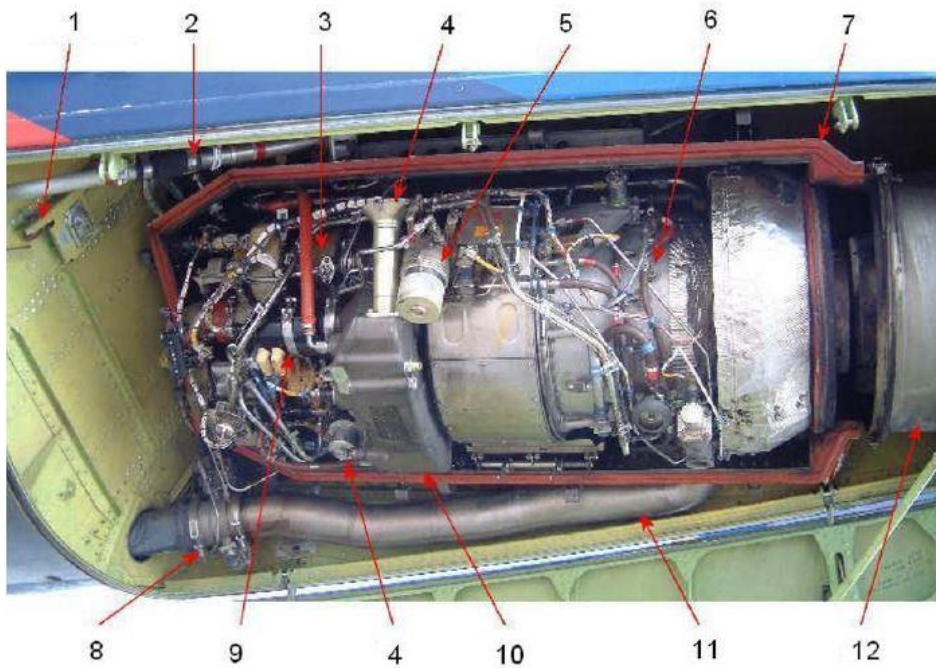
- Γεννήτριες οδηγούμενες από τη μηχανή

- Βοηθητικές μονάδες ισχύος
- Τουρμπίνες κρουστικού αέρα (ram air turbines)
- Μονάδες ισχύος εδάφους



Εικόνα 5 Αεριοστρόβιλος προώθησης και γεννήτριες που οδηγούνται από αυτόν. Σε κύκλο (αριστερά) τα γρανάζια μέσω των οποίων πραγματοποιείται η μηχανική σύζευξη στροβίλου-γεννήτριας, (δεξιά) οι γεννήτριες (1) & (2). Προσφορά της United Technologies Corporation, East Hartford, CT, U.S.A.

Αναλυτικότερα, κάθε μια από τις μηχανές του αεροπλάνου συνδέεται με μια γεννήτρια παρέχοντας τη μηχανική ενέργεια που η γεννήτρια μετατρέπει σε ηλεκτρική. Οι γεννήτριες αποτελούν τις βασικές μονάδες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας για το αεροσκάφος και υπό κανονικές συνθήκες πτήσης παρέχουν όλη την ενέργεια που αυτό χρειάζεται. Οι βοηθητικές μονάδες ισχύος χρησιμοποιούνται όταν το αεροσκάφος βρίσκεται στο έδαφος είτε πρόκειται για συντήρηση είτε για απλή στάση πριν τη πτήση καθώς και ως μίζες για την έναρξη της λειτουργίας των προωθητικών μηχανών. Βέβαια μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως βοηθητικές κατά την πτήση σε περίπτωση ανάγκης. Οι τουρμπίνες κρουστικού αέρα (ram air turbines) θα χρησιμοποιηθούν μόνο σε περίπτωση σφάλματος των κύριων γεννητριών ή των βοηθητικών. Οι μονάδες ισχύος εδάφους χρησιμοποιούνται αποκλειστικά κατά τη στάση του αεροπλάνου και συνήθως παρέχουν εναλλασσόμενο ρεύμα συνδεδεμένα σε μια υποδοχή που βρίσκεται στο ρύγχος του αεροπλάνου[8].



Εικόνα 6 Βοηθητική μονάδα ισχύος ενός Boeing 737. Διακρίνονται 1) διακόπτης φωτισμού, 2) αγωγός παροχής καυσίμου, 3)γεννήτρια, (4)φίλτρο , (5)στόμιο για την εισαγωγή καυσίμου 6)αγωγός ψύξης, 7) άνω κάλυμμα, 8)βαλβίδα αέρα, 9) μίζα-εκκινητής, 10)δεξαμενή-ντεπόζιτο, 11)bleed air manifold 12)κάλυμμα εξάτμισης. Προσφορά του C. Brandy, The 737 information site (παράποψη)



Εικόνα 7 Η θέση της βοηθητικής μονάδας σε ένα Boeing 737. Στα δεξιά διακρίνεται, πάνω από την εξάτμιση και η οπή για την εισαγωγή αέρα για την ψύξη της γεννήτριας. Προσφορά του C. Brandy, The 737 information site

Στη πλειοψηφία τους οι γεννήτριες που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές της αεροπορικής βιομηχανίας είναι σύγχρονες με τύλιγμα διέγερσης χωρίς ψύκτρες ή με χρήση μόνιμου μαγνήτη ως διέγερση. Ένας σημαντικός λόγος που μερικές φορές χρησιμοποιείται τύλιγμα διέγερσης είναι η δυνατότητα άμεσου τερματισμού της διέγερσης σε περίπτωση σφάλματος , κάτι μη εφικτό στην περίπτωση του μόνιμου μαγνήτη. Υπάρχουν όμως και

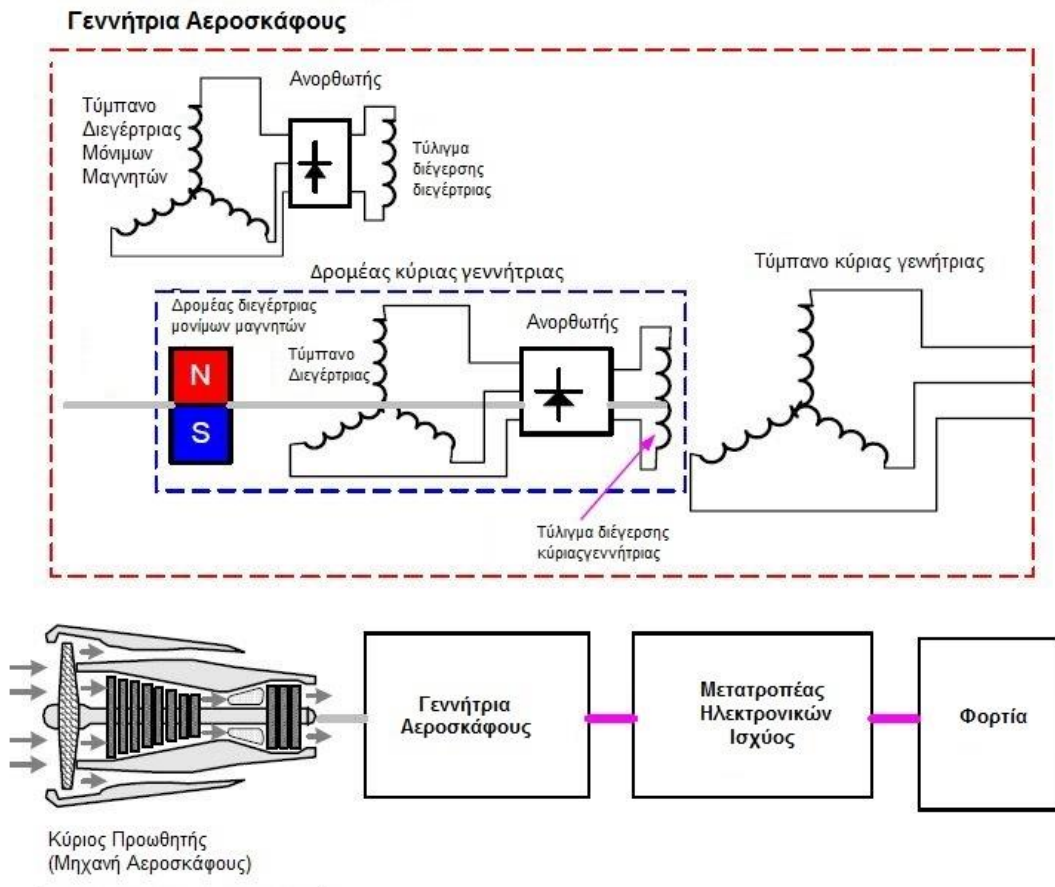
περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται μηχανές μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης (SRM) ως γεννήτριες.

Ως τυπικά χαρακτηριστικά στοιχεία των μηχανών αυτών μπορούν να αναφερθούν τα ακόλουθα. Οι αύλακες είναι έχουν σχήμα είτε οβάλ είτε τραπεζίου. Επίσης ο αριθμός αυλάκων ανά πόλο ανά φάση κυμαίνεται από 4 έως 10. Ο υψηλός αριθμός αυλάκων ανά πόλο ανά φάση, όταν συνδυαστεί με τύλιγμα κλασματικού βήματος διπλής στρώσης, μειώνει την ύπαρξη ανώτερων αρμονικών χώρου που εμφανίζονται στην κυματομορφή της μαγνητικής ροής. Ακόμα οι ηλεκτρικές συχνότητες των αεροπορικών εφαρμογών είναι συχνά ιδιαίτερα υψηλές γι' αυτό και δεν απαιτείται μεγάλος αριθμός σπειρών ανά πηνίο. Μάλιστα υπάρχουν και περιπτώσεις που τα πηνία αποτελούνται από μόνο μία σπείρα.

Συνήθεις τιμές για τον αριθμό των πόλων του δρομέα είναι 2 έως 12. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται σύγχρονη γεννήτρια, οι πόλοι του δρομέα έχουν εξωτερικά ημίκλειστα αυλάκια στα οποία τοποθετούνται τυλίγματα απόσβεσης. Όσον αφορά τα υλικά, τόσο ο στάτης όσο και ο δρομέας κατασκευάζονται από ελάσματα σιδήρου-κοβαλτίου. Μιας και οι ταχύτητες περιστροφής είναι υψηλές συχνά τοποθετούνται μη μαγνητικά ελάσματα προκειμένου να συγκρατηθούν τα τμήματα του δρομέα. Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα, το οποίο γίνεται εντονότερο όσο αυξάνεται η ισχύς της μηχανής, είναι η ψύξη. Ιδιαίτερα στην περίπτωση σύγχρονων γεννητριών τυλιγμένου δρομέα το ζήτημα αυτό απαιτεί αρκετά σύνθετες λύσεις[9, 10, 11, 12].

Τα συστήματα ψύξης που χρησιμοποιούνται είναι συστήματα εξαναγκασμένης ροής αέρα ή λαδιού. Ειδικότερα, ως πλέον αποδοτική τακτική θεωρείται ο ψεκασμός με λάδι των τυλιγμάτων των μηχανών. Με αυτό το τρόπο μπορούν να απαχθούν αποδοτικά απώλειες ακόμα και σε περιπτώσεις που η πυκνότητα ρεύματος των τυλιγμάτων φτάσει τα 28 A/mm²[8].

Στην εικόνα 8 δίνεται αναλυτικά το σχεδιάγραμμα του ηλεκτρικού κυκλώματος της γεννήτριας. Παρατηρούμε ότι η διεγέρτρια μηχανή είναι ανεστραμμένη, δηλαδή η διέγερση με μόνιμο μαγνήτη βρίσκεται στο στάτη, ενώ το τύλιγμα τυμπάνου στο δρομέα. Το τύλιγμα τυμπάνου της διεγέρτριας συνδέεται με έναν ανορθωτή, ο οποίος βρίσκεται πάνω στον άξονα των γεννητριών και περιστρέφεται μαζί τους. Ο ανορθωτής παρέχει το συνεχές ρεύμα που απαιτεί η διέγερση της κύριας γεννήτριας. Συχνά μάλιστα χρησιμοποιείται και μια πολύ μικρής ισχύος μηχανή μόνιμων μαγνητών με σκοπό τη διέγερση της διεγέρτριας.



Εικόνα 8 Σχηματική απεικόνιση των υποσυστημάτων παραγωγής ενέργειας του αεροσκάφους

Οι γεννήτριες των αεροσκαφών περιστρέφονται από τις στροβιλομηχανές-τουρμπίνες τους είτε με απευθείας σύνδεση στον ίδιο άξονα είτε μέσω κάποιου συστήματος μετάδοσης. Ο τρόπος σύνδεσης είναι ιδιαίτερα σημαντικός αν αναλογιστεί κανείς ότι οι ταχύτητες περιστροφής φτάνουν τις 27000 ΣΑΛ και η ισχύς έκαστης γεννήτριας μπορεί να είναι έως και 250kW.

Η ταχύτητα περιστροφής αλλά και η συχνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος των γεννητριών μπορεί να είναι σταθερή ή μεταβαλλόμενη. Προκειμένου όμως να εξασφαλίσουμε απόλυτα έλεγχο στην συχνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος με το οποίο τροφοδοτούμε το δίκτυο είναι απαραίτητη η χρήση μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος. Παλαιότερα που η χρήση ηλεκτρονικών ισχύος δεν ήταν τόσο διαδεδομένη για μεγάλες ισχύεις χρησιμοποιούνταν ένα σύνθετο υδραυλικό σύστημα προκειμένου να αφαιρείται ισχύς από τον άξονα της γεννήτριας και να παραμένει με αυτό τον τρόπο σταθερή η ηλεκτρική συχνότητα στην επιθυμητή τιμή.

1.6 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- [1] Concept of Operations for Highly Autonomous Electric Zip Aviation, Mark Moore, NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia, September 2012.
- [2] FAA Airport Programs & Guidance, <http://www.faa.gov/airports/>, accessed 28 July 2012.
- [3] Federal Aviation Administration, Terminal Area Forecast Summary, Fiscal Years 20011-2040.
- [4] Viken, J., et. al., "Utilizing Traveler Demand Modeling to Predict Future Commercial Flight Schedules in the NAS," 11th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, September 2006, Portsmouth, Virginia.
- [5] NASA contract number NNA05BE01C, Contract Data Requirements List 17.3, "Airspace Concept Evaluation System (ACES) Software User Manual", Jan. 2009.
- [6] Metrics for the NASA Airspace Systems Program, Smith, Jeremy C. , Neitzke, Kurt W, Langley Research Center, Hampton, Virginia, September 2009, NASA/SP-2009-6115
- [7] Design Study of a Hybrid Electric Aircraft for On-Demand Aviation, Mark Moore, NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia, September 2012.
- [8] Advancements in Electric Machines, Jacek F. Gieras, Springer,2008, ISBN: 978-1-4020-9006-6.
- [9] Bent R.D. and Mc Kinley J.L, Aircraft electricity and electronics, 3rd Edition, McGraw-Hill Book Company.
- [10] Kennett R.J. (1981). Advanced generating system technology, Aircraft Electrical Power Systems SP-500 Conf., SAE, Warrendale, PA, USA, pp. 35–41.
- [11] Lieutaud P., Brissonneau P., Chillet C., and Foggia A. (1991), Preliminary investigations in high speed electrical machines design, Int. Conf. on the Evolution and Modern Aspects of Synchronous Machines SM100, Zurich, Switzerland, 3:840–844.
- [12] Tolbert L.M., Peterson W.A., Theiss T.J., and Scudiere M.B. (2003). Gensets, IEEE IA Magazine, 9(2):48–53.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΝΑΛΛΑΣΟΜΕΝΗΣ ΡΟΗΣ

2.1 Υπόβαθρο και ορισμός

Το τύμπανο κάθε ηλεκτρικής μηχανής αποτελείται από πηνία. Για κάθε ένα από αυτά μπορούμε, σύμφωνα με το νόμο του Faraday, να προσδιορίσουμε την επαγόμενη τάση e στα άκρα του ως το ρυθμό αλλαγής της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής, που το διαρρέει, συναρτήσει του χρόνου, ως εξής:

$$e(t) = -\frac{d\psi}{dt}$$

Χρησιμοποιώντας τον κανόνα της αλυσίδας ο παραπάνω τύπος γίνεται:

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -\frac{d\psi}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = -\frac{d\psi}{d\theta} \omega$$

Αντίστοιχα η ροπή που ασκείται σε ένα πηνίο ή σύνολο πηνίων που διαρρέεται από ρεύμα i_a , αποδεικνύεται πως είναι:

$$T_e = i_a \frac{d\psi_a}{d\theta}$$

Η γωνία θ αναφέρεται στη γωνία που σχηματίζει ο δρομέας της μηχανής με το στάτη. Η γωνία αυτή μεταβάλλεται συνεχώς λόγω της σχετικής τους κίνησης. Επομένως, για να επαχθεί τάση στα πηνία της μηχανής και να υπάρξει ηλεκτρομηχανική μετατροπή ενέργειας πρέπει να η ροή που διαρρέει τα πηνία να είναι συνάρτηση της σχετικής θέσης στάτη και δρομέα της μηχανής. Μπορούμε μάλιστα να δούμε τη ροή αυτή ως μια περιοδική συνάρτηση που κινείται μεταξύ μιας μέγιστης και μιας ελάχιστης τιμής.

Ο πλέον διαδεδομένος και χρησιμοποιούμενος τρόπος για να υπάρξει αυτή η μεταβολή της ροής μεταξύ μιας μέγιστης και μιας ελάχιστης τιμής είναι με τη χρήση πόλων στο σύστημα διέγερσης. Οι πόλοι που δημιουργούνται είτε μέσω πηνίων διέγερσης είτε μέσω μόνιμων μαγνητών παράγουν σταθερή μαγνητική ροή (ή πιο σωστά σταθερή μαγνητική επαγωγή). Λόγω της περιστροφής η ροή, η οποία διαρρέει την επιφάνεια S που περιβάλλει κάθε πηνίο, μεταβάλλεται από τη μέγιστη τιμή της όταν η κατεύθυνση της ροής έχει τη ίδια κατεύθυνση με την κατεύθυνση της S , στην ελάχιστη όταν η κατεύθυνση της ροής είναι αντίθετη με την κατεύθυνση της S . Αναλυτικότερα οι σχέσεις που εκφράζουν την παραπάνω συλλογιστική είναι:

$$\psi_a = N_{\text{πηνίων}} \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (1)$$

$$\vec{B} = \frac{\vec{F}}{R(\theta)} \cong \frac{\vec{F}}{R} \xrightarrow{F=\text{σταθερό}} |B| = \text{σταθερό} \quad (2)$$

Από (1) & (2) προκύπτει:

$$\psi_{\alpha} = N_{\pi\eta\nu\iota\omega\nu} \iint_S |B| \cdot \cos[\varphi(\theta)] dS$$

Όπου

$\varphi(\theta)$: η γωνία που σχηματίζει η επιφάνεια που περικλείει το πηνίο με την κατεύθυνση του B, η οποία είναι συνάρτηση της θ

N: ο αριθμός των σπειρών του πηνίου

Ένας άλλος τρόπος να δημιουργηθεί μεταβολή της ροής είναι κρατώντας σταθερή τη διέγερση να μεταβάλλεται η μαγνητική αντίσταση του μαγνητικού κυκλώματος σαν συνάρτηση της σχετικής θέσης στάτη και δρομέα. Για να επιτευχθεί αυτό είναι απαραίτητη η ύπαρξη έντονης εκτυπότητας στη γεωμετρία της μηχανής. Η μεταβολή της ροής του τυμπάνου μεταξύ υψηλών και χαμηλών τιμών λόγω της μεταβολής της μαγνητικής αντίστασης του τυμπάνου ονομάζεται «εναλλαγή ροής». Οι μηχανές που λειτουργούν με βάση αυτή την αρχή ονομάζονται μηχανές εναλλασσόμενης ροής (flux switching machines or switching flux machines). Συγκεκριμένα η σχέση πάνω στην οποία βασίζουν τη λειτουργία τους είναι:

$$\psi_{\alpha} = N_{\pi\eta\nu\iota\omega\nu} \iint_S \frac{\vec{F}}{R(\theta)} \cdot d\vec{S}$$

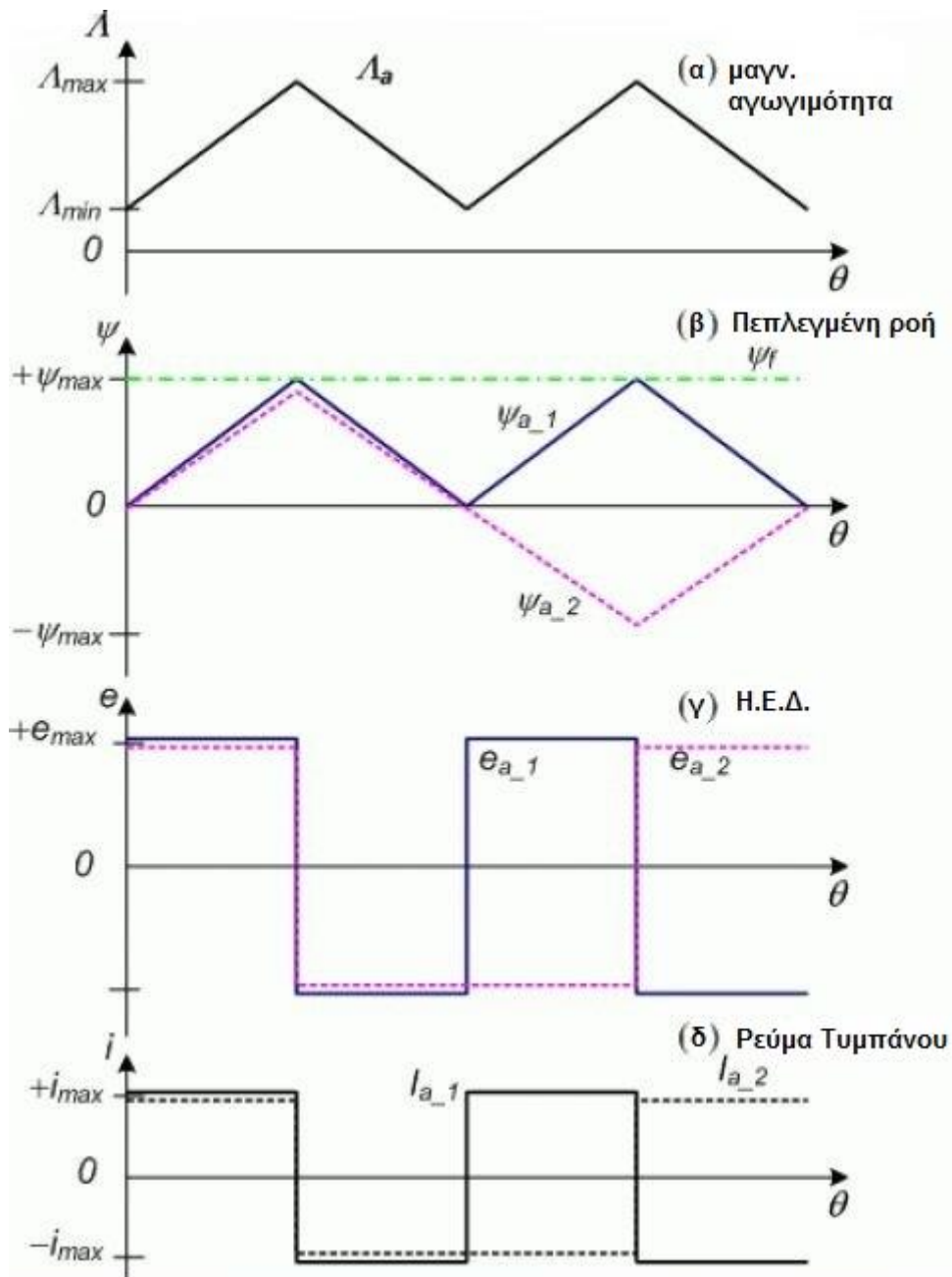
Τα κύρια χαρακτηριστικά των μηχανών εναλλασσόμενης ροής είναι δύο. Πρώτον, το τύμπανο και η διέγερση της μηχανής τοποθετούνται στο στάτη της μηχανής. Δεύτερον, ο δρομέας πρέπει να έχει γεωμετρικό σχήμα που να κάνει έντονη τη μεταβολή της μαγνητικής αντίστασης ανάλογα με τη θέση του, το οποίο σημαίνει ουσιαστικά να έχει έντονη εκτυπότητα.

Ιστορικά οι αρχές των μηχανών εναλλασσόμενης ροής είναι γνωστές από τις αρχές της δεκαετίας του 1940 [1]- [2]. Όμως η ενδελεχής εξέταση και ανάλυση τέτοιων μηχανών έγινε μετά την ανάπτυξη στην τεχνολογία των ηλεκτρονικών ισχύος που συνέβη τη δεκαετία του 1990, η οποία έκανε εφικτή την ευρύτερη χρήση τους [3]-[6].

2.2 Τρόποι εναλλαγής ροής

Όπως αναλύθηκε προηγουμένως η αρχή της λειτουργίας των μηχανών εναλλασσόμενης ροής βασίζεται στη μεταβολή της πεπλεγμένης ροής των πηνίων του τυμπάνου μεταξύ μιας μέγιστης και ελάχιστης τιμής. Η μεταβολή αυτή μπορεί να διαχωρισθεί σε δύο κατηγορίες: στην μονοπολική και τη αμφιπολική. Η μονοπολική αφορά την περίπτωση που η πεπλεγμένη ροή έχει μόνο μία πολικότητα (N ή S) ή απλούστερα η τιμή της κρατά σταθερό πρόσημο (θετικό ή αρνητικό). Αντίστοιχα η αμφιπολική αφορά την περίπτωση που η πεπλεγμένη ροή έχει μεταβαλλόμενη πολικότητα, δηλαδή μεταβάλλεται μεταξύ μιας

μέγιστης θετικής τιμής και μιας ελάχιστης αρνητικής τιμής. Οι δύο αυτές κατηγορίες απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 9: Κυματομορφές (α) μαγνητικής αγωγιμότητας, (β) πεπλεγμένης μαγνητικής ροής τυλίγματος τυμπάνου, (γ) Ηλεκτρεγερτικής Δύναμης, (δ) ρεύματος τυμπάνου. Στα σχήματα (β), (γ), (δ) απεικονίζεται με διακεκομμένη γραμμή η κυματομορφή που αφορά μηχανές με αμφιπολική ροή ενώ με συνεχή διπολική ροή.

Όπως φαίνεται και στα σχήματα, η ροή στην μονοπολική περίπτωση, εξαρτάται (σχεδόν) αποκλειστικά από τη μεταβολή της μαγνητικής αγωγιμότητας. Αντίθετα, στη διπολική περίπτωση, εκτός από τη μεταβολή της μαγνητικής αγωγιμότητας, υπάρχει άλλο ένα φαινόμενο το οποίο συνεισφέρει στην εναλλαγή της ροής και ξεχωρίζει αυτή την περίπτωση από την προηγούμενη. Η διαφορά οφείλεται στο γεγονός ότι τα τυλίγματα του

τυμπάνου (στη διπολική περίπτωση) διαρρέονται από ροή της οποίας η κατεύθυνση μεταβάλλεται ανάλογα με τη σχετική θέση δρομέα ως προς το στάτη.

2.3 Εξέλιξη των μηχανών εναλλασσόμενης ροής

Από τον ορισμό των μηχανών εναλλασσόμενης ροής που χρησιμοποιήσαμε προηγουμένως προκύπτει ότι αυτές οι μηχανές μπορούν να χωριστούν σε κατηγορίες ανάλογα με:

- a) Την πηγή διέγερσης (τύλιγμα διέγερσης ή μόνιμος μαγνήτης)
- b) Τη σχετική διεύθυνση της πηγής διέγερσης
- c) Το αν είναι μονοπολική ή αμφιπολική
- d) Τη μορφή του ρεύματος τυμπάνου (ημιτονοειδές ή τραπεζοειδές)
- e) Τύπος δρομέα (δρομέας με έντονη εκτυπότητα ή δρομέας μαγνητικών τμημάτων)

Οι παλαιότερες μορφές μηχανών εναλλασσόμενης ροής χρησιμοποιούσαν τυλίγματα διέγερσης. Όμως η πρόοδος στον τομέα των υλικών και συγκεκριμένα στον μόνιμων μαγνητών που μπορούν να διατηρήσουν τη μαγνήτισή τους σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες (>100 °C) δημιούργησε τις συνθήκες για αντικατάσταση των τυλιγμάτων διέγερσης από μαγνήτες. Ο λόγος που ώθησε σε αυτή την αλλαγή είναι ότι η χρήση μόνιμου μαγνήτη στη διέγερση δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας μηχανών με πολύ μεγάλη πυκνότητα ισχύος. Τούτο διότι οι μόνιμοι μαγνήτες παρέχει διέγερση χωρίς απώλειες και καταλαμβάνουν λιγότερο χώρο ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διεύρυνση του συστήματος διέγερσης[7].

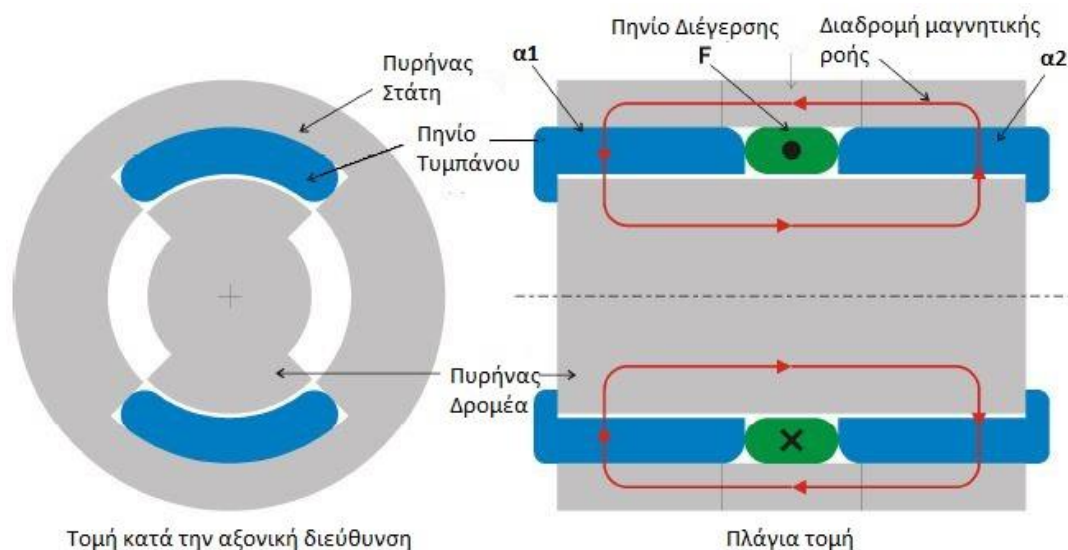
Η σχετική διεύθυνση της πηγής διέγερσης μπορεί να είναι είτε ακτινική είτε αξονική είτε περιφερειακή. Η επιλογή της ακτινικής διεύθυνσης είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη αλλά έχει το εξής μειονέκτημα: αν η διέγερση υλοποιείται με τυλίγματα πρέπει να μειωθεί το τύλιγμα τυμπάνου ώστε να χωρέσει και το τύλιγμα διέγερσης στο στάτη. Η χρήση διέγερσης στην αξονική κατεύθυνση χρησιμοποιούταν παλαιότερα καθώς δίνει την δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί όλος ο χώρος των αυλακών του στάτη από το τύλιγμα τυμπάνου. Όμως, στην περίπτωση αυτή, η ροή της μηχανής ρέει μόνο προς μια κατεύθυνση με αποτέλεσμα να μην αξιοποιείται πλήρως το μαγνητικό κύκλωμα. Τέλος η επιλογή περιφερειακής διέγερσης μπορεί να υλοποιηθεί αποδοτικά κυρίως με τη χρήση μόνιμων μαγνητών[7].

Η επεξήγηση των όρων μονοπολική και αμφιπολική ροή, που γίνεται προηγουμένως, δε διασαφηνίζει απολύτως τα πλεονεκτήματα της μιας έναντι της άλλης. Συγκεκριμένα οι μηχανές με αμφιπολική ροή μπορούν να παρέχουν τη ίδια τάση ή ροπή με χρήση μικρότερου όγκου μαγνητικού υλικού. Τούτο διότι για την ύπαρξη ηλεκτρομηχανικής μετατροπής είναι απαραίτητος υψηλός ρυθμός μεταβολής της ροής, όχι να είναι μεγάλη η απόλυτη τιμή της. Έτσι οι μηχανές με αμφιπολική ροή μπορούν να παρουσιάζουν τον ίδιο ρυθμό μεταβολής της ροής με τις αντίστοιχες μονοπολικές χρησιμοποιώντας λιγότερο μαγνητικό υλικό. Ο λόγος είναι ότι οι μηχανές με αμφιπολική ροή για να αποφύγουν τον κορεσμό του μαγνητικού κυκλώματος πρέπει να χρησιμοποιήσουν μεγαλύτερη ποσότητα μαγνητικού υλικού[7].

2.3.1 Ο επαγωγικός εναλλάκτης

Ο επαγωγικός εναλλάκτης είναι η πρώτη μορφή μηχανής εναλλασσόμενης. Μάλιστα αποτελούσε στα τέλη του 19^{ου} αιώνα το βασικό τρόπο παραγωγής ενέργειας πριν από την άνοδο, και τελικά την κυριαρχία στον τομέα αυτό, των μηχανών με διέγερση στο δρομέα [8].

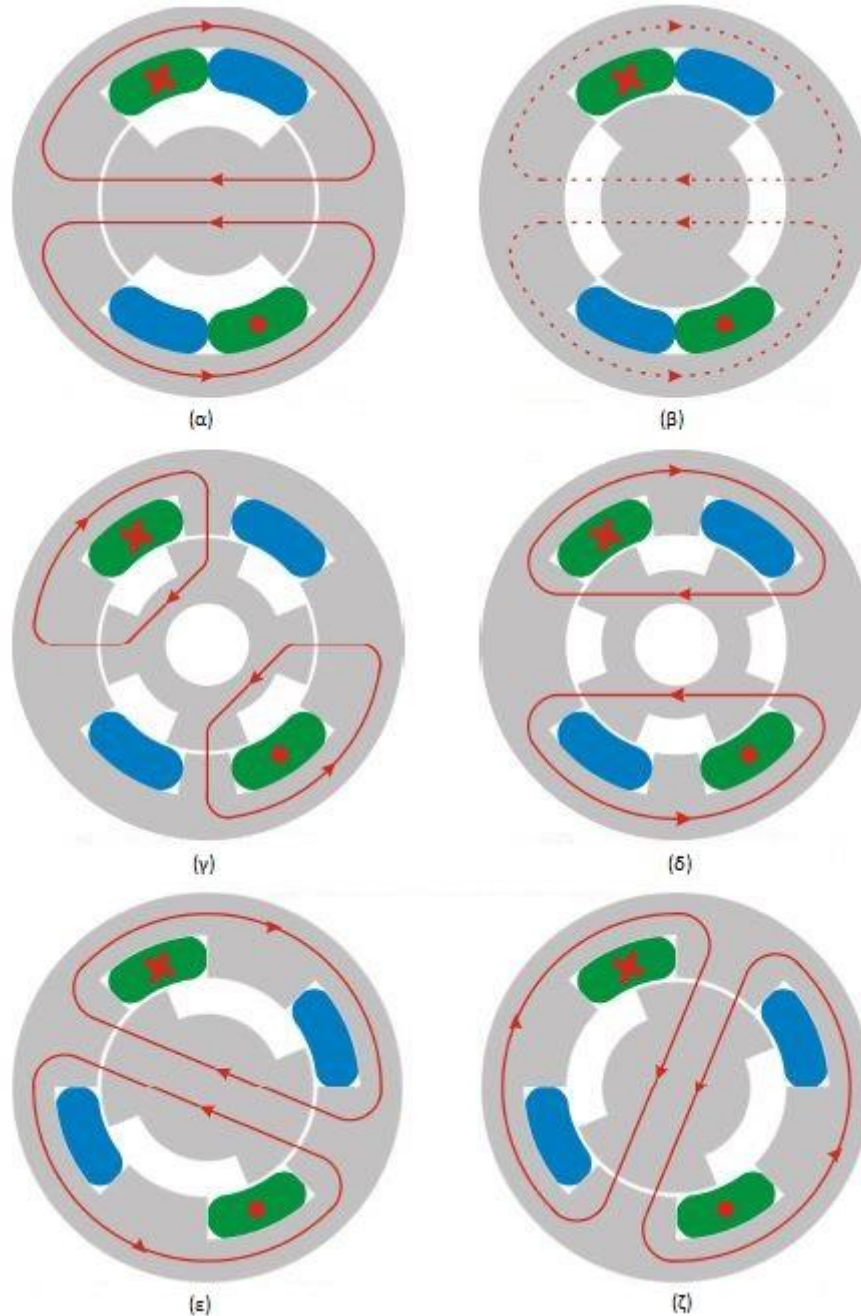
Για την επεξήγηση της λειτουργίας του χρησιμοποιούνται δύο μηχανές: η ομοπολική και η ετεροπολική μηχανή. Η απλοποιημένη γεωμετρία της ομοπολικής μηχανής φαίνεται στο σχήμα 2. Ο στάτης, στον οποίο βρίσκεται το τύμπανο, αποτελείται από έναν πυρήνα ελασμάτων σιδήρου και έχει αύλακες. Τα πηνία τυμπάνου ($\alpha 1$ και $\alpha 2$) είναι τυλιγμένα κατά τέτοιο τρόπο ώστε η επιφάνεια που περικλείουν να είναι κάθετη στην ακτινική διεύθυνση. Αντίθετα, το πηνίο διέγερσης (F) είναι τυλιγμένο κατά τη περιφερειακή διεύθυνση, με αποτέλεσμα να δημιουργεί μαγνητική ροή που κινείται κατά την αξονική διεύθυνση εκτός από το σημείο που διασχίζει το διάκενο αέρα μεταξύ δρομέα και στάτη. Ο δρομέας έχει σχήμα με έντονη εκτυπότητα και έτσι μεταβάλλεται κατά την κίνηση του το μήκος του διακένου αέρα. Μεταβολή του διακένου αέρα συνεπάγεται έντονη μεταβολή της μαγνητικής αντίστασης του κυκλώματος. Επειδή η διέγερση είναι σταθερή, η ροή που εμπλέκει το τύλιγμα τυμπάνου μεταβάλλεται ανάλογα με τη μεταβολή της μαγνητικής αντίστασης. Βασικό μειονέκτημα αυτής της τοπολογίας είναι η ροή κινείται, εκτός από την αξονική, και στην ακτινική διεύθυνση σε ορισμένα τμήματα με αποτέλεσμα τα αξονικά τοποθετημένα ελάσματα σιδήρου να μην μπορούν να αποτρέψουν την έντονη δημιουργία δινορρευμάτων. Ένας να τρόπος να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα είναι με τη χρήση πυρήνα κονιοποιημένου σιδήρου αντί για ελάσματα σιδήρου [7].



Εικόνα 10: Αναπαράσταση της ομοπολικής μηχανής

Η ετεροπολική αποτελεί μια εξέλιξη της ομοπολικής μηχανής. Μάλιστα εκθρόνισε την ομοπολική μηχανή και έγινε αυτή η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη πολύστροφη γεννήτρια.

Βασικό της πλεονέκτημα έναντι της ομοπολικής είναι ότι μπορεί να επιτύχει σημαντικά μικρότερες σταθερές χρόνου στις δυναμικές μεταβολές του φορτίου, κάτι που την καθιστούσε ιδανική για εφαρμογές που απαιτούσαν ακριβή και έλεγχο ταχείας απόκρισης της τάσης ακροδεκτών του εναλλάκτη [9]. Η δομή της παρουσιάζεται στο σχήμα 3.



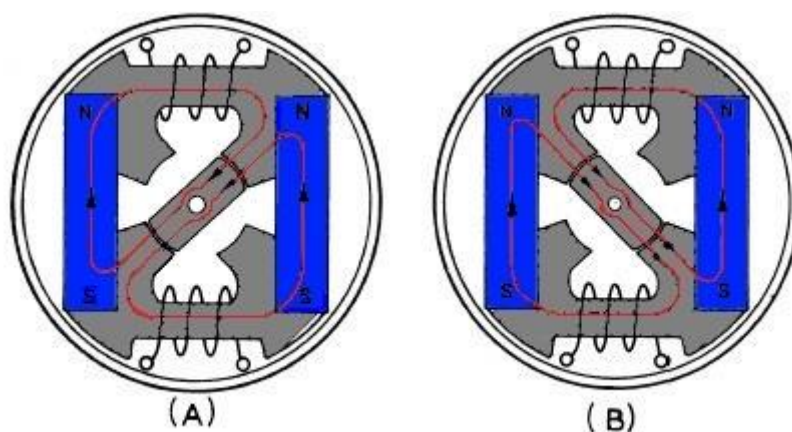
Εικόνα 11: Βασικές τοπολογίες της ετεροπολικής μηχανής. Τα πηνία του τυλίγματος διέγερσης αναπαριστούνται με πράσινο χρώμα ενώ τα πηνία του τυλίγματος τυμπάνου με μπλε.

Η δομή της ετεροπολικής μηχανής μοιάζει αισθητά με την ομοπολική αλλά παρουσιάζει και ορισμένες σαφείς διαφορές που τη διαχωρίζουν. Αναλυτικότερα, ο στάτης αποτελείται από ελάσματα σιδήρου και περιέχει αύλακες. Σ' αυτές τις αύλακες τοποθετούνται τα πηνία τυμπάνου και διέγερσης. Υπάρχουν διαμορφώσεις που το τύλιγμα διέγερσης βρίσκεται στις ίδιες αύλακες με το τύλιγμα στάτη (όπως αυτή των σχημάτων (α) και (β)), αλλά και

διαμορφώσεις που τα δύο τυλίγματα βρίσκονται σε ξεχωριστές αύλακες (βλ. Σχήματα (γ)-(ζ)). Η διαφορά στον τρόπο που τοποθετούνται τα τυλίγματα έχει ως αποτέλεσμα η ροή που διαρρέει το τύλιγμα του τυμπάνου να είναι αμφιπολική.

2.3.2 Ο εναλλάκτης ροής

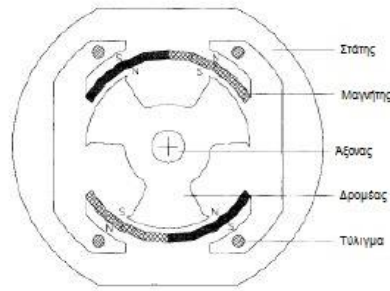
Επόμενο βήμα στην κατεύθυνση που χάραξαν οι προαναφερθείσες τοπολογίες είναι ο εναλλάκτης μαγνητικής ροής που έχει τον ίδιο τρόπο λειτουργίας μόνο που το τύλιγμα διέγερσης έχει αντικατασταθεί από μόνιμους μαγνήτες.



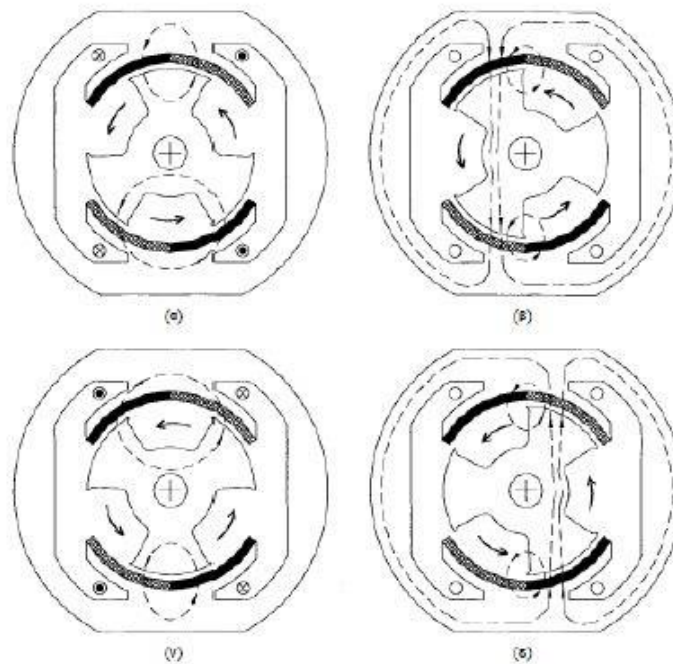
Εικόνα 12: Σχηματική Απεικόνιση ενός εναλλάκτη ροής σε δύο διακριτές θέσεις

2.3.3 Η μηχανή αντιστροφής ροής

Η μηχανή αντιστροφής ροής (flux-reversal machine) είναι μια μηχανή που παρουσιάστηκε ως τοπολογία μηχανής εναλλασσόμενης ροής το 1997 [10]. Πρόκειται για μια μηχανή στην οποία η μαγνητική ροή που διαρρέει τους πόλους παίρνει θετικές και αρνητικές τιμές. Σαν δομή έχει έντονες ομοιότητες με εκείνη μιας SRM με τη διαφορά ότι κάθε πόλος έχει ένα ζεύγος μόνιμων μαγνητών. Οι μαγνήτες κάθε πόλου είναι τοποθετημένοι με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουν αντίθετες πολικότητες. Εξαιτίας των χαμηλών ηλεκτρικών σταθερών που παρουσιάζει καθώς και της μικρής αδράνειας του δρομέα προτάθηκε ως εναλλακτική για εφαρμογές που απαιτούν γρήγορες αποκρίσεις, όπως για παράδειγμα γεννήτριες ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Στην εικόνα 5 σημειώνονται αναλυτικότερα τα επιμέρους δομικά στοιχεία της μηχανής ενώ στο σχήμα της εικόνας 7 αναπαρίστανται τέσσερις σχετικές θέσεις δρομέα-στάτη που είναι ενδεικτικές της λειτουργίας της.



Εικόνα 13: Αναπαράσταση της δομής μιας τριπολικής μηχανής αντιστροφής ροής



Εικόνα 14: Σχηματική απεικόνιση τεσσάρων διαφορετικών θέσεων του δρομέα της μηχανής αντιστροφής. Στο σχήμα αυτό διακρίνονται με διακεκομμένη γραμμή οι δρόμοι που ακολουθεί η μαγνητική ροή στις διάφορες θέσεις.

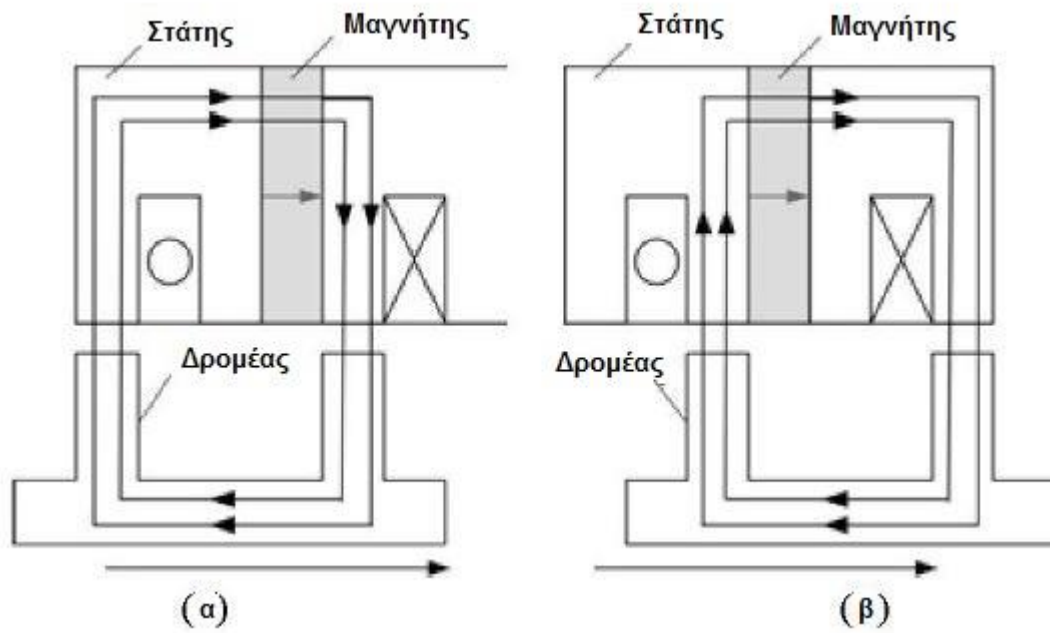
Από τα στιγμιότυπα της λειτουργίας της μηχανής που εμφανίζονται στην εικόνα 6 τα (β) και (δ) αφορούν θέσεις που η μαγνητική αντίσταση είναι ελάχιστη και κατά συνέπεια η μαγνητική ροή που διαρρέει τα τυλίγματα μέγιστη κατά μέτρο. Η διαφορά είναι ότι στο (β) η μαγνητική ροή λαμβάνει τη μέγιστη θετική τιμή ενώ στο (δ) την ελάχιστη αρνητική τιμή ή αντίστροφα ανάλογα με το ποια φορά θα θεωρηθεί θετική. Αντίστοιχα στα (α) και (γ) η μαγνητική αντίσταση του είναι μέγιστη με αποτέλεσμα να η μαγνητική ροή να λαμβάνει τις ελάχιστες μέτρο τιμές.

Στη βιβλιογραφία μπορούν να βρεθούν και μελέτες που αφορούν και πολυφασικές μηχανές τέτοιας μορφής [11], [12].

2.4 Σύγχρονες τοπολογίες μηχανών εναλλασσόμενης ροής που χρησιμοποιούν έκτυπο δρομέα

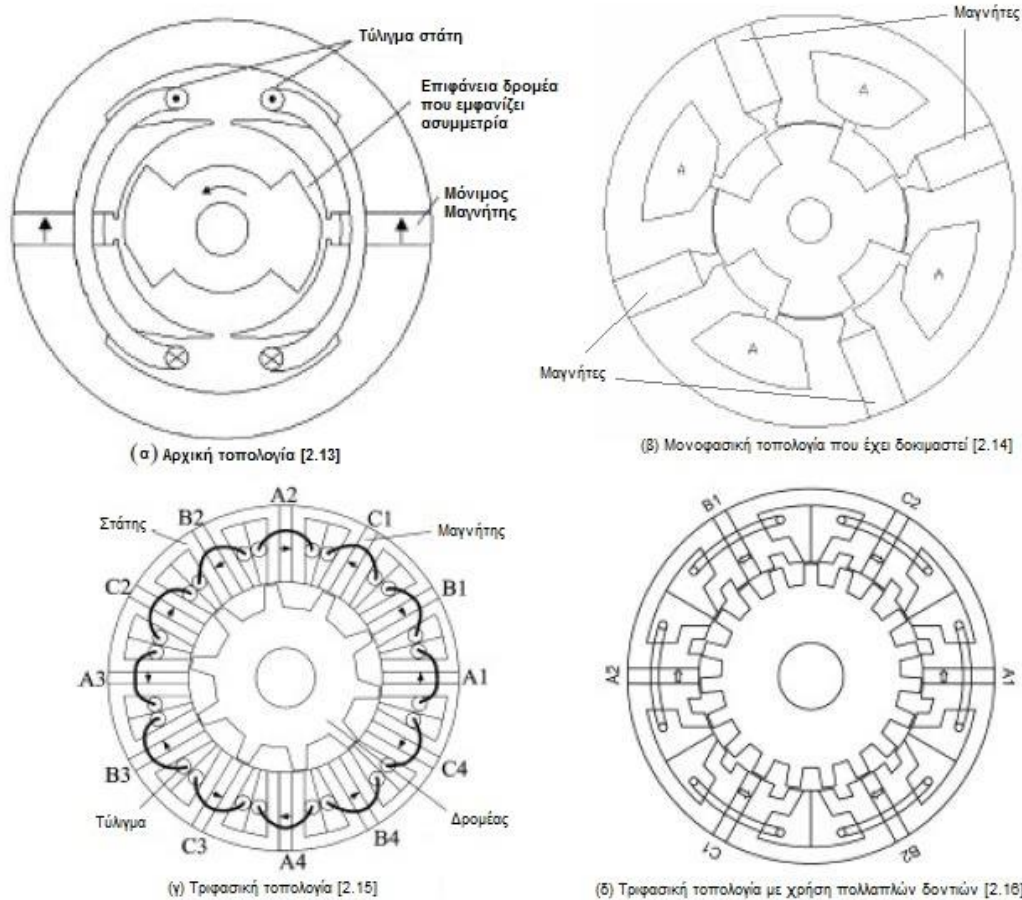
Χρησιμοποιώντας ως βάση της τοπολογίες που αναφέρθηκαν προηγουμένως αναπτύχθηκαν την τελευταία δεκαετία πολλές τοπολογίες μηχανών εναλλασσόμενης ροής. Κύριοι παράγοντες που συντέλεσαν ώστε αυτές οι πρωτότυπες τοπολογίες να είναι υλοποιήσιμες και ενδιαφέρουσες ως εναλλακτικές στις ήδη υπάρχουσες είναι η ανάπτυξη νέων προηγμένων υλικών, η έντονη εξέλιξη των μεθόδων κατασκευής και κυρίως η πρόοδος που σημειώθηκε στον τομέα των ημιαγωγών και των ημιαγωγικών διατάξεων. Όλα αυτά έδωσαν τη δυνατότητα δημιουργίας αποδοτικών και σχετικά φθηνών διατάξεων οδήγησης μηχανής, καθιστώντας έτσι οικονομικά εφικτή την χρήση μηχανών σε εφαρμογές που απαιτούσαν πολύ ακριβή έλεγχο και ευέλικτη διαχείριση της διαθέσιμης ισχύος.

Προκειμένου να εξηγηθεί η λειτουργία των σύγχρονων τοπολογιών μηχανών εναλλασσόμενης ροής χρησιμοποιείται ευρέως η έννοια των πρωταρχικών ευθύγραμμων κελιών (elementary rectilinear cells). Η έννοια αυτή, η οποία θα εξηγηθεί αναλυτικά στη συνέχεια, βασίζεται στο γεγονός ότι οι σύγχρονες τοπολογίες μηχανών εναλλασσόμενης ροής αποτελούνται από μια επαναλαμβανόμενη γεωμετρία στο στάτη. Η γεωμετρία αυτή μοιάζει με ένα αγγλικό “U” από μαγνητική λαμαρίνα στις άκρες της οποίας τοποθετείται η διέγερση, είτε αυτή παράγεται μέσω πηνίου είτε μέσω μόνιμου μαγνήτη. Στο σχήμα 2.7 γίνεται μια αναπαράσταση της έννοιας. Ο μόνιμος μαγνήτης, ο οποίος βρίσκεται ανάμεσα σε δύο διαδοχικά “U” από μαγνητική λαμαρίνα παρέχει τη διέγερση. Επίσης τα “U” δρουν ως αύλακες, παρέχοντας χώρο για τη τοποθέτηση του τυλίγματος τυμπάνου. Παρατηρώντας τις δύο διαφορετικές θέσεις στα σχήματα 2.7(α) και 2.7(β) γίνεται εμφανές ότι η αλλαγή της θέσης του δρομέα έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή της διαδρομής της μαγνητικής ροής. Αναλυτικότερα η πεπλεγμένη μαγνητική ροή μεταβάλλει το πρόσημο της μιας και η μαγνητική ροή εμπλέκει διαφορετικά μέρη του τυλίγματος στις δύο αυτές θέσεις.



Εικόνα 15: Πρωταρχικά ευθύγραμμα κελία που χρησιμοποιούνται για την ερμηνεία της λειτουργίας των μηχανών εναλλασσόμενης ροής.

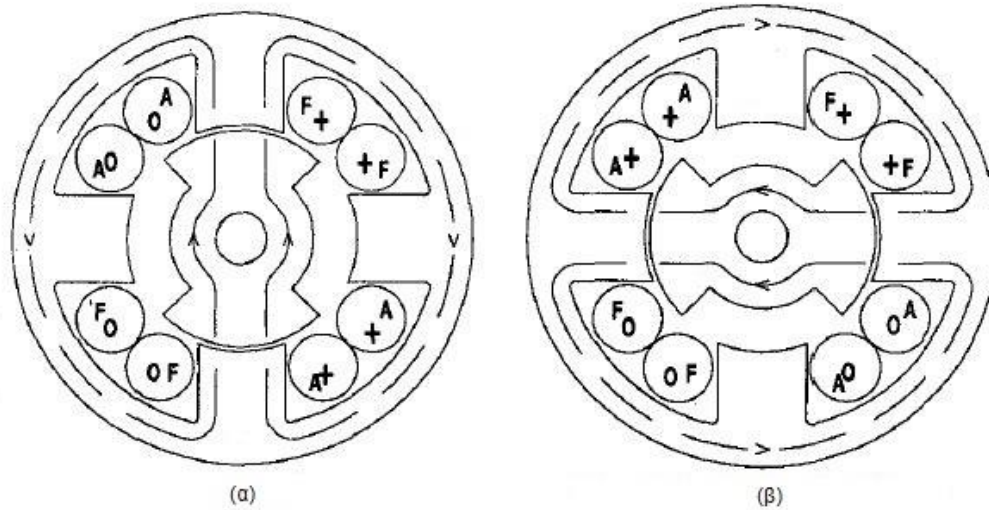
Ενώ σύγχρονη ιδέα σχεδίασης των μηχανών εναλλασσόμενης ροής συζητήθηκε παραπάνω και τα σχέδια που παρουσιάζονται στην εικόνα 9 χρησιμοποιούν διέγερση μόνιμου μαγνήτη, η διέγερση μπορεί να υλοποιηθεί με τη χρήση τύλιγμα διέγερσης, σε διαμορφώσεις παρόμοια από πολλές απόψεις. Ένα πλεονέκτημα της χρήσης τυλίγματος στη θέση των μόνιμων μαγνητών είναι ο ευκολότερος έλεγχος της ροής του πεδίου χρησιμοποιώντας το ρεύμα διέγερσης.



Εικόνα 16: Διάφορες τοπολογίες μηχανών εναλλασσόμενης ροής που έχουν προταθεί τα τελευταία χρόνια

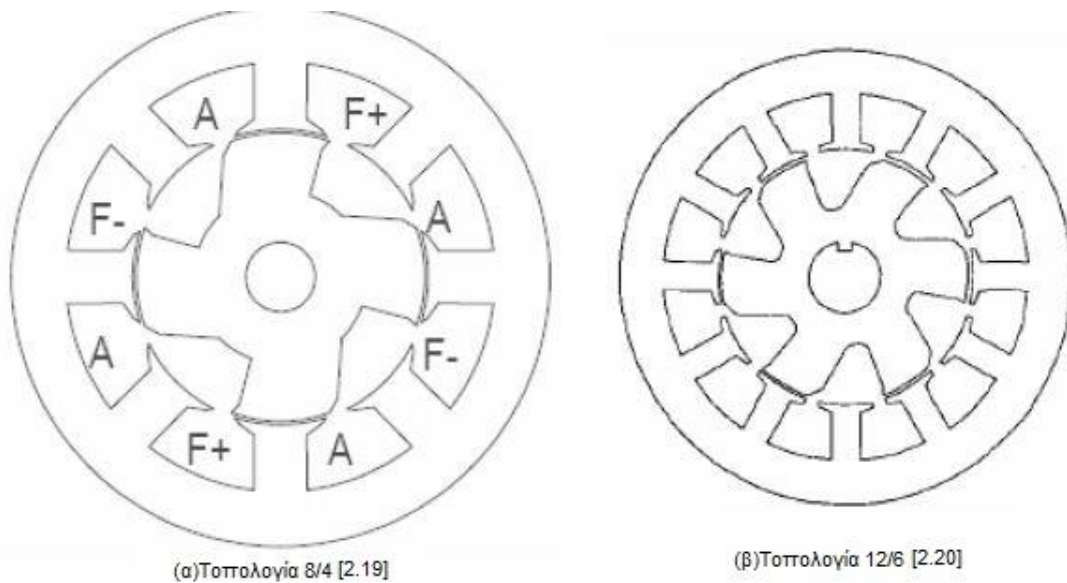
Σε μια βασική εξέλιξη που προέρχεται από την μορφή της βασικής ετεροπολικής τοπολογία της εικόνας 3, εάν τα τυλίγματα διέγερσης και οπλισμού αναπτυχθούν σε διαφορετικές αλλά εναλλασσόμενες αύλακες, όπως φαίνεται τύλιγμα του οπλισμού διαρρέεται από διπολική ροή καθώς κινείται ο δρομέας. Μια απεικόνιση βλέπουμε στην εικόνα 10. Για μονοφασικές εφαρμογές, αυτό προϋποθέτει ότι ο αριθμός των αυλάκων στάτη είναι διπλάσιος από τον αριθμό των πόλων του δρομέα

Οι Rollock και Wallace [2.18] φαίνεται να είναι οι πρώτοι που θα εφάρμοσαν ένα τύλιγμα πεδίου διέγερσης σε εφαρμογή τέτοιου είδους κινητήρα, και ανέπτυξαν έτσι μια μορφή του κινητήρα DC χωρίς ψύκτρες και μαγνήτες. Η εναλλακτική αυτή αποτελεί εξέλιξη της βασικής ιδέας του επαγωγικού εναλλάκτη με διπολική πεπλεγμένη ροή δεσμούς που παρουσιάζεται στην εικόνα 3 (ε)(ζ). Ο αριθμός των αυλάκων στάτη σκόπιμα επιλέγεται να είναι διπλάσιος από τον αριθμό των πόλων του δρομέα.



Εικόνα 17: Το σχέδιο της τοπολογίας που πρότειναν οι Pollock και Wallace

Αντί της βασικής $4/2$ τοπολογίας, στην πράξη, οι τοπολογίες κινητήρων μιας φάσης είναι $8/4$ και $12/6$, κάτι που απεικονίζεται στην εικόνα 10, και ο λόγος είναι ότι μειώνουν δραστικά το τμήμα των τυλιγμάτων που βρίσκονται εκτός του ενεργού μέρους των μηχανών (endwindings) μειώνοντας έτσι το κόστος αλλά και τις απώλειες χαλκού. Αυτές οι διαμορφώσεις έχουν προταθεί για βιομηχανικές εφαρμογές που απαιτούν υψηλές πυκνότητες ισχύος και μεγάλη αξιοπιστία σε πολλές ώρες χρήσης.

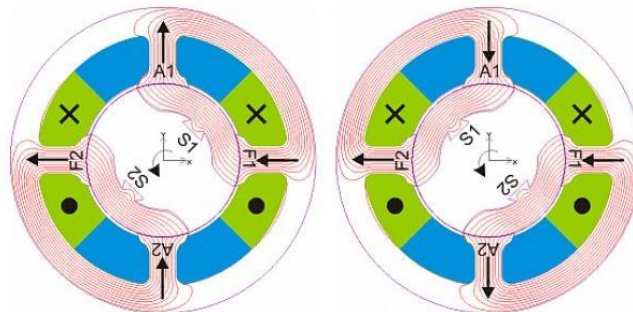


Εικόνα 18: Μονοφασικές τοπολογίες μηχανών εναλλασσόμενης ροής οι οποίες χρησιμοποιούν την ιδέα του δρομέα με κυρτά δόντια.

2.5 Μηχανές εναλλασσόμενης ροής με τμηματικό δρομέα

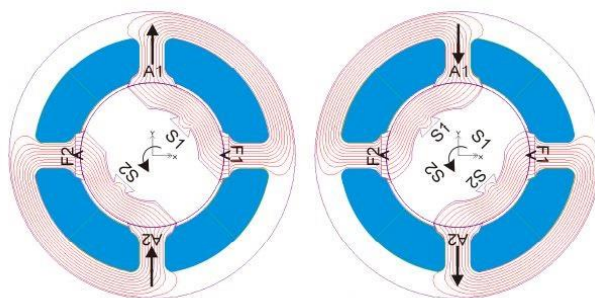
Οι τοπολογίες που αναλύθηκαν στις προηγούμενες ενότητες χρησιμοποιούσαν δρομείς με έκτυπους πόλους. Στο [2.21], ο Mecrow κ.ά. πρότεινε ένα σύστημα παραγωγής αμοιβαίας επαγωγής των πηνίων ενός μόνο δοντιού χρησιμοποιώντας ένα δρομέα που αποτελούταν από τμήματα μαγνητικής λαμαρίνας για μηχανές τύπου “switched reluctance”. Αυτή η διαμόρφωση διατηρεί την παραγωγή ιδιαίτερα υψηλότερων πυκνοτήτων ροπής αξιοποιώντας την αρχή της μεταβολής της αμοιβαίας επαγωγής [2.22],

Το βασικό σχέδιο που χρησιμοποιεί ένα τμηματικό δρομέα φαίνεται στην εικόνα 11 και αξιοποιεί τη βασική αρχή που απεικονίζεται στις εικόνες 2,3 (C) και 10. Για τις δύο θέσεις δρομέα που φαίνονται στο σχήμα, ενώ οι μαγνητικές ροές που προκαλούν οι διεγέρσεις F1 και F2 παραμένουν αμετάβλητες, υπάρχει μια αλλαγή της πολικότητας της ροής που διαρρέει οπλισμό στα A1 και A2, καθώς τα τμήματα του δρομέα S1,S2 περιστρέφονται.



Εικόνα 19: Τοπολογίες μηχανών εναλλασσόμενης ροής με τμηματικό δρομέα σε δύο διαφορετικές θέσεις ευθυγράμμισης του δρομέα. Με κόκκινο απεικονίζεται η μαγνητική ροή, με πράσινο το τύλιγμα διέγερσης και με μπλε το τύλιγμα τυμπάνου

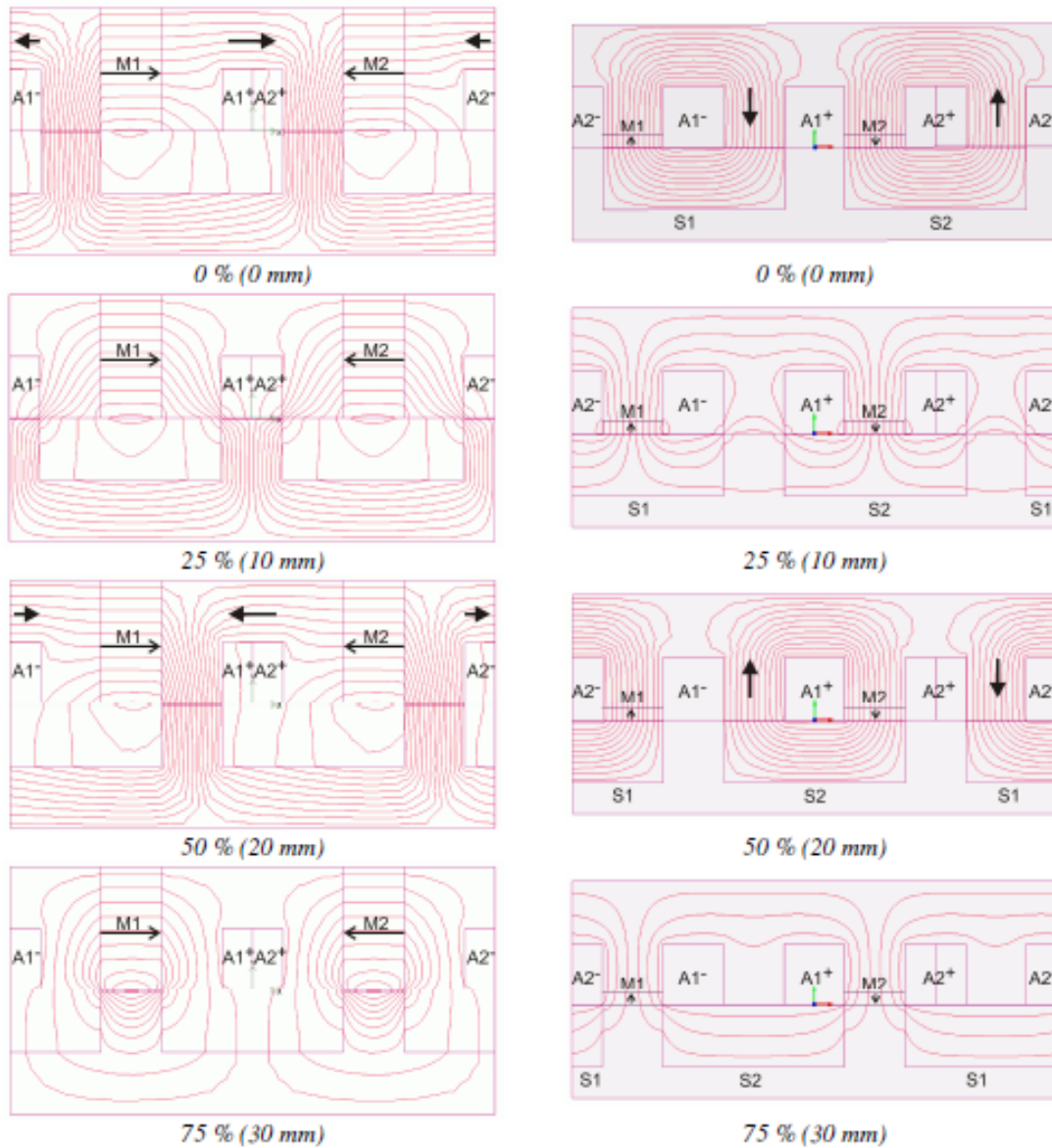
Είναι εύκολο να με βάση τη διάταξη να καταλάβει κανείς ότι το σύστημα μπορεί να υλοποιηθεί με μόνιμους μαγνήτες στη θέση των πηνίων διέγερσης αν οι μαγνήτες δρουν ακτινικά, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.14. Όσον αφορά τους συνδυασμούς πόλων στάτη δρομέα, στην πράξη, σημαντικά οφέλη στη μείωση των περιελίξεων εμφανίζονται στη διαμόρφωση 8/4 ή στην 12/6, εάν ζητείται μονοφασική τοπολογία.



Εικόνα 20: Τοπολογίες μηχανών εναλλασσόμενης ροής με τμηματικό δρομέα σε δύο διαφορετικές θέσεις ευθυγράμμισης του δρομέα. Με κόκκινο απεικονίζεται η μαγνητική ροή με και με μπλε το τύλιγμα τυμπάνου. Παρατηρούμε ότι η χρήση μόνιμου μαγνήτη απελευθερώνει σημαντικό χώρο που μπορεί να αξιοποιηθεί από το τύλιγμα τυμπάνου.

2.6 Ανάλυση της λειτουργίας με διέγερση μόνιμου μαγνήτη μέσω της έννοιας των θεμελιωδών κελιών

Σε αυτό το σημείο αναλύεται η λειτουργία των μηχανών εναλλασσόμενης ροής μέσω των θεμελιωδών κελιών τόσο στην περίπτωση του έκτυπου όσο και στην περίπτωση του τμηματικού δρομέα. Στα ακόλουθα σχήματα αναπαριστούνται και οι δύο περιπτώσεις.



Εικόνα 21: Χαρακτηριστικά στιγμιότυπα από την κίνηση του δρομέα για μηχανή με δρομέα έκτυπων πόλων (αριστερά) και μηχανή τμηματικού δρομέα (δεξιά)

Αναπαριστώνται 4 χαρακτηριστικά στιγμιότυπα από την κίνηση του δρομέα. Στην περίπτωση του δρομέα έκτυπων πόλων ο κάθε πόλος στάτη αποτελείται από τρία τμήματα σχεδόν ίσου μήκους. Τα δύο είναι από μαγνητική λαμαρίνα και το τρίτο είναι ο μαγνήτης. Θεωρώντας ότι ο κάθε πόλος του δρομέα εκτείνεται περίπου το ίδιο σε μήκος με αυτά τα τμήματα μπορούμε να χωρίσουμε 4 διακριτές θέσεις. Στη μια θέση ευθυγράμμισης του δρομέα και του δοντιού του στάτη, η ροή στο σώμα του στάτη πάνω από τις υποδοχές οπλισμού, όπως υποδεικνύεται από τα βέλη, έχουν πολικότητα προς την μία πλευρά και

στην επόμενη φορά που εμφανίζεται ευθυγράμμιση, η ροή έχει αντίθετη πολικότητα. Στις δύο ενδιάμεσες θέσεις, όταν δεν υπάρχει επικάλυψη μεταξύ του δρομέα και του στάτη δόντια, υπάρχει μηδενική ροή σύνδεση στο πηνίο τυμπάνου και μηδενική καθαρή ροή στον σώμα το στάτη πάνω από τις υποδοχές σπλισμού. Αυτή είναι μια βασική εικόνα της αρχής της διπολικής ροή μεταγωγής, που υλοποιείται από μια σκόπιμα σχεδιασμένη κατασκευή του δρομέα. Ενώ το τύλιγμα τυμπάνου εκκαθάρισης διαρρέεται από διπολική ροή, η διάταξη αυτή επιτυγχάνει διπολική ροή μόνο στα τμήματα του σώματος του στάτη, ενώ το υπόλοιπο σώμα του στάτη, μονοπολική, αν και μεταβλητή κατά μέτρο, ροή.

Στη δεύτερη περίπτωση, όπου το καθεστώς εναλλαγής ροής υλοποιείται τα τμήματα μαγνητικού υλικού του δρομέα, τα πηνία σπλισμού A1 και A2 διαρρέονται από τη ροή γύρω από τα δόντια. Η ακολουθία των διαγραμμάτων ροής καθώς αλλάζει η θέση των τμημάτων φαίνεται στο σχήμα 2.13(δεξιά). Είναι φανερό ότι ροή αλλάζει με τη θέση των τμημάτων του δρομέα τόσο κατά μέτρο όσο και κατά διεύθυνση. Στη πρώτη θέση ευθυγράμμισης, στην αρχική θέση, όταν κάθε ένα από τα τμήματα είναι ευθυγραμμισμένο με δύο γειτονικά δόντια στάτη, η ροή στο δόντι που συνδέει το ένα πηνίο σπλισμού είναι προς τα κάτω, και στην επόμενη θέση ευθυγράμμισης, όταν ο δρομέας έχει μετακινηθεί σε ένα δεύτερο κύκλο, η πολικότητα της ροής δοντιού αντιστρέφεται.

2.7 Σύγκριση τοπολογιών μηχανών εναλλασσόμενης ροής έκτυπου δρομέα και τμηματικού δρομέα

Κοινά χαρακτηριστικά

Αξίζει να επαναλάβουμε ότι και οι δύο τοπολογίες παράγουν διπολική πεπλεγμένη ροή στο τύλιγμα τυμπάνου αξιοποιώντας ένα παρόμοιο τρόπο μεταβολής της μαγνητικής αντίστασης καθώς μεταβάλλεται η θέση του δρομέα. Τόσο η διέγερση όσο και το κύκλωμα ισχύος βρίσκονται στο στάτη, κάνοντας εφικτό να έχει ο δρομέας πολύ απλή δομή, καθώς απαλλάσσεται από τυλίγματα και μαγνήτες. Οι μαγνήτες στο στάτη παρέχουν εύκολη υλοποίηση σε μια ποικιλία μεθόδων ψύξη καθιστώντας δυνατή τη επίτευξη υψηλών φορτίσεων. Η απλότητα του δρομέα διευκολύνει την κατασκευή και δίνει ευρωστία η οποία με τη σειρά της επιτρέπει την επίτευξη αυξημένων ταχυτήτων. Ως κοινό μειονέκτημα σε αμφότερα τα σχήματα μπορούμε να εντοπίσουμε την ανάγκη να τοποθετηθεί τόσο η διέγερση όσο και το τύλιγμα ισχύος στο στάτη με αποτέλεσμα να απαιτείται προσοχή στην ακριβή διαστασιολόγηση τους για να μην επηρεαστεί αρνητικά η επίδοση της μηχανής.

Διαφορές

Υπάρχει ένας αριθμός από σχετικές διαφορές μεταξύ των τοπολογιών με έκτυπους πόλους και τμηματικού δρομέα, τόσο σε δομή και λειτουργία, και συνοψίζονται στον πίνακα 3.3.

Η τοπολογία τμηματικού δρομέα δυνητικά μπορεί να πραγματοποιηθεί μικρότερες πιο κοντές τερματικές περιελίξεις. Αυτό μπορεί να αναχθεί σε εξοικονόμηση τόσο στο επίπεδο κόστους υλικών αλλά και μείωση των απωλειών χαλκού. Επίσης στην περίπτωση του τμηματικού δρομέα χρησιμοποιείται μικρότερη ποσότητα μαγνήτη επομένως μειώνεται και το συνολικό κόστος της μηχανής.

Δρομέας Έκτυπων Πόλων	Τμηματικός Δρομέας
Αμφιπολική ροή στο σώμα του στάτη	Αμφιπολική ροή στο δόντι του στάτη
Μονοπολική Ροή στα δόντια στάτη	Μονοπολική ροή στο σώμα του στάτη
Οι μαγνήτες καλύπτουν το σύνολο του ακτινικού μήκους του στάτη	Οι μαγνήτες βρίσκονται πάνω στα δόντια
Οι μαγνήτες δρουν στην περιφερειακή διεύθυνση	Οι μαγνήτες δρουν στην ακτινική διεύθυνση
Η χρήση του μόνιμου μαγνήτη μειώνει το διαθέσιμο χώρο για το τύλιγμα τυμπάνου	Η χρήση του μόνιμου μαγνήτη δεν επηρεάζει το διαθέσιμο χώρο για το τύλιγμα τυμπάνου
Μακριές περιελίξεις	Σχετικά πιο κοντές περιελίξεις
Απαίτηση για χρήση σημαντικής ποσότητας μαγνήτη	Σχετικά μικρή απαιτούμενη ποσότητα μαγνήτη
Ο μαγνήτης προστατεύεται από τις αρμονικές του πεδίου όντας εντός του μαγνητικού υλικού	Ο μαγνήτης είναι εκτεθειμένος στις αρμονικές του πεδίου

2.8 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- [1] Walker, J.H., 'The Theory of the Inductor Alternator,' Journal of IEE, vol. 89,1942, pp. 227-241
- [2] Rauch, S.E. and Johnson, L.J., 'Design Principles of Flux-Switch Alternators,' Transactions of AIEE, Power Apparatus and Systems, vol. 74, no. 3, part III, January 1955, pp. 1261-1268.
- [3] Pollock, C., and Wallace, M., 'The Flux Switching Motor, a DC Motor Without Magnets or Brushes,' IEEE 34th Industry Applications Society Annual Meeting IAS'99, Pheonix, Arizona, USA, 3-7 October 1999, vol.3, pp. 1980-1987.
- [4] Mecrow, B.C., Bedford, T.J., Bennet, J.W., and Celik, T., 'The Use of Segmental Rotors for 2-Phase Flux-Switching Motors,' 17th International Conference on Electrical Machines, ICEM'06, Chania, Greece, 2-5 September 2006, paper 608.
- [5] Cheng, Y., Pollock, C. and Pollock, H., 'A Permanent Magnet Flux Switching Motor for Low Energy Axial Fans,' IEEE 40th Industry Applications Society Annual Meeting, IAS'05, Hong Kong, China, 2-6 October 2005, vol.3, pp. 2168-2175.
- [6] Hoang, E. Ben-Ahmed, A.H., and Lucidarme, J., 'Switching Flux Permanent Magnet Poly-Phased Synchronous Machines,' 7th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE'97, Trondheim, Norway, September, 1997, vol.3, pp.903-908.
- [7] Ackim Zulu, «Flux switching machines using segmental rotors», PHD Thesis, Newcastle University, 2010
- [8] Walker, J.H., 'The Theory of the Inductor Alternator,' Journal of IEE, vol. 89, 1942, pp. 227-241.
- [9] Dasgupta, A.K., 'Analytical Method to Find the Best Number of Stator and Rotor Teeth of Inductor Alternator for 3-Phase Sinusoidal Voltage Generation,'Transactions of AIEE, Power Apparatus and Systems, vol. 79, no. 50, October 1960, pp. 674-679
- [10] Deodhar, R.P., Andersson, S., Boldea, I., and Miller, T. J.E., 'The Flux Reversal Machine: A New Brushless Doubly-Salient Permanent-Magnet Machine,' IEEE Transactions on Industry Application, vol. 33, no. 4, July/August 1997, pp. 925-934
- [11] Wang, C. Nasar, S.A., and Boldea, I., 'Three-Phase Flux Reversal Machine (FRM),' IEE Proceedings on Electrical Power Applications, vol. 146, no. 2, March 1999, pp. 139-146.
- [12] Wang, C. X., Boldea, I., and Nasar, S. A., 'Characterization of Three Phase Flux Reversal Machine as an Automotive Generator,' IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 16, no. 1, March 2001, pp.74-80.
- [13] Pang Y., Zhu, Z.Q., Howe, D., Iwasaki, S., Deodhar, R., and Pride, A., 'Eddy Current Loss in the Frame of a Flux-Switching Permanent Magnet Machine,' IEEE Transactions on Magnetics, vol. 42, no.10, 2006, pp. 3413-3415.

[14] Cheng, Y., Pollock, C. and Pollock, H., 'A Permanent Magnet Flux Switching Motor for Low Energy Axial Fans,' IEEE 40th Industry Applications Society

Annual Meeting, IAS'05, Hong Kong, China, 2-6 October 2005, vol.3, pp. 2168- 2175.

[15] Chen, J.T, Zhu, Z.Q., and Howe, D., 'Stator and Rotor Pole Combinations for Multi-Tooth Flux-Switching Permanent-Magnet Brushless AC Machines,' IEEE Transactions on Magnetics, vol. 44, no.12, 2008, pp. 4659-4667.

[16] Pollock, C., Pollock, H., and Brackley, M., 'Electronically Controlled Flux Switching Motors: A Comparison with an Induction Motor Driving an Axial Fan,' IEEE 29th Industry Electronics Society Annual Conference, IECON'03, Roanoke, Virginia, USA, 2-6 November 2003, vol.3, pp. 2465-2470.

[18] Pollock, C., and Wallace, M., 'The Flux Switching Motor, a DC Motor Without Magnets or Brushes,' IEEE 34th Industry Applications Society Annual Meeting, IAS'99, Pheonix, Arizona, USA, 3-7 October 1999, vol.3, pp. 1980-1987.

[19] Hoang, E., Lecrivain, M., and Gabsi, M., 'A New Structure of a Switching Flux Synchronous Poly-Phased Machine with Hybrid Excitation,' 12th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE'07, Aalborg, Denmark, 2-5 September 2007, pp. 1-8.

[20] Hoang, E., Hlioui, S., Lecrivain, M., and Gabsi, M., 'Experimental Comparison of Lamination Material Case of Switching Flux Synchronous Machine with Hybrid Excitation,' 13th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE'09, Barcelona, Spain, 8-10 September 2009, pp. 1-7.

[21] Mecrow, B.C., El-Kharashi, E.A., Finch, J.W., and Jack, A.G., 'Segmental Rotor Switched Reluctance Motors with Single-Tooth Windings,' IEE Proceedings on Electric Power Applications, vol. 150, no. 5, September 2003, pp. 591-599.

[22] Mecrow, B.C., 'New Winding Configurations for Doubly Salient Reluctance Machines,' IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, no. 6, November/December 1996, pp. 1348-1356.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξηγηθεί με λεπτομέρεια πως σχεδιάζεται μια μηχανή μόνιμων μαγνητών. Η μεθοδολογία που αναλύεται παρακάτω μπορεί με μικρές αλλαγές να εφαρμοστεί σχεδόν στο σύνολο των τύπων ηλεκτρικών μηχανών. Αρχικά παρουσιάζονται οι θεμελιώδεις σχέσεις προκαταρκτικής σχεδίασης που χρησιμοποιεί παραδοσιακές αναλυτικές σχέσεις για τον προσδιορισμό των βασικών διαστάσεων του κινητήρα και τις βασικές ηλεκτρικές και μαγνητικές φορτίσεις. Αναλύεται με λεπτομέρεια η διαδικασία επιλογής διαμόρφωσης συγκεντρωμένων τυλιγμάτων κλασματικής αύλακας και προσδιορίζονται τα κύρια χαρακτηριστικά της διέγερσης.

Έπειτα εξηγείται η χρήση της μέθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και περιγράφεται η διαδικασία επίλυσης ενός δυναμικού προβλήματος μέσω μιας αλληλουχίας μαγνητοστατικών αναλύσεων κατά τις οποίες μοντελοποιείται τόσο η σχετική κίνηση στάτη δρομέα όσο και η ημιτονοειδής μεταβολή των ρευμάτων τροφοδοσίας.

3.2 Επιλογή τοπολογίας κινητήρα

Η διαμόρφωση του δρομέα είναι το ζήτημα που εξετάζεται κατά την επιλογή της τοπολογίας κινητήρα, δηλαδή η θέση και η σχετική γεωμετρία των μαγνητών στο δρομέα, αλλά και η σχετική θέση στάτη και δρομέα της μηχανής. Κάθε γεωμετρία παρουσιάζει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τα οποία δεν είναι πάντοτε εύκολο να αποτιμηθούν ποσοτικά. Γι' αυτό και ρόλος του μηχανικού είναι να αξιολογήσει ποιοτικά πρώτα τις διαθέσιμες επιλογές πριν προχωρήσει στην προκαταρκτική σχεδίαση της μηχανής[3.17].

3.3 Προκαταρκτική σχεδίαση

Έχοντας τις προδιαγραφές του συστήματος που θα χρησιμοποιηθεί ο κινητήρας μπορούμε να προχωρήσουμε στον προσδιορισμό της γεωμετρίας του διακένου, χωρίς τη λεπτομερή διαμόρφωση του κινητήρα. Η προκαταρκτική σχεδίαση περιλαμβάνει τα εξής βήματα[3.3]:

- Προσδιορίζεται η επιφάνεια διακένου, ώστε η μηχανή να αναπτύσσει την απαραίτητη ηλεκτρομαγνητική ροπή, τόσο σε μόνιμη όσο και σε μεταβατική κατάσταση, όπως αυτή έχει προσδιορίζεται από τις προδιαγραφές.
- Διαμορφώνεται ο στάτης και ο δρομέας. Συγκεκριμένα επιλέγεται ο τύπος και η γεωμετρία του στάτη και του δρομέα, ώστε το μαγνητικό πεδίο στο διάκενο να είναι το επιθυμητό.
- Έλεγχεται η ειδική ηλεκτρική και μαγνητική φόρτιση.
- Προσδιορίζεται η επίδοση και η απόδοση.

Διαστασιολόγηση διακένου

“Με την έννοια διαστασιολόγηση του διακένου του κινητήρα αναφερόμαστε στις προκαταρκτικές διαστάσεις του κυλίνδρου που ορίζει το μέσον του διακένου, ανάμεσα σε στάτη και δρομέα, το οποίο ορίζεται από τις μεταβλητές D_g και L που αντιστοιχούν στη διάμετρο του δρομέα αυξημένη κατά το κενό μεταξύ δρομέα-στάτη και στο ενεργό μήκος της μηχανής. Αυτή η διαστασιολόγηση γίνεται με βάση ορισμένες τυπικές τιμές βασικών μαγνητικών, ηλεκτρικών και θερμικών μεγεθών. Παρακάτω παρουσιάζονται αυτά τα μεγέθη και οι βασικές σχέσεις υπολογισμού τους στην περίπτωση του τριφασικού κινητήρα”[2.17].

Πάχος διακένου

Το πάχος του διακένου είναι μια ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος. Επηρεάζει έντονα σχεδόν το σύνολο του λειτουργικών χαρακτηριστικών της. Γενικότερα ισχύει ότι όσο μικρότερο είναι τόσο το καλύτερο, όμως τα ελάχιστα όρια υπαγορεύονται από τις ανοχές των εδράσεων ή τις κατασκευαστικές ανοχές της μηχανής. Ένα σχετικά μεγάλο διάκενο έχει ως αποτέλεσμα να μην έχει καλή απόδοση η μηχανή όμως να εμφανίζει και χαμηλό αρμονικό περιεχόμενο. Στη βιβλιογραφία μπορεί να βρει κανείς ένα μεγάλο πλήθος εμπειρικών τύπων μέσω των οποίων υπολογίζεται άμεσα το πάχος διακένου και συνήθως οι τιμές του κυμαίνονται από 0.5 mm ως 1 mm για μηχανές μονίμων μαγνητών μικρής ισχύος[2.17].

Ειδική μαγνητική φόρτιση

Η ειδική μαγνητική φόρτιση, συνδέει τον αριθμό πόλων P με τη μαγνητική ροή ανά πόλο Φ και δίνεται ως εξής:

$$B_{av} = \frac{P\Phi}{\pi LD_g} \quad (3.1)$$

όπου D_g η διάμετρος του διακένου και L το αξονικό μήκος του ενεργού μέρους της μηχανής.

Το μέγεθος αυτό λαμβάνει συνήθως τιμές οι οποίες κυμαίνονται από 0.4T ως 0.7T ενώ σε μηχανές οι οποίες πρέπει να εμφανίζουν μεγάλη πυκνότητα ροπής μπορεί να υπερβεί και το 1T. Το άνω όριο συνήθως προσδιορίζεται από το φαινόμενο του κορεσμού του σιδηρομαγνητικού υλικού στα δόντια του στάτη. Γενικότερα, όσο πιο υψηλή είναι η μαγνητική φόρτιση τόσο αυξημένη δυνατότητα παραγωγής ροπής και ισχύος παρουσιάζει η μηχανή. Βέβαια, όσο αυξάνεται η μαγνητική φόρτιση, τόσο αυξάνονται και οι απώλειες πυρήνα.

Ειδική ηλεκτρική φόρτιση

Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση, ac , προσδιορίζεται από την ενεργό τιμή των αμπερελιγμάτων ανά μέτρο περιφέρειας του διακένου, και δίνεται ως εξής:

$$ac = \frac{3N_i P I_{rms}}{\pi D_g} \quad (3.2)$$

Τυπικές τιμές ηλεκτρικής φόρτισης σύγχρονων μηχανών είναι από 15000 AE/m ως 45000AE/m. Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση είναι το μέγεθος που μαζί με την ειδική μαγνητική

φόρτιση θα ορίσει την ροπή που μπορεί να αναπτύξει μια μηχανή. Επίσης, η ηλεκτρική φόρτιση επηρεάζει τις απώλειες χαλκού της μηχανής.

Τα δύο παραπάνω μεγέθη συνδέονται με τη λεγόμενη σχέση εξόδου της ηλεκτρικής μηχανής, η οποία δίνει μια εκτίμηση της ροπής ή της ισχύος εξόδου. Η ενεργός τιμή της επαγόμενης τάσης, E , δίνεται από τη σχέση:

$$E_{rms} = 4,44 \cdot f \cdot k_w \cdot N_i \cdot \Phi \quad (3.3)$$

όπου k_w ο συντελεστής τυλίγματος, f η ηλεκτρική συχνότητα, N_i ο συνολικός αριθμός ελιγμάτων ανά φάση και Φ η θεμελιώδης μαγνητική ροή ανά πόλο.

Η φαινόμενη ισχύς της μηχανής δίνεται από τη σχέση:

$$S = 3 \cdot E_{rms} \cdot I_{rms} \quad (3.4)$$

Η ηλεκτρική συχνότητα f συνδέεται με τη μηχανική ταχύτητα περιστροφής, n_s , με τη σχέση:

$$n_s = \frac{120f}{P} \quad (3.5)$$

Ο συνδυασμός των παραπάνω σχέσεων δίνει την εξίσωση εξόδου της ηλεκτρικής σύγχρονης μηχανής:

$$S = 1,1 \cdot k_w \cdot \pi^2 \cdot B_{av} \cdot ac \cdot D_g^2 \cdot L \cdot n_s \quad (3.6)$$

Όπως προκύπτει λοιπόν από την (3.6), η ισχύς εξόδου της μηχανής είναι ανάλογη του τετραγώνου της διαμέτρου του διακένου και ανάλογη του αξονικού μήκους του ενεργού μέρους του πυρήνα. Επομένως, όταν σχεδιάζουμε μια μηχανή πρέπει να προσδιορίσουμε ποιος είναι ο πιο συμφέρων συνδυασμός ειδικής ηλεκτρικής και μαγνητικής φόρτισης, διαστάσεων διακένου και ταχύτητας περιστροφής ώστε να ληφθεί η επιθυμητή ισχύς στην έξοδο χωρίς να θυσιαστούν άλλα χαρακτηριστικά της μηχανής[2.17].

Επιφάνεια διακένου

Η ροπή διακένου T_e υπολογίζεται βάσει της μέσης εφαπτομενικής πίεσης των μαγνητικών δυνάμεων στο διάκενο και της επιφάνειας διακένου A , μέσω των παρακάτω σχέσεων:

$$F_t = P_t \cdot A = P_t \cdot \pi \cdot L \cdot D_g \quad (3.7)$$

$$T_{\max} = \frac{D_g \cdot F_t}{2} \quad (3.8)$$

$$T_{\max} = \frac{\pi}{2} \cdot L \cdot D_g^2 \cdot P_t \quad (3.9)$$

Η μέση μαγνητική δύναμη στο διάκενο, F_t , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F_t = L \int_C B_n \cdot B_t dl \quad (3.10)$$

Η μέση πίεση της επαπτομενικής δύναμης στο διάκενο ορίζεται από τον τύπο:

$$P_t = \frac{F_t}{A} = \frac{1}{\pi \cdot D_g \cdot \mu_0} \oint_C B_n \cdot B_t dl \quad (3.11)$$

Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων και ειδικά στις περιπτώσεις που απαιτείται υψηλή απόδοση επιλέγεται μαγνητική ροή ίση με 0,5 T. Θεωρώντας ότι η γωνία μεταξύ της ακτινικής και της επαπτομενικής συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου είναι $\theta=45^\circ$ προκύπτει:

$$B_n = B_t = B_{av} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (3.12)$$

Άρα η επαπτομενική πίεση προκύπτει ως εξής:

$$P_t = \frac{B_n B_t \pi D_g}{\pi D_g \mu_0} = \frac{B_{av}^2 \cdot \cos 2\theta}{2\mu_0} \quad (3.13)$$

Άρα προκύπτει:

$$D_g^2 \cdot L = \frac{2T_{\max}}{\pi P_t} \quad (3.14)$$

Αναλογία διαστάσεων D_g και L

Η διαστασιολόγηση του διακένου μιας ηλεκτρικής μηχανής εμπλέκει θέματα επίδοσης, απόδοσης και μηχανικής αντοχής[3.3]. Αναλυτικότερα, αν αυξηθεί η διάμετρος του διακένου, η αύξηση στην ισχύ εξόδου είναι ιδιαίτερα έντονη λόγω της τετραγωνικής εξάρτησης σε σχέση με την αντίστοιχη αύξηση που προκαλείται αν αυξήσουμε το μήκος. Όμως κατά τη σχεδιάσή μας πρέπει να έχουμε στο νου τόσο τη ροπή που πρέπει να αναπτύσει η μηχανή όσο και την ταχύτητα στην οποία πρέπει να την αναπτύσει. Για υψηλές απαιτήσεις ροπής, συνίσταται η επιλογή μεγάλης διαμέτρου διακένου, καθώς έτσι επιτυγχάνεται υψηλότερη παραγόμενη ροπή, λόγω της αύξησης της απόστασης του διακένου από τον άξονα. Αντιθέτως, η απόδοση της μηχανής δεν αυξάνεται κατ' ανάγκη όταν η αναλογία L/D_g είναι μειωμένη. Συγκεκριμένα όταν η διάμετρος διακένου είναι μεγάλη, αν συγκριθεί με το μήκος της μηχανής, αυξάνεται το τμήμα του τυλίγματος που βρίσκεται έξω από την ενεργή περιοχή του πυρήνα και κατά συνέπεια οι θερμικές απώλειες καθώς το τμήμα αυτό δεν συνεισφέρει στην παραγωγή ροπής. Επίσης, μια μηχανή με πολύ επίμηκες διάκενο έχει μεγάλη μάζα πυρήνα και αναμένεται να εμφανίζει αυξημένες απώλειες πυρήνα, επομένως δεν επιτυγχάνει τη βέλτιστη απόδοση.

Ακόμα, όταν το αξονικό μήκος είναι μικρό εμφανίζονται μεγάλες τιμές ροής σκέδασης στο διάκενο. Αντίθετα, για εφαρμογές που έχουν ως προαπαιτούμενο την λειτουργία σε υψηλή ταχύτητα, επιλέγεται συνήθως μεγάλο αξονικό μήκος και όχι αυξημένη διάμετρος, για να φτάσει η ισχύς τα επιθυμητά επίπεδα. Με αυτό τον τρόπο διατηρείται η επιφανειακή ταχύτητα δρομέα σε λογικές τιμές και έτσι αποφεύγονται υψηλές τιμές φυγόκεντρων δυνάμεων και τοπικών απωλειών σιδήρου. Παράλληλα, οι δρομείς μεγάλου ενεργού μήκους μπορούν να εμφανίζουν έντονη ταλαντωτική συμπεριφορά, λόγω μηχανικών μεταβατικών, με την αύξηση της ταχύτητας. Η ταχύτητα

περιστροφής του δρομέα επηρεάζει έντονα το θέση του διακένου αλλά και τις μηχανικές αντοχές του δρομέα . Σε χαμηλές ταχύτητες περιστροφής επιλέγεται μικρός λόγος L/D_g . Σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής, ο δρομέας περιορίζεται σε μικρότερες σχετικά ακτίνες λόγω της οριακής τάσης διακένου και πλέον η επιθυμητή ισχύς λαμβάνεται αυξάνοντας το αξονικό μήκος της μηχανής. Ακόμα και τότε, υπάρχει μηχανικό όριο που περιορίζει το λόγο L/D_g , το οποίο συνίσταται στην ακαμψία του σώματος του δρομέα και την διατήρηση του διακένου.

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν ενδεικτικές αναλογίες που πρέπει να έχει μια μηχανή ώστε να εμφανίζει από υψηλή επίδοση, απόδοση ή ή και τα δύο. Συνήθως γίνεται λόγος για το λόγο του αξονικού μήκους της μηχανής L και του μήκους ενός πόλου τ . Το μήκος πόλου δίνεται ως εξής:

$$\tau = \frac{\pi D}{P} \quad (3.15)$$

Στον πίνακα 3.1 παρατίθενται οι περιοχές τιμών του λόγου, , η κάθε μια από τις οποίες παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά.

Πίνακας 3.1. Περιοχές τιμών του λόγου L/τ .

Λόγος L/τ	Χαρακτηριστικό ηλεκτρικής μηχανής
1.0	Ισορροπημένη σχεδίαση
1.0 - 1.5	Υψηλός συντελεστής ισχύος
1.5	Υψηλή απόδοση
1.5 – 2	Ελάχιστο κόστος

Προσδιορισμός κύριων χαρακτηριστικών στάτη

«Η συχνότητα λειτουργίας αποτελεί πάρα πολύ σημαντικό λειτουργικό χαρακτηριστικό καθώς καθορίζει με άμεσο τρόπο τη διακύμανση των απωλειών πυρήνα αλλά και τις αυτεπαγωγές του κινητήρα. Συγκεκριμένα αυξάνοντας τη συχνότητα παρατηρούμε αύξηση των απωλειών πυρήνα με μια σχέση που προσεγγίζει την τετραγωνική εξάρτηση ενώ αυξάνονται με ανάλογο τρόπο οι αυτεπαγωγές του κινητήρα. Παράλληλα, για την ίδια ονομαστική ροπή, μηχανές με περισσότερους πόλους έχουν ελαφρύτερο μαγνητικό κύκλωμα, καθώς η διαδρομή της μαγνητικής ροής από τον έναν πόλο στον άλλο είναι αντιστρόφως ανάλογη του αριθμού των πόλων»[2.17]. Σε μια πολυπολική μηχανή η διαδρομή που πρέπει να διανύσει η μαγνητική ροή είναι σαφώς πιο σύντομη, και έτσι μπορούμε να μειώσουμε σε μέγεθος τα δόντια, το σώμα του στάτη και το σώμα του δρομέα, χωρίς να επηρεαστούν τα επίπεδα κορεσμού του σιδήρου .Ο λόγος πόλων/ ηλεκτρικής συχνότητας προκύπτει ως εξής:

$$\frac{P}{f} = \frac{4\pi}{\omega_m} \quad (3.16)$$

Είναι λοιπόν εμφανές ότι για χαμηλή ταχύτητα περιστροφής ο αριθμός των πόλων μπορεί να αυξηθεί, αν επιλεγεί μικρή συχνότητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι απώλειες πυρήνα γι' αυτές τις εφαρμογές είναι σχετικά χαμηλές, σε σχέση με τις απώλειες χαλκού.

Επίσης, αν χρησιμοποιηθούν συγκεντρωμένα τυλιγμάτα, και αυξήσουμε τον αριθμό των πόλων αναμένεται να μειωθούν οι απώλειες χαλκού. Τούτο διότι καθώς αυξάνοντας τους πόλους μειώνεται το πάχος του δοντιού και κατά συνέπεια ελαττώνεται το μήκος των αγωγών εντός και εκτός ενεργού κυκλώματος. Μειώνοντας το μήκος επιφέρουμε μείωση της αντίστασης των αγωγών και έτσι περιορίζονται οι ωμικές απώλειες των τυλιγμάτων. Έτσι αν η τιμή της τάσης είναι προσδιορισμένη, αναμένονται μικρότερες απώλειες χαλκού για μεγαλύτερο αριθμό πόλων.

Με βάση τα παραπάνω, η μέση ροή ανά πόλο υπολογίζεται ως εξής:

$$\Phi = \frac{B_{av} \pi L D_g}{P} \quad (3.17)$$

Άρα ο αριθμός ελιγμάτων των πηνίων κάθε φάσης προκύπτει:

$$N_i = \frac{E_{rms}}{4,44 \cdot f \cdot \frac{P}{2} \cdot \Phi} \quad (3.18)$$

Το επίπεδο τάσης των μπαταριών είναι εκείνο που θα επιβάλλει την επιθυμητή τιμή τάσης. Επίσης η τιμή της τάσης καθορίζεται από τη δυνατότητα οδήγησης του αντιστροφέα και την προσπάθεια μείωσης των απωλειών. Όσο υψηλότερο είναι το επίπεδο τάσης τόσο πιο αποδοτικός θα είναι ο κινητήρας. Έστω λοιπόν ότι η διαθέσιμη τάση μπαταριών είναι V_{DC} . Θεωρώντας για την οδήγηση της μηχανής αντιστροφέα με τεχνική διαμόρφωσης SPWM και συντελεστή διαμόρφωσης m_a , το πλάτος της θεμελιώδης συνιστώσας της φασικής τάσης εξόδου προκύπτει:

$$V_{pp-ph} = \frac{m_a \cdot V_{DC}}{2} \quad (3.19)$$

Και επομένως η μέγιστη *RMS* τιμή της ΗΕΔ της μηχανής είναι:

$$E_{rms} = \frac{V_{pp-ph}}{\sqrt{2}} \quad (3.20)$$

Η τιμή της αναπτυσσόμενης αντι-ΗΕΔ ενός κινητήρα καθορίζει τη δυνατότητα οδήγησης του από τον αντιστροφέα ισχύος με βάση τη διαθέσιμη DC τάση των μπαταριών. Για να μπορεί ο κινητήρας να οδηγηθεί από το υφιστάμενο σύστημα κίνησης, θέτουμε ως επιθυμητή τιμή της αντι-ΗΕΔ το 85% με 90% της μέγιστης εναλλασσόμενης τάσης που μπορεί να παράγει ο αντιστροφέας:

$$E_{rms} = 0.85 \div 0.90 \cdot \frac{V_{pp-ph}}{\sqrt{2}} \quad (3.21)$$

Και η ενεργός τιμή του ρεύματος προκύπτει:

$$I_{rms} = \frac{P_{el}}{3V_{rms} \cos \varphi} \quad (3.22)$$

Διαμόρφωση τυλιγμάτων

«Τα τυλίγματα μίας ηλεκτρικής μηχανής χαρακτηρίζονται ως προς τις τερματικές συνδέσεις των επιμέρους πηνίων, τον τρόπο με τον οποίο κατανέμονται στα αυλάκια και το βήμα συστάδας. Έτσι, μπορεί να είναι βροχοειδή ή κυματοειδή (τα 1^α χρησιμοποιούνται σε μηχανές με λίγους πόλους ενώ τα 2^α σε πολυπολικές μηχανές χαμηλών ταχυτήτων), διανεμημένα (με 1 ή περισσότερα αυλάκια ανά πόλο και φάση), πλήρους ή κλασματικού βήματος. Οι συνηθέστερες περιπτώσεις τυλιγμάτων είναι οι εξής:

- Επικαλυπτόμενα, διανεμημένα με 1 ή 2 αυλάκια ανά πόλο και φάση.
- Μη επικαλυπτόμενα, συγκεντρωμένα, μονής ή διπλής στρώσης.

Τα διανεμημένα επικαλυπτόμενα τυλίγματα παράγουν γενικά πιο ημιτονοειδή ΜΕΔ στο διάκενο, γι' αυτό χρησιμοποιούνται εκτεταμένα στις μηχανές μόνιμου μαγνήτη χωρίς συλλέκτη (Brushless AC PM machines). Μια νέα διαμόρφωση τυλιγμάτων, που χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο, είναι τα συγκεντρωμένα τυλίγματα κλασματικού βήματος (Fractional Slot Concentrated Windings). Ο λόγος διάδοσης έγκειται στην υψηλή πυκνότητα ισχύος, την απόδοση και τα κοντά άκρα τυλιγμάτων»[2.17].Στον παρακάτω πίνακα, βλέπουμε τα κύρια χαρακτηριστικά των διάφορων τύπων τυλιγμάτων:

Πίνακας 3Error! No text of specified style in document..2. **Κύρια χαρακτηριστικά των συγκεντρωμένων και των διανεμημένων τυλιγμάτων.**

Χαρακτηριστικό	Διανεμημένα τυλίγματα	Συγκεντρωμένα τυλίγματα
Συντελεστής πληρότητας χαλκού στις αύλακες	35% - 45%	50% - 66%
Κατασκευή στάτη	Συνεχή ελάσματα	Συνεχή ελάσματα ή τμηματικές κατασκευές
Τυλίγματα τερματικών συνδέσεων	Μακρά επικαλυπτόμενα	Κοντά μη επικαλυπτόμενα
Αρμονικό περιεχόμενο παραγόμενης ροπής	Θεμελιώδης μόνο	Στις περισσότερες περιπτώσεις υπάρχουν αρμονικές υψηλότερης τάξης

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των συγκεντρωμένων τυλιγμάτων είναι τα εξής:

- Κατασκευάζονται εύκολα.
- Υψηλός συντελεστής πληρότητας χαλκού, άρα μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος.
- Πιο κοντά άκρα τυλιγμάτων, με αποτέλεσμα χαμηλότερες απώλειες χαλκού.
- Είναι πιο ανεκτικά στα σφάλματα και συμπεριφέρονται καλύτερα σε μεταβατικές καταστάσεις, εφόσον οι αλληλεπαγωγές μεταξύ των φάσεων είναι μειωμένες.
- Χαμηλή ροπή ευθυγράμμισης, δεδομένου ότι περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό κύκλων ευθυγράμμισης ανά μηχανική περιστροφή.

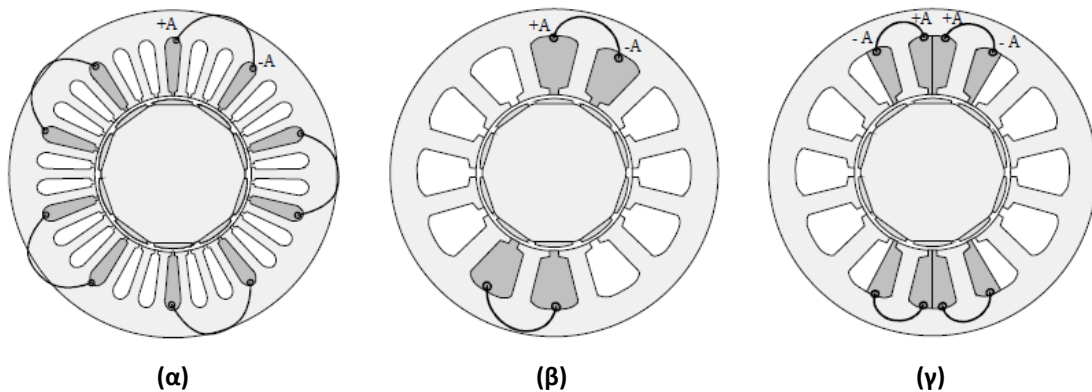
Αν σε μια μηχανή χρησιμοποιήσουμε συγκεντρωμένα τυλίγματα πετυχαίνουμε συνήθως μεγαλύτερη πυκνότητα πηνίων χαλκού στις αύλακες και επομένως πιο μεγάλη πυκνότητα ισχύος. Επίσης τα άκρα τυλιγμάτων είναι πιο κοντά με συνέπεια

την περαιτέρω μείωση των απωλειών χαλκού. Όμως ροπή που αναπτύσσεται έχει συνήθως περισσότερες αρμονικές συνιστώσες, σε αντίθεση με τα διανεμημένα τυλίγματα όπου η θεμελιώδης αρμονική ροπής είναι κυρίαρχη, διότι το πεδίο κατανέμεται στο διάκενο με πιο ημιτονοειδή τρόπο. Ακόμα, οι συνολικές απώλειες είναι σε υψηλές ταχύτητες είναι αυξημένες. Ο λόγος είναι ότι το μαγνητικό πεδίο προκαλεί επιπλέον απώλειες δινορρευμάτων στο δρομέα και τους μόνιμους μαγνήτες εξαιτίας της ύπαρξης αρμονικών[3.6].

Επίσης χρησιμοποιώντας κατανεμημένα τυλίγματα μπορούμε να πετύχουμε υψηλότερες τιμές θεμελιώδους ΗΕΔ στη μηχανή μας καθώς ο συντελεστής τυλίγματος είναι μεγαλύτερος. Ιδιαίτερα σε εφαρμογές μηχανών εσωτερικών μόνιμων μαγνητών, το διανεμημένο τυλίγμα παράγει υψηλότερη μέση ροπή και χαμηλότερη ροπή ευθυγράμμισης.

Τα τυλίγματα στα οποία ο αριθμός αυλάκων ανά πόλο και ανά φάση δεν είναι ακέραιος αλλά κλασματικός, ονομάζονται τυλίγματα κλασματικού βήματος. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι τα πηνία έχουν τοποθετηθεί κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι πιο κοντά σε μήκος συγκριτικά με τα τυλίγματα πλήρους βήματος [3.7].

Στην περίπτωση συγκεντρωμένων τυλιγμάτων κλασματικού βήματος, ο αριθμός των στρώσεων είναι ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος. Στα τυλίγματα μονής στρώσης τα πηνία τυλίγονται γύρω από εναλλασσόμενα δόντια, ενώ στη διπλή στρώση τυλίγονται γύρω από κάθε δόντι. Τα τυλίγματα μονής στρώσης εμφανίζουν αυξημένη αντοχή σε βραχυκύκλωμα, λόγω των μεγαλύτερων αυτεπαγωγών που έχουν, και έτσι το ρεύμα σφάλματος είναι μειωμένο. Επίσης οι αμοιβαίες επαγωγές είναι μικρές, με αποτέλεσμα να εμποδίζεται η αρνητική επίδραση στις φάσεις που δεν παρουσιάζουν σφάλμα. Η μεγαλύτερη αυτεπαγωγή σκέδασης, είναι ο λόγος που τα τυλίγματα μονής στρώσης είναι η κύρια επιλογή σε εφαρμογές που απαιτείται λειτουργία σταθερής ισχύος σε μεγάλο εύρος στροφών (CPSR). Στα τυλίγματα διπλής στρώσης εμφανίζονται μειωμένες οι απώλειες πυρήνα λόγω δινορρευμάτων, καθώς η αντίδραση τυμπάνου μειώνει το αρμονικό περιεχόμενο της ΜΕΔ. Επιπλέον, η ηλεκτρεγερτική δύναμη είναι περισσότερο ημιτονοειδής. Παρόλα αυτά, στα τυλίγματα διπλής στρώσης η ικανότητα παραγωγής ροπής σε κατάσταση υπερφόρτισης είναι μικρότερη απ' ό,τι στα αντίστοιχα μονής στρώσης [3.8]. Παρακάτω, στο σχήμα 1, φαίνονται τα τρία είδη τυλιγμάτων που αναλύθηκαν:



Σχήμα 1. Κύριες διαμορφώσεις τυλιγμάτων: (α) διανεμημένα, (β) συγκεντρωμένα μονής στρώσης και (γ) συγκεντρωμένα διπλής στρώσης [2.5].

Συνεπώς, κάθε συμμετρικό κομμάτι της μηχανής αποτελείται από P' πόλους και Q_s' αύλακες. Αν N_i είναι ο αριθμός σπειρών ανά φάση του τυλίγματος και m ο αριθμός των φάσεων, ο αριθμός σπειρών ανά αύλακα προκύπτει:

$$n_c = \frac{m \cdot N_i}{Q_s} \quad (3.23)$$

Η ενεργός διατομή αύλακας για κάποια τιμή πυκνότητα ρεύματος J A/καρέ είναι:

$$A_{Cu} = \frac{n_c \cdot I_N}{J} \quad (3.24)$$

Λαμβάνοντας μια τιμή συντελεστή πληρότητας χαλκού, ff , στην αύλακα, η τελική απαιτούμενη επιφάνεια αύλακας προκύπτει:

$$A_{slot} = \frac{A_{Cu}}{ff} \quad (3.25)$$

Μελέτη χαρακτηριστικών δρομέα.

Για να αξιοποιηθεί σωστά ο μόνιμος μαγνήτης πρέπει να εξασφαλίσουμε ότι θα λειτουργεί σε περιοχή κοντά στο σημείο μέγιστης ενέργειας στην καμπύλη απομαγνήτισης. Η καμπύλη απομαγνήτισης είναι πρακτικά ευθεία γραμμή, κάνοντας έτσι εύκολο τον προσδιορισμό του σημείου που αποδίδουν τη μέγιστη ενέργεια, υπό την προϋπόθεση ότι είναι γνωστή η παραμένουσα μαγνήτιση B_r , και το μαγνητικό πεδίο επαναφοράς H_c . Η καμπύλη απομαγνήτισης μπορεί να περιγραφεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$H(B) = \frac{H_c}{B_r} \cdot B - H_c \quad (3.26)$$

όπου η ένταση του μαγνητικού πεδίου H υπολογίζεται σε kA/m. Με χρήση της παραπάνω εξίσωσης όπως συνδέεται η μαγνητεγερτικής δύναμης και πυκνότητας μαγνητικής ροής, υπολογίζουμε τη μείωση κατά την ονομαστική φόρτιση της πυκνότητας μαγνητικής ροής στην επιφάνεια του μαγνήτη ως εξής:

$$\Delta B = \frac{B_r}{H_c} \cdot ac \quad (3.27)$$

Στην περίπτωση επιφανειακού μόνιμου μαγνήτη, θεωρώντας σταθερή τη ΜΕΔ κατά μήκος του διακένου που αντιστοιχεί στον μαγνήτη, προκύπτει:

$$B_g = B_r \cdot \frac{L_m}{L_m + L_g} \quad (3.28)$$

Όπου B_g , η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο, B_r , η παραμένουσα μαγνήτιση, L_m το πάχος του μαγνήτη και L_g το μήκος διακένου.

Το απαιτούμενο περιφερειακό μήκος μαγνήτη εκτιμάται από την σχέση:

$$L_{magnet} = \frac{\Phi}{B_g \cdot L} \quad (3.29)$$

Η ακτίνα του δρομέα δίνεται από την σχέση:

$$R_r = \frac{D_g - L_g}{2} - L_m \quad (3.30)$$

Και προκύπτει το τόξο του μαγνήτη σε μοίρες ως εξής:

$$\theta_{magnet} = \frac{L_{magnet}}{R_r} \cdot \frac{180}{\pi} \quad (3.31)$$

3.4 Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία

Η προκαταρκτική σχεδίαση μιας μηχανής μας δίνει τη βασική διαμόρφωση της γεωμετρίας της μηχανής, η οποία αποτελεί ένα καλό σημείο εκκίνησης για την οριστική σχεδίαση. Για να πετύχουμε λεπτομερή βελτιστοποίηση γεωμετρίας, η οριστική σχεδίαση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (ΜΠΣ) για την επίλυση των εξισώσεων του μαγνητικού πεδίου. Μέσω της ανάλυσης αυτής γίνεται εξαιρετικά λεπτομερής αναπαράσταση του μαγνητικού πεδίου και λαμβάνεται υπόψη στην πλήρη της έκταση η γεωμετρία και η μη γραμμική συμπεριφορά των μαγνητικών υλικών. Έτσι μπορεί να υπολογιστεί με μεγάλη ακρίβεια η κατανομή του μαγνητικού πεδίου στο μαγνητικό κύκλωμα της μηχανής και μέσω αυτής, υπολογίζονται με ακρίβεια όλα τα λειτουργικά μεγέθη όπως, η ροπή, οι απώλειες.

Η επίλυση προβλημάτων σε πολύπλοκες γεωμετρίες που περιλαμβάνουν μη γραμμικά υλικά οδήγησε στην ανάπτυξη αριθμητικών μεθόδων επίλυσης. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων επιτυγχάνει τη μετατροπή των διαφορικών εξισώσεων με μερικές παραγώγους σε αλγεβρικές καθώς διακριτοποιείται το συνεχές πρόβλημα σε ένα μεγάλο αριθμό περιοχών απλής γεωμετρίας. Κατά τη διαδικασία αυτή έχουμε αντικατάσταση της αρχικής εξίσωσης του πεδίου με το πρόβλημα στασιμότητας μίας συναρτησιακής που έχει διαστάσεις ενέργειας. Αν η αρχική γεωμετρία χωρισθεί σε αρκετά μεγάλο αριθμό τέτοιων υποπεριοχών, το υπολογιζόμενο μέγεθος μπορεί να προσεγγισθεί με την επιθυμητή ακρίβεια.

Στην περίπτωση που η ανάλυση είναι διδιάστατη ο χώρος χωρίζεται σε στοιχειώδη τρίγωνα, ενώ όταν επιχειρείται τρισδιάστατη ανάλυση σε τετράεδρα. Έτσι το συνεχές φυσικό πρόβλημα μετατρέπεται σε διακριτό, στο οποίο οι άγνωστοι απαρτίζονται από τις τιμές του πεδίου στις κορυφές των διαδοχικών τριγώνων ή τετραέδρων. Το πρόβλημα που προκύπτει με τη χρήση ΜΠΣ είναι ένα αλγεβρικό σύστημα εξισώσεων όπου οι τιμές του πεδίου στο εσωτερικό των στοιχείων (τρίγωνα ή τετράεδρα) μπορούν να υπολογισθούν χρησιμοποιώντας τις τιμές των αντίστοιχων κορυφών τους.

Επίλυση μαγνητοστατικών προβλημάτων

Μαγνητοστατικά ονομάζονται τα προβλήματα στα οποία το μαγνητικό πεδίο είναι αμετάβλητο ως προς το χρόνο [3.9]. Σε αυτή την περίπτωση, η ένταση του μαγνητικού πεδίου H και η μαγνητική επαγωγή B ικανοποιούν τις παρακάτω εξισώσεις του Maxwell:

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (3.32)$$

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad (3.33)$$

$$\nabla \cdot \bar{D} = \rho \quad (3.34)$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad (3.35)$$

Σύμφωνα με το νόμο του Ampere και θεωρώντας χαμηλές συχνότητας λειτουργίας προκύπτει:

$$\frac{\partial D}{\partial t} \approx 0 \quad (3.36)$$

και συνεπώς:

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} \quad (3.37)$$

Επίσης:

$$\bar{B} = \mu \bar{H} \quad (3.38)$$

Στην περίπτωση των μόνιμων μαγνητών έχουμε:

$$\bar{B} = \mu_0 \bar{H} + \bar{M} \quad (3.39)$$

όπου M είναι η μαγνήτιση του υλικού του μόνιμου μαγνήτη. Αν το υλικό είναι μη γραμμικό, όπως ο κορεσμένος σίδηρος ή μαγνήτες alnico, τότε η μαγνητική διαπερατότητα, μ , είναι στην πραγματικότητα εξαρτάται από το μέτρο του B :

$$\mu(B) = \frac{B}{H(B)} \quad (3.40)$$

Για να βρούμε το μαγνητικό πεδίο σε κάθε σημείο του χώρου πρέπει να υπολογίσουμε το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό A . Το μαγνητικό πεδίο γράφεται ως συνάρτηση του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού, ως εξής:

$$\bar{B} = \nabla \times \bar{A} \quad (3.41)$$

Αυτός ο ορισμός του B ικανοποιεί πάντα την εξίσωση (2.39). Η εξίσωση (2.45) διατυπώνεται ως εξής:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(B)} \nabla \times \bar{A} \right) = \bar{J} \quad (3.42)$$

Για ένα γραμμικό ιστροπικό μέσο, υπό την παραδοχή πως ισχύει η συνθήκη του Coulomb $\nabla \cdot \vec{A} = 0$, έχουμε:

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \times \vec{A} = -\vec{J} \quad (3.43)$$

Στη γενική περίπτωση, το διανυσματικό δυναμικό είναι ένα διάνυσμα τριών συνιστωσών. Στη θεώρηση καρτεσιανής γεωμετρίας δύο διαστάσεων όμως, οι δύο από αυτές τις τρεις συνιστώσες μπορούν να μηδενισθούν, και μεταβάλλεται μόνο η A_z . Το πλεονέκτημα της χρήσης του διανυσματικού δυναμικού είναι πως όλες οι συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται στο μαγνητοστατικό πεδίο συνδυάζονται σε μία εξίσωση μίας μεταβλητής. Εάν είναι γνωστό το A , τότε τα B και H προκύπτουν από κατάλληλη επεξεργασία του. Συνεπώς έχουμε:

$$\vec{A} = A_z \vec{i}_z \quad (3.44)$$

Και για την πυκνότητα ρεύματος J :

$$\vec{J} = J_z \vec{i}_z \quad (3.45)$$

Για την πυκνότητα μαγνητικής ροής η ανάλυση περιορίζεται στις δύο διαστάσεις και εν προκειμένω:

$$\vec{B} = B_x \vec{i}_x + B_y \vec{i}_y \quad (3.46)$$

Τα προβλήματα που λύνονται κατά τη σχεδίαση ηλεκτρικών μηχανών θεωρούνται μαγνητοστατικά και επιλύονται με βάση την εξίσωση Poisson, ενώ τα δυναμικά φαινόμενα, που αφορούν τη περιστροφή του δρομέα, θεωρούνται ως διακριτές μαγνητοστατικές καταστάσεις, όπου θεωρείται ότι το πεδίο είναι στιγμιαία αμετάβλητο. Η ανάλυση των μηχανών μόνιμων μαγνητών μπορεί να επιτευχθεί με βάση τη θεώρηση αυτή, εφόσον τα αναπτυσσόμενα δινορρέυματα είναι περιορισμένα και μπορούν να αμεληθούν.

Οριακές συνθήκες

Η επίλυση ενός μαγνητοστατικού ή ηλεκτροστατικού προβλήματος, ανάγεται σε επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων. Από την θεωρία των μερικών διαφορικών εξισώσεων γνωρίζουμε ότι προκειμένου να έχουμε μοναδική λύση, πρέπει να ορισθούν οι οριακές συνθήκες του προβλήματος ώστε να έχουμε ένα καλώς τοποθετημένο πρόβλημα. Οι οριακές συνθήκες κατηγοριοποιούνται ως εξής [3.10]:

- Dirichlet: Σε αυτό τον τύπο οριακής συνθήκης, η τιμή του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού A δηλώνεται πάνω στο όριο. Αν $A=0$ τότε πρόκειται για την ομογενή συνθήκη Dirichlet, διαφορετικά πρόκειται για την μη ομογενή. Η συνθήκη $A=0$ απαντάται συχνά σε προβλήματα ηλεκτρικών μηχανών. Η φυσική σημασία της δήλωσης $A=0$ κατά μήκος ενός ορίου της γεωμετρίας σε ένα μαγνητικό πρόβλημα, είναι πως η μαγνητική ροή περιορίζεται εντός των ορίων της μηχανής, ενώ οι γραμμές της μαγνητικής ροής θα είναι παράλληλες προς το σύνορο αυτό. Σε περιπτώσεις όπου μοντελοποιείται ολόκληρη η μηχανή, η χρήση μόνο αυτής της οριακής συνθήκης είναι επαρκής.
- Neumann: Η οριακή αυτή συνθήκη ορίζει την κάθετη παράγωγο του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού κατά μήκος του ορίου. Η συνηθέστερη περίπτωση είναι η χρήση της ομογενούς συνθήκης Neumann δηλαδή $\partial A / \partial n = 0$. Συνήθως χρησιμοποιείται στα μαγνητικά προβλήματα σε περιπτώσεις διεπιφάνειας με

υλικό πολύ μεγάλης διαπερατότητας. Η χρήση αυτής τη συνθήκης επιβάλλει στις μαγνητικές γραμμές να τέμνουν το σύνορο κάθετα.

- Robin: Η οριακή συνθήκη Robin είναι ένα είδος συνδυασμού των συνθηκών Dirichlet και Neumann, καθώς καθορίζει μια σχέση μεταξύ της των σταθμισμένων τιμών του A και της παραγώγου του. Αυτή η οριακή συνθήκη χρησιμοποιείται συχνά προβλήματα διάδοσης θερμότητας ως οριακή συνθήκη σε μονωτικές επιφάνειες.
- Περιοδική: Μία περιοδική οριακή συνθήκη συνδέει δύο όρια. Σε αυτό τον τύπο οριακής συνθήκης, οι οριακές τιμές στα αντίστοιχα σημεία των δύο ορίων είναι ίσες.
- Αντιπεριοδική: Μια αντιπεριοδική οριακή συνθήκη συνδέει επίσης δύο όρια μεταξύ τους, αλλά σε αυτή την περίπτωση τα αντίστοιχα σύνορα έχουν ίσα μέτρα αλλά αντίθετο πρόσημο.

Τόσο οι περιοδικές όσο και οι αντιπεριοδικές οριακές συνθήκες χρησιμοποιούνται όταν μοντελοποιείται ένα τμήμα μόνο της μηχανής.

Διαδικασία ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία

Συνοπτικά, η διαδικασία επίλυσης ενός μαγνητικού προβλήματος με πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων έχει τα παρακάτω στάδια:

1. Σχεδιάζεται η γεωμετρία, ορίζονται οι οριακές και περιοδικές συνθήκες και τα διάφορα υλικά.
2. Πλεγματοποιείται το πρόβλημα με επιθυμητό αριθμό τριγωνικών στοιχείων.
3. Επίλυεται το πρόβλημα γραμμικής άλγεβρας και υπολογίζεται το διανυσματικό δυναμικό.
4. Επεξεργάζονται και απεικονίζονται τα αποτελεσμάτα.

Σχεδίαση και πλεγματοποίηση

Η παραμετροποίηση είναι το αρχικό στάδιο της διαδικασίας σχεδίασης της κάθε μηχανής. Διαλέγουμε ένα σύνολο ανεξάρτητων μεταβλητών σχεδίασης και ακολούθως εκφράζουμε όλες τις υπόλοιπες ως συνάρτηση τους.

Με βάση το τρόπο που περιγράψαμε προηγουμένως επιλέγουμε τη διαμόρφωση του τυλίγματος και τον αριθμό των στρώσεων. Επίσης το πάχος των σωμάτων σιδήρου στάτη και δρομέα μπορεί να καθοριστεί με βάση το πάχος των δοντιών και το εύρος του μόνιμου μαγνήτη. Επίσης ο στάτης μπορεί να αποτελείται είτε από μια ομοιόμορφη κατανομή δοντιών είτε από άνισα δόντια. Μια άλλη επιλογή είναι το αν οι αύλακες θα είναι ανοιχτές ή αν τα δόντια θα έχουν και πέδιλο. Στη δεύτερη περίπτωση, για τη σχεδίαση των δοντιών εμπλέκονται οι εξής μεταβλητές: το πάχος του πέδilu του δοντιού, η απόσταση μεταξύ πέδilu και σώματος δοντιού, το πάχος και το ύψος του δοντιού και η ακτίνα καμπυλότητας στις ακμές των αυλάκων, που δίνουν τη δυνατότητα σχεδίασης οποιασδήποτε γεωμετρίας στάτη κατανεμημένου ή συγκεντρωμένου τυλίγματος με μονή ή διπλή στρώση.

Η διαδικασία της πλεγματοποίησης έπεται της σχεδίασης, και ακολουθείται από τη διαδικασία της ανάλυσης. Η πλεγματοποίηση, αν και είναι αυτοματοποιημένη διαδικασία που περιλαμβάνει το λογισμικό ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία, επηρεάζει έντονα την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, γι' αυτό και είναι σημαντική η επιτυχημένη διεξαγωγή της. Η πλεγματοποίηση, αφορά στην κατάτμηση της γεωμετρίας, σε τριγωνικά θεμελιώδη στοιχεία

και κόμβους και πέραν της ακρίβειας της ανάλυσης καθορίζει και το υπολογιστικό κόστος, καθώς ο αριθμός των υπολογισμών είναι άμεσα συνδεδεμένος με τον αριθμό των κόμβων και των στοιχείων.

«Ο τρόπος υπολογισμού της ηλεκτρομαγνητικής ροπής, είναι ένας από τους πιο χαρακτηριστικούς λόγους που επιβάλλουν την πύκνωση του πλέγματος στις περιοχές που υπολογίζεται η ροπή. Πιο συγκεκριμένα, η ροπή προκύπτει από το γινόμενο της ακτινικής και εφαπτομενικής συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής. Οι προαναφερθείσες συνιστώσες προκύπτουν από την παραγωγή του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού A . Συνεπώς για τον ακριβή υπολογισμό της ροπής, απαιτείται πυκνότερο πλέγμα στο διάκενο ώστε να υπολογιστούν με ακρίβεια οι συνιστώσες τις μαγνητικής επαγωγής. Έχει δειχθεί πως αν στο διάκενο υπάρχουν 5 στρώσεις στοιχείων τότε η ροπή προσεγγίζεται με πολύ μεγάλη ακρίβεια, ενώ περαιτέρω πύκνωση θα αυξήσει αρκετά το υπολογιστικό κόστος με δυσανάλογη αύξηση της ακρίβειας. Κατά κανόνα 3-4 στρώσεις στοιχείων δίνουν πολύ καλή ακρίβεια στις περισσότερες εφαρμογές σχεδίασης»[3.17].

Επίσης, πυκνότερο πλέγμα πρέπει να χρησιμοποιείται σε περιοχές που η μαγνητική επαγωγή προβλέπεται να έχει υψηλές τιμές όπως τα δόντια του στάτη. Αντίθετα σε περιοχές όπως ο άξονας η πυκνότητα του πλέγματος μπορεί να είναι ελαττωμένη.

Υπολογισμός μέσης ροπής και κυμάτωσης ροπής

Το πρώτο βήμα για τον υπολογισμό της ηλεκτρομαγνητικής ροπής είναι ο υπολογισμός της επιθυμητής γωνίας ροπής. Το πρόβλημα αυτό επί της ουσίας αντιστοιχεί στο να υπολογίσουμε την επιθυμητή γωνία εκκίνησης. Αυτό γίνεται θεωρώντας εκ των προτέρων ένα στιγμιότυπο τριφασικού εναλλασσόμενου ρεύματος. Έπειτα, ο δρομέας περιστρέφεται κατά ένα πολικό βήμα και αναζητούμε τη θέση στην οποία εμφανίζεται η μέγιστη ροπή. Αυτή η θέση, θεωρείται και η αρχική γωνία του δρομέα. Η διαδικασία που προαναφέραμε είναι αναγκαία διότι στα συγκεντρωμένα τυλίγματα δεν είναι εύκολο να υπολογιστεί με βάση αναλυτικές σχέσεις το σημείο συμμετρίας των φάσεων A, B, C και το σημείο μέγιστης ΜΕΔ διακένου.

Ακολούθως υπολογίζεται η μέση ροπή για μια ηλεκτρική περίοδο καθώς και η κυμάτωση της. Για να γίνει αυτό επιλύονται τα μαγνητοστατικά προβλήματα τα οποία προκύπτουν αν ο δρομέας στρέφεται σύγχρονα με τη συχνότητα των ρευμάτων που τροφοδοτείται ο στάτης ξεκινώντας από την γωνία εκκίνησης που προσδιορίστηκε στο προηγούμενο. Αφού επιλυθεί το πρόβλημα σε κάθε βήμα, η ηλεκτρομαγνητική ροπή υπολογίζεται μέσω του τανυστή του Maxwell. Η κυμάτωση προκύπτει από το ποσοστό της μέγιστης μείον της ελάχιστης ροπής διά την μέση ροπή ως εξής:

$$T_{ripple} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{mean}} \quad (3.47)$$

Υπολογισμός επαγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης.

Από τον νόμο του Faraday η αναπτυσσόμενη αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη δίνεται από τη σχέση:

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.48)$$

όπου N ο αριθμός των σπειρών και Φ η μαγνητική ροή. Καθώς όμως δεν υφίσταται μια αναλυτική σχέση για την μαγνητική ροή συναρτήσει του χρόνου και συνεπώς για την μεταβολή της μαγνητικής ροής καταφεύγουμε στον ορισμό της παραγώγου, ούτως ώστε να προκύψει μια βολικότερη για την διενέργεια των υπολογισμών μορφή:

$$\begin{aligned} e(t) &= -N \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\Phi(h+t) - \Phi(t)}{h} \\ &= -N \frac{\Phi(t_2) - \Phi(t_1)}{t_2 - t_1} \end{aligned} \quad (3.49)$$

όπου t_2 και t_1 δύο χρονικές στιγμές, που στην εφαρμογή μας καθορίζονται από τη μεταβολή της γωνίας δρομέα και καθώς γνωρίζουμε την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής γνωρίζουμε τελικά και την χρονική διαφορά μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$dt = t_2 - t_1 = \frac{d\theta}{\omega_r} \quad (3.50)$$

όπου $d\theta$ είναι το βήμα περιστροφής που χρησιμοποιείται στην ανάλυση και ω_r είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Έστω ότι ο δρομέας της μηχανής βρίσκεται στη θέση k , τότε η μαγνητική ροή που επάγεται στη φάση A προκύπτει:

$$\Phi(k) = \sum_{j \in A} \Phi_j(k) - \sum_{j \in A'} \Phi_j(k) \quad (3.51)$$

Δηλαδή σε κάθε χρονικό στιγμιότυπο που αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη γωνιακή μετατόπιση του δρομέα σε σχέση με τη θέση εκκίνησης, η μαγνητική ροή είναι ίση με το άθροισμα των μαγνητικών ροών των στρώσεων των αυλάκων της αναχώρησης της φάσης A μείον το άθροισμα των μαγνητικών ροών των στρώσεων των αυλάκων της επιστροφής της φάσης A , δηλαδή της A' . Οι ροές που επάγουν τάση στους αγωγούς των αυλάκων που ανήκουν στη φάση A θεωρείται ότι δρουν με θετικό πρόσημο ενώ εκείνες που ανήκουν στη φάση A' με αρνητικό. Με βάση τα προαναφερθέντα η επαγόμενη αντί-ΗΕΔ μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$e = -N \cdot \frac{d\Phi(k)}{d\theta} \cdot \omega_r \quad (3.52)$$

Υπολογισμός απωλειών

Οι σημαντικότερες απώλειες ενός κινητήρα, και οι οποίες είναι εφικτό να υπολογιστούν στα πλαίσια μαγνητοστατικών αναλύσεων ή με χρήση αναλυτικών εργαλείων είναι οι εξής:

- Απώλειες χαλκού
- Απώλειες σιδήρου
- Απώλειες τριβών και ανεμισμού

- Απώλειες μαγνήτη

Απώλειες χαλκού

Οι απώλειες χαλκού αντιστοιχούν στις ωμικές απώλειες που εμφανίζονται στα τυλίγματα του στάτη. Υπολογίζονται μέσω του:

$$P_{cu} = 3I_{nom}^2 \cdot R_{ph} \quad (3.53)$$

Για δοσμένη λοιπόν πυκνότητα ρεύματος J το ονομαστικό ρεύμα υπολογίζεται ως εξής:

$$I_{nom} = \frac{J \cdot ff \cdot A_{slot}}{N} \quad (3.54)$$

όπου J είναι η *RMS* τιμή της πυκνότητας ρεύματος, N ο αριθμός των ελιγμάτων ανά αύλακα, ff ο συντελεστής πληρότητας και A_{slot} η επιφάνεια αύλακας. Η διορθωμένη ειδική αντίσταση προκύπτει σε $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ ως εξής:

$$r_{cu} = r_{cu,20} \cdot \left[1 + a \cdot (\theta - 20^\circ) \right] \quad (3.55)$$

Θεωρώντας πως η θερμοκρασία λειτουργίας της μηχανής σε ονομαστική φόρτιση είναι περίπου $\theta=70^\circ\text{C}$ και για συντελεστή θερμοκρασιακής μεταβολής αντίστασης του χαλκού $a=3.9 \cdot 10^{-3}$ [26], η διορθωμένη ειδική αντίσταση είναι ίση με $2.091 \mu\Omega \cdot \text{cm}$.

Για να υπολογισθεί το μέσο μήκος μιας σπείρας του τυλίγματος, χρησιμοποιούμε το ενεργό μήκος L της μηχανής και την απόσταση $d_{average}$ που ορίζεται ως η απόσταση από το γεωμετρικό μέσο της μίας στρώσης μιας αύλακας, μέχρι το γεωμετρικό μέσο της ακόλουθης στρώσης της γειτονικής αύλακας. Επίσης, εισάγεται ένας συντελεστής προσαύξησης του μέσου μήκους μιας σπείρας, ο συντελεστής πλέξης olf . Ο συντελεστής αυτός εκφράζει το γεγονός ότι τα πηνία στην πραγματικότητα τυλίγονται με μια μικρή κλίση και επομένως το συνολικό μήκος είναι λίγο μεγαλύτερο. Επιπλέον στις κεφαλές τυλίγματος ένα τμήμα των αγωγών βρίσκεται εκτός ενεργού μήκους και τέλος κατά την πλέξη υφίστανται συχνά μεταθέσεις αγωγών. Μια τυπική τιμή είναι $olf=1.2$. Το μέσο μήκος μιας σπείρας είναι:

$$l_{turn} = olf \cdot (2L + 2d_{average}) \quad (3.56)$$

Η διατομή του κάθε αγωγού είναι:

$$A_{cu} = \frac{ff \cdot A_{slot}}{N} \quad (3.57)$$

Η αντίσταση ανά φάση δίνεται από τον τύπο:

$$R_{phase} = \frac{N \cdot Q_s}{m} \cdot r_{cu} \cdot \frac{l_{turn}}{A_{cu}} \quad (3.58)$$

όπου m ο αριθμός των φάσεων της μηχανής, τυπικά $m=3$, και Q_s ο αριθμός των αυλάκων του στάτη.

Απώλειες πυρήνα

Για τον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα χρησιμοποιούμε τις τιμές της πυκνότητας της μαγνητικής ροής στο βαρύκεντρο κάθε τριγώνου (δηλαδή κάθε στοιχείου του πλέγματος) σε όλες τις περιοχές της μηχανής που υπάρχει σιδηρομαγνητική λαμαρίνα.

Για κάθε στοιχείο του πλέγματος πρέπει να γνωρίζουμε τη θέση και την επιφάνεια. Με δεδομένο το ενεργό μήκος της μηχανής υπολογίζεται και ο όγκος των ισοδύναμων πρισμάτων. Για όλα τα στοιχεία πρέπει να γνωρίζουμε τη τιμή της μαγνητικής επαγωγής τους. Στη συνέχεια αξιοποιούνται τα πειραματικά δεδομένα της καμπύλης ειδικών απωλειών του σιδηρομαγνητικού υλικού, τα οποία παρέχονται από τον κατασκευαστή σε μορφή διαγράμματος. Ένα πρόβλημα που παρουσιάζεται είναι ότι δεν δίνεται η καμπύλη αυτή για ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Σε περίπτωση που δεν γνωρίζουμε τις επιθυμητές τιμές για κάποια συχνότητα χρησιμοποιούμε γραμμική να τις προσδιορίσουμε.

Στη συνέχεια για κάθε στοιχείο του πλέγματος υπολογίζουμε την ειδική απώλεια πυρήνα. Οι απώλειες πυρήνα επηρεάζονται από τη μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής, και μιας και η ΜΕΔ έχει σχεδόν ημιτονική κατανομή στο διάκενο αρκεί να αναλύσουμε μόνο μια θέση του δρομέα. Γνωρίζοντας την επιφάνεια κάθε στοιχείου και πολλαπλασιάζοντας με το ενεργό μήκος της μηχανής και την πυκνότητα του υλικού της σιδηρομαγνητικής λαμαρίνας αλλά και τις ειδικές απώλειες που υπολογίστηκαν για το στάτη και το δρομέα, προκύπτουν οι συνολικές απώλειες πυρήνα. Η μέθοδος αυτή δίνει μια καλή εκτίμηση των απωλειών πυρήνα χωρίς το υπολογιστικό κόστος να είναι απαγορευτικό στην περίπτωση που θέλουμε να εξετάσουμε πολλές τοπολογίες και επομένως πρέπει να πραγματοποιηθούν πολλές προσομιώσεις.

Απώλειες τριβών και ανεμισμού

Οι απώλειες λόγω τριβών υπολογίζονται από την εμπειρική σχέση:

$$P_{fr} = \frac{k_{fb} \cdot (m_{rotor} + m_{magnet}) \cdot rpm}{1000} \quad (3.59)$$

όπου k_{fb} είναι ένας εμπειρικός συντελεστής, που λαμβάνεται συνήθως ίσος με 3, m_{rotor} είναι η μάζα του δρομέα, m_{magnet} είναι η συνολική μάζα των μόνιμων μαγνητών και rpm είναι η ταχύτητα περιστροφής εκπεφρασμένη σε ΣΑΛ. Οι απώλειες λόγω ανεμισμού εκτιμώνται από τον τύπο:

$$P_{wind} = \frac{L \cdot (2R_r + 2mt)^3 \cdot rpm^3}{10^6} \quad (3.60)$$

όπου R_r είναι η εξωτερική ακτίνα του δρομέα και mt είναι το πάχος των μαγνητών. Οι απώλειες τριβών και ανεμισμού συνήθως δεν λαμβάνονται υπόψη, ειδικότερα στην περίπτωση εφαρμογών που η ταχύτητα περιστροφής είναι χαμηλή.

Απώλειες μαγνήτη

Οι απώλειες δινορρευμάτων στο σώμα των μόνιμων μαγνητών παραδοσιακά αμελούνταν κατά τη σχεδίαση κινητήρων με κατανεμημένα τυλίγματα, λόγω της ημιτονικότητας της μαγνητεγερτικής δύναμης. Παρόλα αυτά σε διαμορφώσεις συγκεντρωμένων τυλιγμάτων οι απώλειες μαγνήτη αποτελούν πολύ σημαντική συνιστώσα. Για τον υπολογισμό τους έχουν προταθεί αναλυτικά μοντέλα και μη μοντέλα [3.17].

Υπολογισμός απόδοσης

Εφόσον υπολογιστούν όλες οι συνιστώσες απωλειών με βάση τις προαναφερθείσες διαδικασίες, η απόδοση του κινητήρα δίνεται από την σχέση:

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{P_m}{P_m + P_{losses}} \quad (3.61)$$

όπου

$$P_m = T_{mean} \cdot \omega_r \quad (3.62)$$

και

$$P_{losses} = P_{cu} + P_{iron} + P_{magnet} + P_{fr} + P_{wind} \quad (3.63)$$

Υπολογισμός ροπής αδράνειας

Η ροπή αδράνειας υπολογίζεται από τον τύπο:

$$J = 0.5 \cdot \pi \cdot \rho \cdot L \cdot (R_{out}^2 - R_{in}^2) \quad (3.64)$$

3.5 Βιβλιογραφία κεφαλαίου

1. Juha Pyrhonen, Tapani Jokinen, Valeria Hrabovcova, "Design of Rotating Electrical Machines", John Wiley & Sons Ltd., 2008.
2. Κωνσταντίνος Λάσκαρης, "Σχεδιασμός και Κατασκευή Κινητήρων Μόνιμων Μαγνητών για Ηλεκτρικά Οχήματα", Διδακτορική διατριβή, Αθήνα, Δεκέμβριος 2011.
3. M. G. Say, "Alternating Current Machines", John Wiley & Sons Ltd., 1983.
4. Jiabin Wang, V.I. Patel and Weiya Wang, "Fractional-Slot Permanent Magnet Brushless Machines with Low Space Harmonic Contents", IEEE Trans. Magn., vol.50, no.1, pp.1-9, Jan. 2014.
5. P. Salminen, M. Niemela, J. Pyhonen and J. Mantere, "Performance analysis of fractional slot wound PM-motors for low speed applications", Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2004 IEEE, vol.2, no., pp.1032,1037 vol.2, 3-7 Oct 2004.
6. N. Bianchi, M. Dai Pré, L. Alberti and E. Fornasiero, "Theory and Design of Fractional-Slot PM Machines", Tutorial Course notes of IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), CLEUP, Padova, 2007.
7. A.M. El-Refaie, "Fractional-Slot Concentrated-Windings Synchronous Permanent Magnet Machines: Opportunities and Challenges," IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol.57, no.1, pp. 107-121, 2010.
8. Florence Meier, PhD Thesis, "Permanent-Magnet Synchronous Machines with Non-Overlapping Concentrated Windings for Low-Speed Direct-Drive Applications", Royal Institute of Technology, School of Electrical Engineering, Electrical Machines and Power Electronics, Stockholm, 2008.
9. T. Ohnishi and N. Takahashi, "Optimal design of efficient IPM motor using finite element method", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 36, no. 5, pp. 3537–3539, 2000.
10. N. Bianchi, "Electrical Machine Analysis using Finite Elements", CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton (USA), 2005.
11. E. Sandra και B. Hans, "Loss evaluation and design optimization for direct driven permanent magnet synchronous generators for wind power", ELSEVIER, 2011.
12. D. Meeker, «Iron Loss Calculation in PM synchronous machines», [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.femm.info/wiki/CoreLossCalculation>.
13. R. Bargallo, J. Llaverias, A. De Blas, H. Martín και R. Piqué, "Main inductance determination in rotating machines. Analytical and Numerical calculation: A didactical approach".
14. N. Bianchi, M. Barcaro και S. Bolognani, "Electromagnetic and Thermal Analysis of Permanent Magnet Synchronous Machines", Finite Element Analysis - From Biomedical Applications to Industrial Developments, InTech, 2012, pp. 407-438.
15. C. Mademlis, N. Margaris, J. Xypteras, "Magnetic and thermal performance of a synchronous motor under loss minimization control, IEEE Transaction on Energy Conversion", Vol. 15, No. 2, 135–142, 2000.
16. P. H. Mellor, D. Roberts and D. R. Turner, "Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design", Electric Power Applications, IEE Proceedings B, Vol.138:205–218,19
17. Μίνως Μπενιακάς, «Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση κινητήρων με θεώρηση των απωλειών των μόνιμων μαγνητών για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης», Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, 2015.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΙ TAGUCHI και ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ (ANOVA)

4.1 Μέθοδοι Taguchi

4.1.1 Εισαγωγή

Οι μέθοδοι Taguchi, είναι οι στατιστικές μέθοδοι που αναπτύχθηκαν από τον Genichi Taguchi με σκοπό τη βελτίωση της ποιότητας των μεταποιημένων αγαθών και, πρόσφατα, βρήκαν εφαρμογή σε προβλήματα της μηχανικής[1], της βιοτεχνολογίας[2][3], του μάρκετινγκ και της διαφήμισης[4]. Από το σύνολο των προτάσεων του Taguchi ιδιαίτερα σημαντική και πρωτοποριακή θεωρείται η ανάπτυξη συγκεκριμένης μεθοδολογίας για τη μελέτη της διακύμανσης σε μέσω μιας σειράς πειραμάτων[5].

Η συνεισφορά του μεθόδων Taguchi θα μπορούσε να χωριστεί στους εξής κλάδους της στατιστικής:

- Συναρτήσεις Απωλειών
- Έλεγχος ποιότητας εκτός γραμμής παραγωγής
- Σχεδιασμός πειραμάτων

4.1.2 Συναρτήσεις Απωλειών

Μέχρι και το πρόσφατο παρελθόν, οι στατιστικές μέθοδοι έχουν στηριχθεί σε αμερόληπτες εκτιμήτριες συναρτήσεις των τρόπων μεταχείρισης του προβλήματος. Θεωρώντας ότι πληρούνται οι συνθήκες του θεωρήματος Gauss-Markov, εκτιμητές που χρησιμοποιούν τη προσέγγιση των ελάχιστων τετραγώνων εμφανίζουν την ελάχιστη διακύμανση ανάμεσα σ' όλους τους τύπους των εκτιμητών. Μάλιστα η εφαρμογή σ' αυτές τις περιπτώσεις της σύγκρισης των μέσων απλοποιεί τη μελέτη και η χρήση της δικαιολογείται από το νόμο των μεγάλων αριθμών, σύμφωνα με τον οποίο οι μέσες τιμές των δειγμάτων-πειραμάτων συγκλίνουν προς τις πραγματικές μέσες τιμές.

Ο G. Taguchi διδάχθηκε στατιστική θεωρία κυρίως από τους οπαδούς των θεωριών του Ronald A. Fisher, ο οποίος απέφευγε τη χρήση συναρτήσεων απωλειών στις αναλύσεις του. Ωστόσο, υποστήριξε ότι σε βιομηχανικές εφαρμογές που αφορούσαν εξειδικευμένα προϊόντα και διαδικασίες δεν χρειαζόταν η ιδιαίτερα εκτενής αναζήτηση του συνόλου των εφικτών συνδυασμών και ότι η υπερβολική διακύμανση έθετε ζητήματα κακής ποιότητας κατασκευής σε πολλά διαφορετικά προϊόντα ενώ παράλληλα ήταν ανυπαρξιακή από την άποψη του χρόνου και του κόστους που αυτή απαιτούσε.

Ως εκ τούτου, υποστήριξε ότι η ποιότητα των βιομηχανικών εφαρμογών θα πρέπει να ξεκινά με την κατανόηση του κόστους της ποιότητας σε διάφορες καταστάσεις. Υποστήριξε ότι το κόστος δοκιμών και κατασκευής πρέπει να είναι ελάχιστο. Προκειμένου να καθορίσει

τις συναρτήσεις απωλειών με τη βοήθεια στατιστικών μεθόδων όρισε τρεις κατηγορίες προβλημάτων:

1. Όσο μεγαλύτερο τόσο καλύτερο (για περιπτώσεις όπως η αγροτική παραγωγή).
2. Όσο μικρότερο τόσο καλύτερο (για περιπτώσεις όπως η έκλυση διοξειδίου του άνθρακα από μια μηχανή).
3. Ελάχιστη διακύμανση ως προς συγκεκριμένο στόχο (για περιπτώσεις όπως η σχεδίαση ενός κομματιού μιας μηχανικής κατασκευής).

Οι περιπτώσεις (1) και (2) μπορούν να περιγραφούν από μονότονες συναρτήσεις απωλειών. Αντίθετα στην περίπτωση (3) οι μεθοδολογίες που ανέπτυξε ο Taguchi υιοθετούν προσεγγίσεις συναρτήσεων απωλειών τετραγωνισμένου σφάλματος για τους εξής λόγους:

- Είναι ο πρώτος «συμμετρικός όρος» του αναπτύγματος Taylor στις περιπτώσεις πραγματικών συναρτήσεων απωλειών
- Οι συνολικές απώλειες μετρώνται μέσω της διακύμανσης.
- Η συνάρτηση απωλειών τετραγωνισμένου σφάλματος χρησιμοποιείται ευρέως στη στατιστική και αποτελεί μια δοκιμασμένη σε πολλές περιπτώσεις προσέγγιση.

Ορίζει τη διαφορά μεταξύ της τιμής στόχου ενός χαρακτηριστικού επίδοσης μιας διαδικασίας, τ , και η μετρούμενη τιμή, y , ως μια συνάρτηση απώλειας, ως εξής:

$$l(y) = k_c (y - \tau)^2$$

Η σταθερά, k_c , της συνάρτησης απώλειας μπορεί να καθοριστεί με την εξέταση των ορίων που προδιαγράφονται ή ενός αποδεκτού διαστήματος, δέλτα.

$$k_c = \frac{C}{\Delta^2}$$

Η δυσκολία στον προσδιορισμό k_c είναι ότι τ και C είναι μερικές φορές δύσκολο να προσδιοριστούν.

Αν στόχος είναι η ελαχιστοποίηση κάποιου κριτηρίου, το τ μηδενίζεται και η συνάρτηση απωλειών ορίζεται ως:

$$l(y) = k_c y^2$$

Τέλος αν στόχος είναι η μεγιστοποίηση κάποιου κριτηρίου, η συνάρτηση απώλειας ορίζεται ως:

$$l(y) = \frac{k_c}{y^2}$$

4.1.3 Έλεγχος ποιότητας εκτός γραμμής παραγωγής

Οι μεθοδολογίες Taguchi βασίζονται στην λογική ότι το καταλληλότερο στάδιο που μπορεί να μειωθεί η διακύμανση είναι κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού του προϊόντος αλλά και κατά τη διαδικασία παραγωγής του. Συνεπώς, αναπτύχθηκε μια στρατηγική που μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στα δύο στάδια. Η διαδικασία περιλαμβάνει τρία στάδια:

1. Καθορισμός του συστήματος
2. Παραμετροποίηση του συστήματος
3. Μελέτη των επιτρεπτών ανοχών στις διάφορες παραμέτρους

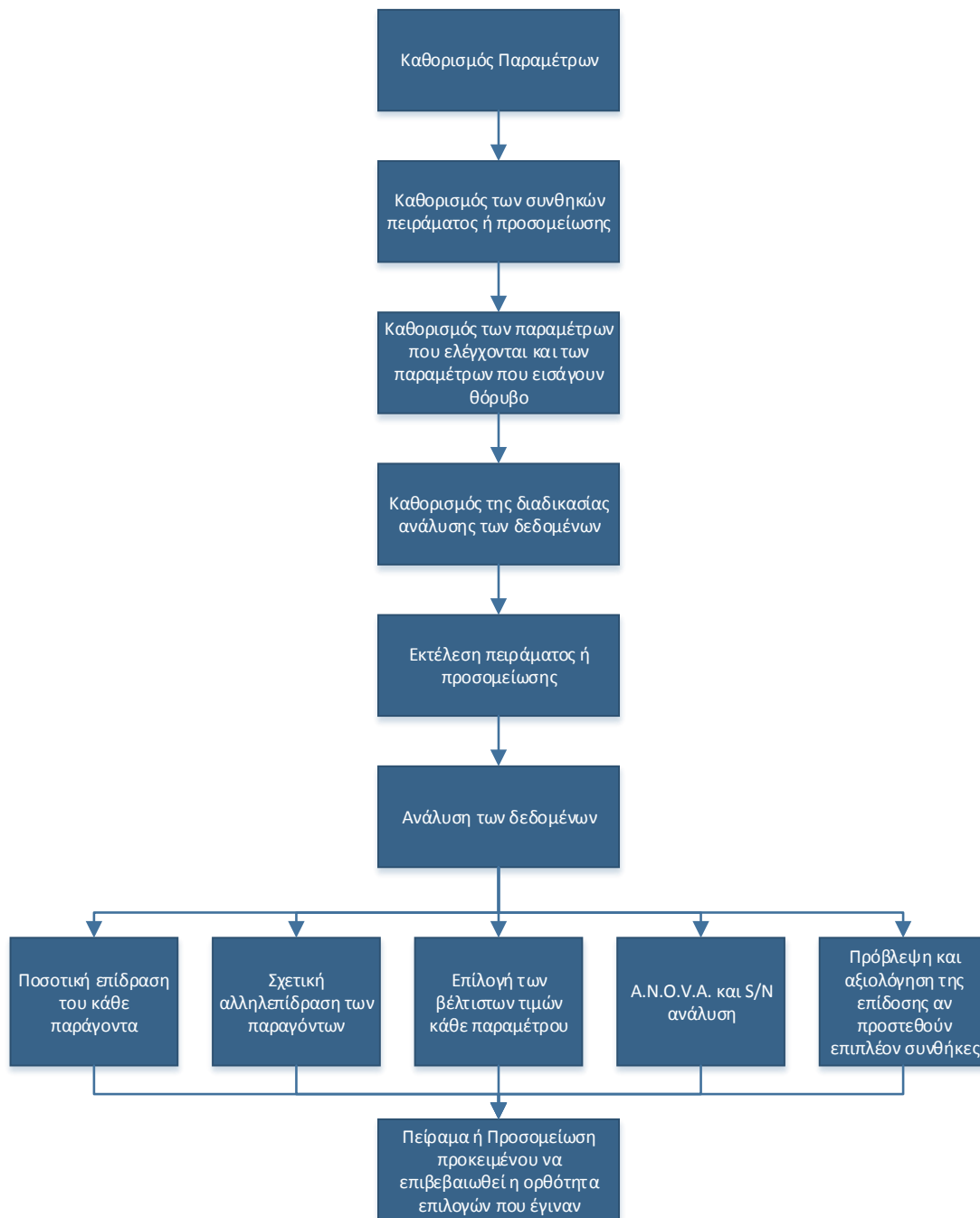
4.1.4 Σχεδιασμός πειραμάτων

Ο σχεδιασμός με βάση τις μεθόδους του Taguchi στοχεύει στο να κατανοηθεί καλύτερα η επίδραση της μεταβολής των παραμέτρων σε μια σχεδίαση, κάτι που δεν επιτυγχάνεται ιδιαίτερα αποδοτικά σε συνολικό επίπεδο μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας. Προτείνεται μάλιστα σε κάθε πείραμα η χρήση ενός πίνακα συνδυασμών το οποίο θα μπορεί προσομιώνει την τυχαιότητα των συνδυασμών που μπορεί να προκύψουν.

4.1.5 Η μέθοδος σχεδιασμού πειραμάτων Taguchi

Τα βήματα της μεθόδου μπορούν να οργανωθούν ως εξής:

1. Προσδιορίζονται οι στόχοι της διαδικασίας, δηλαδή τα κριτήρια με βάση τα οποία θα γίνει η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Στην περίπτωση του σχεδιασμού ηλεκτρικών μηχανών τα κριτήρια αυτά είναι η μέση ροπή που παράγει η μηχανή, οι απώλειες που έχει (απώλειες πυρήνα και απώλειες λειτουργίας), η Η.Ε.Δ. που αναπτύσσει, η αυτεπαγωγή των τυλιγμάτων κ.α. Επίσης προσδιορίζεται αν θέλουμε την μεγιστοποίηση, την ελαχιστοποίηση ή την επίτευξη συγκριμένης τιμής για το κάθε κριτήριο.
2. Προσδιορισμός των σχεδιαστικών παραμέτρων που καθορίζουν τη διαδικασία. Κατά τη σχεδίαση ηλεκτρικών μηχανών τέτοιες παράμετροι είναι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της γεωμετρίας, η επιθυμητή πυκνότητα ρεύματος κ.α.
3. Η επιλογή του κατάλληλου ορθογώνιου πίνακα. Η επιλογή του κατάλληλου πίνακα καθορίζεται από το πλήθος των παραμέτρων που χρησιμοποιούμε καθώς και τα επιθυμητά επίπεδα διακύμανσής τους. Δηλαδή επιλέγουμε ποιές τιμές θα λαμβάνουν οι παράμετροι που εξετάζουμε.
4. Πραγματοποίηση των πειραμάτων και καταγραφή των αποτελεσμάτων.
5. Ανάλυση των δεδομένων μέσω στατιστικών μεθόδων και αξιοποίηση τους.



Εικόνα 22: Σχεδιάγραμμα ροής της μεθόδου σχεδιασμού πειραμάτων Taguchi

Το αποτέλεσμα πολλών διαφορετικών παραμέτρων στην χαρακτηριστική απόδοση σε μια περιορισμένο σύνολο πειραμάτων μπορεί να εξεταστεί με τη χρήση των ορθογώνιων πινάκων πειραματικού σχεδιασμού που προτείνει ο Taguchi. Μετά τον προσδιορισμό των παραμέτρων που επηρεάζουν μια διαδικασία, πρέπει να προσδιοριστούν τα επίπεδα στα οποία θα μεταβάλλονται. Η επιλογή των επιπέδων απαιτεί κατανόηση της διαδικασίας και δεν είναι μια αυτοματοποιημένη διαδικασία. Εάν η διαφορά μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης τιμής μιας παραμέτρου είναι μεγάλη, μπορούν να οριστούν περισσότερα επίπεδα τιμών. Αν το εύρος μιας παραμέτρου είναι μικρό, τότε μπορούμε να μειώσουμε τον αριθμό

των επιπέδων. Κάτι που πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη κατά τον προσδιορισμό του αριθμού των επιπέδων μιας παραμέτρου είναι το κόστος της διεξαγωγής πειραμάτων ή προσομοιώσεων. Τυπικά, επιλέγεται ο ίδιος αριθμός των επιπέδων για όλες τις παραμέτρους ώστε να είναι πιο εύκολη η επιλογή του κατάλληλου ορθογώνιου πίνακα. Στη συνέχεια παραθέτονται οι διαθέσιμοι συνδυασμοί.

		Αριθμός Παραμέτρων									
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Επίπεδα τιμών	2	L4	L4	L8	L8	L8	L8	L12	L12	L12	L12
	3	L9	L9	L9	L18	L18	L18	L18	L27	L27	L27
	4	L'16	L'16	L'16	L'16	L'32	L'32	L'32	L'32	L'32	X
	5	L25	L25	L25	L25	L25	L50	L50	L50	L50	L50

		Αριθμός Παραμέτρων									
		12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Επίπεδα τιμών	2	L16	L16	L16	L16	L32	L32	L32	L32	L32	L32
	3	L27	L27	L36	L36	L36	L36	L36	L36	L36	L36
	4	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	5	L50	X	X	X	X	X	X	X	X	X

		Αριθμός Παραμέτρων									
		22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Επίπεδα τιμών	2	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32
	3	L36	L36	X	X	X	X	X	X	X	X
	4	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	5	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Με “X” υποδηλώνεται ότι δεν υπάρχει πίνακας γι’ αυτό το συνδυασμό.

4.1.6 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου

Ένα πλεονέκτημα της μεθόδου Taguchi είναι ότι δίνει έμφαση σε μια μέση απόδοση μιας χαρακτηριστική τιμής κοντά στην τιμή-στόχο και όχι μια ακριβή, βελτιώνοντας έτσι την ποιότητα του προϊόντος δεδομένης της ύπαρξης κατασκευαστικών αστοχιών και σφαλμάτων. Επιπλέον, η μέθοδος Taguchi είναι μια απλή και εύκολα υλοποιήσιμη μέθοδος σε πολλές περιπτώσεις προβλημάτων που αντιμετωπίζει ένας μηχανικός, καθιστώντας το ένα ισχυρό και ταυτόχρονα απλό εργαλείο. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιοριστεί γρήγορα κάτω από το πεδίο ορισμού του ερευνητικού έργου- προβλήματος ή για να διαπιστωθούν προβλήματα σε μια διαδικασία παραγωγής, από στοιχεία που ήδη υπάρχουν. Επίσης, η μέθοδος Taguchi επιτρέπει την ανάλυση πολλών διαφορετικών παραμέτρων χωρίς να αυξάνεται δυσανάλογα ο αριθμός των απαιτούμενων πειραμάτων ή προσομοιώσεων.

Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου Taguchi είναι ότι τα αποτελέσματα είναι σχετικά καθώς δεν προκύπτει με απόλυτη ακρίβεια η επίδραση που έχει η μεταβολή μιας παραμέτρου στο τελικό αποτέλεσμα. Επίσης, δεδομένου ότι ορθογώνιοι πίνακες δεν δοκιμάσει όλους τους συνδυασμούς μεταβλητών, η μέθοδος αυτή δεν θα πρέπει να χρησιμοποιείται όταν απαιτείται από τη φύση του προβλήματος να εξετασθούν όλοι οι συνδυασμοί. Τέλος η μεθοδολογία Taguchi δεν μπορεί να βγάλει άμεσα συμπεράσματα για την αλληλεπίδραση μεταξύ των παραμέτρων σε όλα τα προβλήματα.

4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ (ANOVA)

4.2.1 Εισαγωγή

Η ανάλυση της διακύμανσης (ANalysis Of VAriance – ANOVA) είναι μια στατιστική μέθοδος, όπου σ' ένα σύνολο δεδομένων η μεταβλητότητα που υπάρχει διασπάται στις επιμέρους συνιστώσες της με σκοπό τον προσδιορισμό της σημαντικότητας των διαφορετικών πηγών προέλευσής της. Η μέθοδος αυτή έχει αναπτυχθεί από τον άγγλο στατιστικό Sir Ronald Aylmer Fisher (1890-1962). Η ANOVA περιλαμβάνει μία ομάδα στατιστικών μεθόδων που είναι κατάλληλες για την ανάλυση δεδομένων που προκύπτουν από πειραματικούς σχεδιασμούς.

Τα δεδομένα ενός δείγματος μπορούν να είναι αποτελέσματα παρατηρήσεων (observational sampling) ή σχεδιασμού πειραμάτων (designed sampling). Στην πρώτη κατηγορία ο ερευνητής απλά παρατηρεί τις τιμές που εμφανίζονται χωρίς να έχει δυνατότητα επέμβασης στις αντίστοιχες μεταβλητές. Αντίθετα, στη δεύτερη κατηγορία ο ερευνητής προσπαθεί να ελέγξει τα επίπεδα μιας ή περισσότερων ανεξάρτητων (independent) μεταβλητών προκειμένου να προσδιορίσει την επίδραση που έχουν πάνω στην υπό μελέτη μεταβλητή που καλείται εξαρτημένη (dependent) ή απόκριση (response). Για παράδειγμα, εξαρτημένη μπορεί να είναι η βαθμολογία στην εξέταση του μαθήματος, ο όγκος των πωλήσεων μιας επιχείρησης ή το συνολικό εισόδημα μιας οικογένειας κατά τη διάρκεια του έτους.

Στόχος κάθε στατιστικού πειράματος είναι ο προσδιορισμός της επίδρασης μιας ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών πάνω στην εξαρτημένη. Οι μεταβλητές αυτές αναφέρονται συνήθως σαν παράγοντες (factors) και μπορεί να είναι είτε ποσοτικές είτε ποιοτικές. Για παράδειγμα, θα μπορούσαμε να διερευνήσουμε την επίδραση που έχει ο ποιοτικός παράγοντας “φύλο” στη βαθμολογία ενός μαθήματος ή ο ποσοτικός παράγων “πλήθος καταστημάτων πώλησης” στον όγκο των πωλήσεων. Εναλλακτικά, θα μπορούσε να ήταν προς διερεύνηση η επίδραση που έχουν πάνω στην εξαρτημένη, περισσότερες από μια ανεξάρτητες μεταβλητές όπως ο ποσοτικός παράγοντας “πλήθος εργαζομένων” και ο ποιοτικός παράγοντας “πόλη διαμονής” πάνω στο οικογενειακό εισόδημα.

Οι τιμές του παράγοντα που προσδιορίζονται στο πείραμα λέγονται επίπεδα (levels). Για παράδειγμα, τα επίπεδα για τον ποιοτικό παράγοντα φύλο είναι “αρσενικό” - “θηλυκό”, ενώ για τον ποσοτικό παράγοντα πλήθος καταστημάτων πώλησης είναι “θετικός ακέραιος”. Σε ένα πείραμα με ένα παράγοντα οι μεταχειρίσεις (treatments) του πειράματος

είναι τα επίπεδα του παράγοντα. Για παράδειγμα, αν στο πείραμα βαθμολογία ενός παράγοντα μας ενδιαφέρει η επίδραση του παράγοντα “φύλο” τότε οι μεταχειρίσεις του πειράματος είναι αρσενικό – θηλυκό. Σε ένα πείραμα με δύο ή περισσότερους παράγοντες οι μεταχειρίσεις είναι οι συνδυασμοί παραγόντων-επιπέδων.

4.2.2 Η κατανομή F

Αν Y_1 και Y_2 είναι τυχαίες ανεξάρτητες μεταβλητές από την κατανομή χ^2 με βαθμούς ελευθερίας n_1 και n_2 αντίστοιχα, τότε το κλάσμα

$$W = \frac{Y_1/n_1}{Y_2/n_2}$$

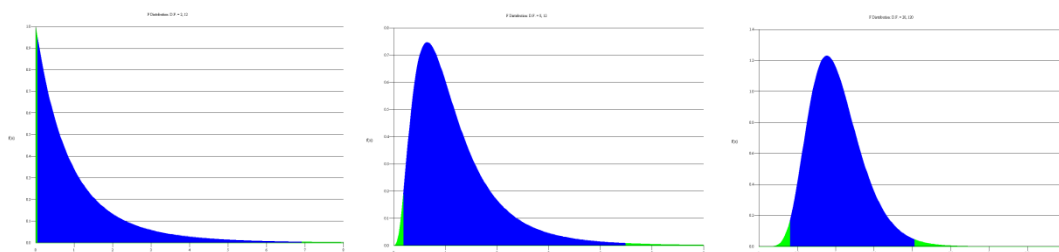
είναι τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί μία κατανομή την οποία μελέτησε και ανέπτυξε ο Sir R.A.Fisher και η οποία προς τιμή του συμβολίζεται με F. Ο Fisher στην προσπάθειά του να μελετήσει τις διαφορές στην παραγωγή της σοδειάς ανέπτυξε τη νέα κατανομή σαν λόγο δύο ανεξαρτήτων χ^2 . Η κατανομή αυτή χαρακτηρίζεται από δυο βαθμούς ελευθερίας, n_1 για τον αριθμητή και n_2 για τον παρονομαστή γι’ αυτό γράφουμε F_{n_1, n_2} . Επειδή η τυχαία μεταβλητή χ^2 είναι πάντα θετική, το ίδιο θα ισχύει και για την F. Η οικογένεια των κατανομών F_{n_1, n_2} είναι μονοκόρυφη και ασύμμετρη προς τα δεξιά, όπως προκύπτει από το διάγραμμα 4.1, με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας

$$f(x) = \frac{\Gamma\left(\frac{n_1+n_2}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n_1}{2}\right)\Gamma\left(\frac{n_2}{2}\right)} \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^{\frac{n_1}{2}} \frac{x^{\frac{n_1}{2}-2}}{\left(1+\frac{n_1x}{n_2}\right)^{\frac{n_1+n_2}{2}}}, 0 < x < \infty,$$

όπου

$$\Gamma(n) = (n-1)! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdots (n-1)$$

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1



Κατανομές: $F_{2,12}$, $F_{8,12}$ και $F_{25,120}$

Μία αναγκαία συνθήκη για την ύπαρξη της κατανομής F είναι ότι τα δείγματα θα πρέπει να ακολουθούν την κανονική κατανομή. Όμως, σε περιπτώσεις που η δειγματικές κατανομές αποκλίνουν από την κανονική, η δοκιμασία F μένει σχετικά ανεπηρέαστη, εφ' όσον οι δύο πληθυσμοί είναι τουλάχιστον μονοκόρυφοι και τα μεγέθη των δειγμάτων είναι παρόμοια. Κάτω από αυτές τις προϋποθέσεις η δοκιμασία που βασίζεται στην κατανομή F χαρακτηρίζεται σαν εύρωστη (robust).

Μερικές φορές υπάρχει η ανάγκη να συγκρίνουμε δυο διακυμάνσεις και για το σκοπό αυτό υπολογίζουμε το κλάσμα σ_1^2/σ_2^2 . Αν οι διακυμάνσεις είναι ίσες τότε ο λόγος τους θα είναι 1. Συνήθως όμως στην πράξη οι διακυμάνσεις των πληθυσμών είναι άγνωστες, οπότε οι συγκρίσεις γίνονται με βάση τις δειγματικές διακυμάνσεις. Έτσι, αν s_1^2 και s_2^2 είναι οι δειγματικές διακυμάνσεις από δύο δείγματα με n_1 και n_2 παρατηρήσεις αντίστοιχα που ακολουθούν την κανονική κατανομή, τότε το κλάσμα

$$VR = \frac{s_1^2/\sigma_1^2}{s_2^2/\sigma_2^2}$$

(λόγος δύο χ^2) ακολουθεί την κατανομή F . Κάτω από την υπόθεση

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

το στατιστικό

$$VR = \frac{s_1^2}{s_2^2}$$

ακολουθεί την κατανομή $F_{(n_1-1),(n_2-1)}$. Αν τα δείγματα προέρχονται από τον ίδιο πληθυσμό ή από πληθυσμούς με ίσες διακυμάνσεις, τότε το VR θα πρέπει να είναι κοντά στο 1. Η κατανομή F προσδιορίζει τα όρια της ανοχής μας για το πόσο μεγάλο ή μικρό θα πρέπει να είναι το κλάσμα VR προκειμένου να συμπεράνουμε ότι οι δειγματικές διακυμάνσεις διαφέρουν σημαντικά.

Τα άνω α εκατοστιαία σημεία της κατανομής F_{n_1,n_2} συμβολίζονται με $F_{n_1,n_2,\alpha}$ και δίνονται από στατιστικούς πίνακες. Οι βαθμοί ελευθερίας για τον αριθμητή εμφανίζονται πάνω από τις στήλες, ενώ οι βαθμοί ελευθερίας για τον παρονομαστή εμφανίζονται δίπλα από τις γραμμές. Επειδή η κατανομή F δεν είναι συμμετρική, προκειμένου να υπολογίσουμε τα κάτω α εκατοστιαία σημεία της χρησιμοποιούμε την αντίστροφη ιδιότητα της F. Σύμφωνα με την ιδιότητα αυτή η τιμή της κάτω ουράς προκύπτει από την αντίστοιχη της άνω ουράς σύμφωνα με τη σχέση

$$F_{n_1,n_2, \text{κάτω } \alpha} = \frac{1}{F_{n_2,n_1, \text{άνω } \alpha}}$$

όπου θα πρέπει να προσέξουμε την αντιστροφή των βαθμών ελευθερίας.

Ανάλυση διακύμανσης

Κατ' αρχήν η ANOVA μας δίνει τη δυνατότητα να ελέγξουμε την υπόθεση ότι οι μέσες τιμές διαφόρων πληθυσμών είναι ίσες. Κάτω από το πλαίσιο αυτό μπορούμε να θεωρήσουμε την ANOVA σαν προέκταση του ελέγχου t για την σύγκριση των μέσων τιμών δυο πληθυσμών. Υπάρχουν όμως δύο λόγοι για τους οποίους χρησιμοποιούμε την ANOVA έναντι του ελέγχου t . Έχουμε αφενός συντομότερη διαδικασία ανάλυσης (αφού στον έλεγχο t πρέπει να ελέγξουμε όλους τους συνδυασμούς ανά δύο) και αφετέρου μεγαλύτερη ακρίβεια.

Από τους υπάρχοντες πειραματικούς σχεδιασμούς ο απλούστερος είναι εκείνος που χαρακτηρίζεται από την ανάλυση της διακύμανσης κατά ένα παράγοντα (one factor ANOVA) και καλείται πλήρως τυχαιοποιημένος σχεδιασμός (completely randomized design). Η θεωρητική ανάλυση των δεδομένων μας βασίζεται στα παρακάτω βήματα:

(α) Προσδιορισμός του μοντέλου

Στη γενική περίπτωση υποθέτουμε ότι έχουμε k ομάδες με n_j παρατηρήσεις ανά ομάδα για $j=1,2,...,k$. Τα δεδομένα του δείγματος μπορούν να ταξινομηθούν στον παρακάτω Πίνακα 4.2

Πίνακας 4.2 Ομάδες (Μεταχειρίσεις)

	1	2	3	...	k	
	X_{11}	X_{12}	X_{13}	...	X_{1k}	
	X_{21}	X_{22}	X_{23}	...	X_{2k}	
	X_{31}	X_{32}	X_{33}	...	X_{3k}	
	
	
	
	$X_{n_1 1}$	$X_{n_2 2}$	$X_{n_3 3}$...	$X_{n_k k}$	
Σύνολα	T_1	T_2	T_3	...	T_k	T
Μέσοι όροι	\bar{X}_1	\bar{X}_2	\bar{X}_3		\bar{X}_k	\bar{X}

Διάταξη παρατηρήσεων του πλήρως τυχαιοποιημένου σχεδιασμού

Όπου: X_{ij} είναι η i παρατήρηση της j ομάδας

$T_j = \sum_{i=1}^{n_j} X_{ij}$: άθροισμα των παρατηρήσεων της j στήλης

$\bar{X}_j = \frac{T_j}{n_j}$: αριθμητικός μέσος της j στήλης

$T = \sum_{j=1}^k T_j = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} X_{ij}$: άθροισμα όλων των παρατηρήσεων

$X = \frac{T}{N}$, $N = \sum_{j=1}^k n_j$

Υποθέτουμε ότι για την j ομάδα οι παρατηρήσεις X_{ij} έχουν την μορφή

$$X_{ij} = \mu_j + e_{ij} \quad (1)$$

όπου μ_j είναι ο μέσος όρος του πληθυσμού της j ομάδας και e_{ij} είναι το σφάλμα, για $i=1,2,3,\dots,n_j$ και $j=1,2,\dots,k$. Με τον όρο σφάλμα εννοούμε τη μη ελεγχόμενη διακύμανση που υπάρχει στον πληθυσμό. Λύνοντας την (1) ως προς e_{ij} έχουμε

$$e_{ij} = X_{ij} - \mu_j \quad (2)$$

Ο καθολικός μέσος όρος (grand mean) μ όλων των παρατηρήσεων είναι

$$\mu = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \mu_j \quad (3)$$

Με την ίδια λογική που το X_{ij} διαφέρει από το μ_j μπορούμε να υποθέσουμε ότι το μ_j διαφέρει από το μ κατά ένα ποσό

$$\tau_j = \mu_j - \mu \quad (4)$$

που εκφράζει την επίδραση (effect) του γεγονότος ότι το μ_j υπολογίστηκε από τις παρατηρήσεις της j ομάδας. Από τη σχέση (4) έχουμε ότι

$$\mu_j = \mu + \tau_j \quad (5)$$

Συνδυάζοντας την (1) με την (5) παίρνουμε την τελική έκφραση

$$X_{ij} = \mu + \tau_j + e_{ij} \quad (6)$$

για $i=1,2,3,\dots,n_j$ και $j=1,2,\dots,k$. Συνοψίζοντας από την (6) προκύπτει ότι η παρατήρηση X_{ij} είναι άθροισμα τριών ποσοτήτων, του καθολικού μέσου, της επίδρασης της ομάδας (μεταχείρισης) και του σφάλματος. Για το λόγο αυτό το μοντέλο (6) λέγεται προσθετικό (additive).

(β) Υποθέσεις του μοντέλου

Οι υποθέσεις που διέπουν το μοντέλο (6) είναι:

1. Οι παρατηρήσεις X_{ij} κάθε ομάδας αποτελούν k ανεξάρτητα δείγματα από αντίστοιχους πληθυσμούς.
2. Καθένας από τους k πληθυσμούς ακολουθεί την κανονική κατανομή με μέση τιμή μ_j και κοινή διακύμανση σ^2 , για $j=1,2,\dots,k$.
3. Οι επιδράσεις των ομάδων (μεταχειρίσεων) τ_j είναι σταθεροί αριθμοί που ικανοποιούν τη σχέση

$$\sum_{j=1}^k \tau_j = 0$$

Από τη σχέση (2) και τις υποθέσεις 1-3 προκύπτει ότι τα σφάλματα e_{ij} είναι ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές από την κανονική κατανομή με μέση τιμή 0 και διακύμανση σ^2 .

(γ) Έλεγχος Υποθέσεων

Μπορούμε τώρα να δοκιμάσουμε την μηδενική υπόθεση ότι όλες οι ομάδες έχουν ίσες μέσες τιμές

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$$

με εναλλακτική, H_1 όλα τα μ_j δεν είναι ίσα.

Όταν οι μέσες τιμές των πληθυσμών είναι ίσες, τότε οι επιδράσεις τ_j των ομάδων είναι μηδέν. Κατά συνέπεια οι ισοδύναμες υποθέσεις που μπορούμε να δοκιμάσουμε είναι

$$H_0 : \tau_j = 0, j = 1, \dots, k$$

με εναλλακτική, H_1 όλα τα τ_j δεν είναι μηδέν.

(δ) Υπολογισμός των αθροισμάτων των τετραγώνων

Ορίσαμε την ANOVA σαν μία διαδικασία κατά την οποία η ολική μεταβλητότητα που υπάρχει στα δεδομένα διασπάται σε επιμέρους συνιστώσες που οφείλονται σε διαφορετικές πηγές προέλευσης. Ο όρος μεταβλητότητα αναφέρεται στο άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων των παρατηρήσεων από την μέση τιμή τους που για συντομία καλείται άθροισμα τετραγώνων (Sum of Squares – SS).

Το ολικό άθροισμα των τετραγώνων

Αρχικά υπολογίζουμε το ολικό άθροισμα τετραγώνων (total sum of squares) των αποκλίσεων των παρατηρήσεων από τον καθολικό μέσο

$$SS_{\text{total}} = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X}_{\square})^2 \quad (7)$$

όπου με το $\sum_{i=1}^{n_j}$ αθροίζουμε τις τετραγωνισμένες αποκλίσεις μέσα σε κάθε ομάδα, ενώ με το $\sum_{j=1}^k$ αθροίζουμε τα αποτελέσματα των k ομάδων. Στην πραγματικότητα το ολικό άθροισμα τετραγώνων αντιστοιχεί στον αριθμητή που υπάρχει στον τύπο υπολογισμού της δειγματικής διακύμανσης:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{N - 1}$$

ενός τυχαίου δείγματος με N παρατηρήσεις.

Το ολικό άθροισμα τετραγώνων διασπάται στις επιμέρους συνιστώσες του, χρησιμοποιώντας την ισοδύναμη έκφραση

$$\begin{aligned} SS_{\text{total}} &= \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} [(X_{ij} - \bar{X}_{\square j}) + (\bar{X}_{\square j} - \bar{X}_{\square})]^2 \\ &= \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X}_{\square j})^2 + 2 \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X}_{\square j})(\bar{X}_{\square j} - \bar{X}_{\square}) + \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (\bar{X}_{\square j} - \bar{X}_{\square})^2 \end{aligned} \quad (8)$$

Ο μεσαίος όρος της (8) γράφεται:

$$2 \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X}_{\square j}) \sum_{j=1}^k (\bar{X}_{\square j} - \bar{X}_{\square})$$

απ' όπου προκύπτει ότι είναι ίσος με μηδέν διότι

$$\sum_{i=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X}_{\square j}) = 0$$

Τελικά η (8) γίνεται

$$SS_{\text{total}} = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X}_{\square j})^2 + \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (\bar{X}_{\square j} - \bar{X}_{\square})^2$$

ή ισοδύναμα

$$SS_{\text{total}} = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X}_{\square j})^2 + \sum_{j=1}^k n_j (\bar{X}_{\square j} - \bar{X}_{\square})^2 \quad (9)$$

Στην περίπτωση που το πλήθος των παρατηρήσεων είναι το ίδιο με n για όλες τις ομάδες η (9) γίνεται

$$SS_{\text{total}} = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X}_{\square j})^2 + n \sum_{j=1}^k (\bar{X}_{\square j} - \bar{X}_{\square})^2$$

Το άθροισμα των τετραγώνων μέσα στις ομάδες

Το πρώτο άθροισμα στο δεξιό πλευρό της (9) υπολογίζει αρχικά το άθροισμα των τετραγωνισμένων αποκλίσεων των παρατηρήσεων από τον μέσο κάθε ομάδας και κατόπιν αθροίζει τα επιμέρους αποτελέσματα για όλες τις ομάδες. Το τελικό αποτέλεσμα λέγεται άθροισμα τετραγώνων μέσα στις ομάδες (within groups sum of squares)

$$SS_{\text{within}} = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X}_{\square j})^2 \quad (10)$$

Το άθροισμα των τετραγώνων μεταξύ των ομάδων

Το δεύτερο άθροισμα στο δεξιό πλευρό της (9) υπολογίζει αρχικά για κάθε ομάδα την τετραγωνισμένη απόκλιση του μέσου της ομάδας από τον καθολικό μέσο και κατόπιν πολλαπλασιάζει το αποτέλεσμα με το πλήθος των παρατηρήσεων της ομάδας. Τα επιμέρους αποτελέσματα αθροίζονται για όλες τις ομάδες και το τελικό αποτέλεσμα λέγεται άθροισμα τετραγώνων μεταξύ ομάδων (between groups sum of squares)

$$SS_{\text{between}} = \sum_{j=1}^k n_j (\bar{X}_{\square j} - \bar{X}_{\square})^2$$

και στην περίπτωση που όλες οι ομάδες έχουν η παρατηρήσεις προκύπτει

$$SS_{\text{between}} = n \sum_{j=1}^k (\bar{X}_{\square j} - \bar{X}_{\square})^2 \quad (11)$$

Συνοψίζοντας, έχουμε:

$$SS_{\text{total}} = SS_{\text{within}} + SS_{\text{between}}$$

(ε) Ο πίνακας ανάλυσης της διακύμανσης

Από τα αθροίσματα των τετραγώνων μπορούμε τώρα να πάρουμε δύο εκτιμητές της πληθυσμιακής διακύμανσης σ^2 . Αποδεικνύεται ότι όταν οι πληθυσμιακές μέσες τιμές των ομάδων είναι ίσες, τότε τα SS_{within} και SS_{between} όταν διαιρεθούν με τους αντίστοιχους βαθμούς ελευθερίας δίνουν αμερόληπτους εκτιμητές για το σ^2 .

Ο πρώτος εκτιμητής του σ^2

Μέσα σε κάθε ομάδα το μέσο τετράγωνο (mean square)

$$MS_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X}_{\square j})^2}{n_j - 1}$$

δίνει ένα αμερόληπτο εκτιμητή για την διακύμανση της ομάδας. Κάτω από την υπόθεση ότι οι διακυμάνσεις είναι ίσες μπορούμε να συγχωνεύσουμε τους k εκτιμητές και να πάρουμε ένα εκτιμητή για την διακύμανση μέσα στις ομάδες (within groups variance) σύμφωνα με τον τύπο του μέσου τετραγώνου

$$MS_{\text{within}} = \frac{\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X}_{\square j})^2}{\sum_{j=1}^k (n_j - 1)} \quad (12)$$

Ο δεύτερος εκτιμητής του σ^2

Ο δεύτερος εκτιμητής του σ^2 προκύπτει από τον γνωστό τύπο για την διακύμανση του δειγματικού μέσου ενός δείγματος με n παρατηρήσεις

$$\sigma_{\bar{X}}^2 = \frac{\sigma^2}{n}$$

απ' όπου παίρνουμε

$$\sigma^2 = n\sigma_{\bar{X}}^2.$$

Ένας αμερόληπτος εκτιμητής του σ_x^2 που είναι η διακύμανση μεταξύ των ομάδων (between groups variance) προκύπτει από το μέσο τετράγωνο

$$MS_{\bar{X}} = \frac{\sum_{j=1}^k (\bar{X}_{\cdot j} - \bar{X}_{\square})^2}{k-1}$$

συνεπώς στην ειδική περίπτωση που όλες οι ομάδες έχουν n παρατηρήσεις ένας αμερόληπτος εκτιμητής για το σ^2 είναι

$$MS_{\text{between}} = \frac{n \sum_{j=1}^k (\bar{X}_{\square j} - \bar{X}_{\square})^2}{k-1} \quad (13)$$

Στη γενική περίπτωση που το πλήθος των παρατηρήσεων των ομάδων δεν είναι ίδιο ο αμερόληπτος εκτιμητής για το σ^2 έχει τη μορφή

$$MS_{\text{between}} = \frac{\sum_{j=1}^k n_j (\bar{X}_{\square j} - \bar{X}_{\square})^2}{k-1}$$

Ο λόγος των διακυμάνσεων

Όταν η μηδενική υπόθεση $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$ δεν απορρίπτεται, τότε αναμένεται οι δύο εκτιμητές του σ^2 να είναι περίπου ίσοι. Όταν η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται, έτσι ώστε οι μέσες τιμές των πληθυσμών να διαφέρουν, τότε αναμένεται το MS_{between} να είναι μεγαλύτερο από το MS_{within} . Για το λόγο αυτό και προκειμένου να συγκρίνουμε τους δύο εκτιμητές του σ^2 υπολογίζουμε το λόγο των διακυμάνσεων (Variance Ratio - VR)

$$VR = \frac{MS_{\text{between}}}{MS_{\text{within}}}$$

Όταν οι δύο εκτιμητές είναι περίπου ίσοι το VR είναι κοντά στο 1 και το γεγονός αυτό αποτελεί κριτήριο μη απόρριψης της H_0 . Στην περίπτωση που το MS_{between} είναι μεγαλύτερο από το MS_{within} τότε το VR είναι μεγαλύτερο από το 1 και το γεγονός αυτό είναι το κριτήριο μη αποδοχής της H_0 .

Έλεγχος F

Η ύπαρξη του τυχαίου σφάλματος που οφείλεται στη δειγματοληψία δεν επιτρέπει στα MS_{between} και MS_{within} να είναι ίσα ακόμη και στην περίπτωση που η μηδενική υπόθεση $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$ είναι αληθινή. Έτσι, θα πρέπει να έχουμε ένα μέτρο ανοχής για το πόσο μεγάλη θα πρέπει να είναι η παρατηρούμενη διαφορά προκειμένου να συμπεράνουμε ότι δεν οφείλεται μόνο σε τυχαίο σφάλμα. Λύση σε αυτό μας δίνει η κατανομή δειγματοληψίας του λόγου των διακυμάνσεων

$$VR = \frac{MS_{\text{between}}}{MS_{\text{within}}}$$

Επειδή το VR είναι λόγος δύο χ^2 τυχαίων μεταβλητών, ακολουθεί την κατανομή F με βαθμούς ελευθερίας αριθμητή (k-1) και βαθμούς ελευθερίας παρονομαστή

$$\sum_{j=1}^k (n_j - 1) = \sum_{j=1}^k n_j - k = N - k$$

Ο προσδιορισμός του επιπέδου σημαντικότητας α προσδιορίζει την κριτική τιμή του F και τις περιοχές αποδοχής και απόρριψης του ελέγχου. Τα σχετικά συνοψίζονται στον παρακάτω Πίνακα 3.3 ANOVA.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3

Πηγή προέλευσης	Άθροισμα τετραγώνων	Βαθμοί ελευθερίας	Μέσο τετράγωνο	Λόγος διακυμάνσεων
Μεταξύ ομάδων	$SS_{\text{between}} = \sum_{j=1}^k n_j (\bar{X}_{\square j} - \bar{X}_{\square})^2$	$k - 1$	$MS_{\text{between}} = \frac{\sum_{j=1}^k n_j (\bar{X}_{\square j} - \bar{X}_{\square})^2}{k - 1}$	$VR = \frac{MS_{\text{between}}}{MS_{\text{within}}}$
Μέσα στις ομάδες	$SS_{\text{within}} = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X}_{\square j})^2$	$N - k$	$MS_{\text{within}} = \frac{\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X}_{\square j})^2}{\sum_{j=1}^k (n_j - 1)}$	
Σύνολο	$SS_{\text{total}} = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X}_{\square})^2$	$N - 1$		

Πίνακας ANOVA για τον πλήρως τυχαίοπονημένο σχεδιασμό (κατά ένα παράγοντα)

Η απόφαση

Κάτω από τη μηδενική υπόθεση $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$ το VR ακολουθεί την κατανομή F με βαθμούς ελευθερίας αριθμητή $(k-1)$ και βαθμούς ελευθερίας παρονομαστή $(N-k)$. Για συγκεκριμένο επίπεδο σημαντικότητας α συγκρίνουμε την υπολογισμένη τιμή VR με την κριτική τιμή της κατανομής $F_{(k-1),(N-k),\alpha}$.

Όταν

$$VR > F_{(k-1),(N-k),\alpha}$$

δεν μπορούμε να αποδεχθούμε την H_0 , με βάση τα δεδομένα του δείγματος, όπου $F_{(k-1),(N-k),\alpha}$ είναι το $(1-\alpha)100$ εκατοστιαίο σημείο της κατανομής $F_{(k-1),(N-k)}$ για το οποίο ισχύει

$$P(F_{(k-1),(N-k)} > F_{(k-1),(N-k),\alpha}) = \alpha$$

Η διακύμανση που υπάρχει στα δεδομένα μεταξύ των ομάδων (στηλών) ερμηνεύεται (explained) από το γεγονός ότι οι ομάδες ενδεχομένως να προέρχονται από διαφορετικούς πληθυσμούς. Η διακύμανση μέσα στις ομάδες είναι η εναπομένουσα διακύμανση (residual variance) που μένει ανερμήνευτη (unexplained). Συνεπώς

$$VR = \frac{\text{ερμηνευμένη διακύμανση}}{\text{ανερμήνευτη διακύμανση}}$$

Το γεγονός αυτό μας παροτρύνει να αναπτύξουμε διαδικασίες προκειμένου να ενδυναμώσουμε τη δοκιμασία F . Αν για παράδειγμα ένα σημαντικό ποσοστό της ανερμήνευτης διακύμανσης οφείλεται σε υπάρχουσες διαφορές στις γραμμές, τότε απομονώνοντας την διακύμανση αυτή θα είχε σαν αποτέλεσμα την μείωση του παρονομαστή στο VR . Με τον τρόπο αυτό προκύπτει ένα μεγαλύτερο VR το οποίο ενδυναμώνει τη δοκιμασία για την ύπαρξη διαφορών μεταξύ των στηλών. Συνεπώς η ικανότητα προσδιορισμού κατά πόσο ένας παράγοντας (στήλες) είναι σημαντικός μπορεί να ενισχυθεί με την εισαγωγή και ενός δευτέρου παράγοντα (γραμμές) προκειμένου να ερμηνευθεί η εναπομένουσα διακύμανση. Έτσι έχουμε την ανάλυση διακύμανσης κατά δύο παράγοντες (two way ANOVA). Ο αντίστοιχος πειραματικός σχεδιασμός που προκύπτει λέγεται τυχαιοποιημένος κατά ομάδες (randomized block design).

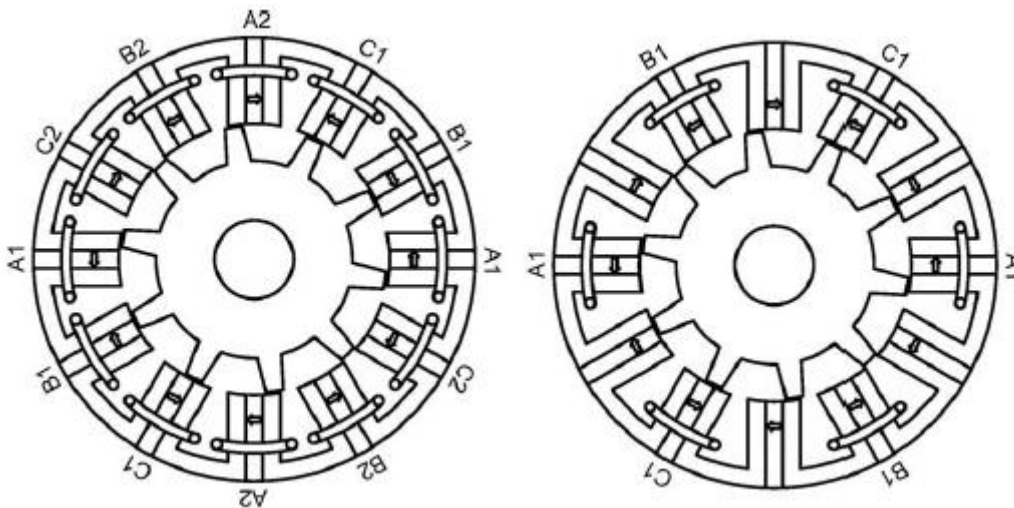
4.3 Βιβλιογραφία κεφαλαίου

- [1] Rosa, Jorge Luiz; Robin, Alain; Silva, M. B.; Baldan, Carlos Alberto; Peres, Mauro Pedro. "Electrodeposition of copper on titanium wires: Taguchi experimental design approach". *Journal of Materials Processing Technology* **209**: 1181–1188.
- [2] Rao, Ravella Sreenivas; C. Ganesh Kumar; R. Shetty Prakasham; Phil J. Hobbs (March 2008). "[The Taguchi methodology as a statistical tool for biotechnological applications: A critical appraisal](#)". *Biotechnology Journal* **3** (4): 510–523.
- [3] Rao, R. Sreenivas; R.S. Prakasham, K. Krishna Prasad, S. Rajesham, P.N. Sarma, L. Venkateswar Rao (April 2004). "Xylitol production by *Candida* sp.: parameter optimization using Taguchi approach". *Process Biochemistry* **39** (8): 951–956.
- [4] Selden, Paul H. (1997). *Sales Process Engineering: A Personal Workshop*. Milwaukee, Wisconsin: ASQ Quality Press. p. 237. [ISBN 0-87389-418-9](#)
- [5] [Logothetis, N.](#) and [Wynn, H. P.](#) (1989). *Quality Through Design: Experimental Design, [Off-line Quality Control](#), and Taguchi's Contributions*. Oxford University Press, Oxford Science Publications. pp. 464+xi.

Κεφάλαιο 5: Μηχανή Εναλλασσόμενης Ροής Τοπολογία τύπου «πυρήνα C»

5.1 Εισαγωγή

Η τοπολογία τύπου πυρήνα C είναι η πλέον κοινότυπη τοπολογία τριφασικής μηχανής εναλλασσόμενης ροής. Στην εικόνα 23 μπορεί να δει κανείς τα βασικά σχέδια αυτής της τοπολογίας.



Εικόνα 23: Σχέδια μηχανών εναλλασσόμενης ροής. Στα αριστερά αναπαριστάται η περίπτωση που το κάθε πόλος τυλίγεται από ένα πηνίο του τυλίγματος τυμπάνου, ενώ δεξιά έχουμε περιέλιξη μόνο των μισών πόλων.

Παίρνει το όνομα της από το σχήμα των ελασμάτων μαγνητικής λαμαρίνας του στάτη το οποίο μοιάζει με το γράμμα «C» του αγγλικού αλφαβήτου. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2 η τοπολογία αυτή παρουσιάζει ενδιαφέρον ως προς την απλότητα της κατασκευής και ως προς την υψηλή πυκνότητα ισχύος όταν χρησιμοποιούνται μόνιμοι μαγνήτες ως διέγερση. Αντίθετα, στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί τύλιγμα διέγερσης, αυτό καταλαμβάνει σημαντικό μέρος των αυλάκων του στάτη μειώνοντας το διαθέσιμο χώρο και επιβάλλοντας έτσι μείωση των σπειρών του στάτη. Δεδομένου ότι αυτές οι μηχανές έχουν αναπτυχθεί ως εναλλακτικές για εφαρμογές σε περιβάλλον με υψηλή θερμοκρασία είναι υψηλή οι πολλές σπείρες σε κάθε πηνίο χρειάζονται προκειμένου να είναι μικρή η πυκνότητα ρεύματος αλλά να παράγεται παράλληλα η επιθυμητή ροπή.



Εικόνα 24: Ανάλυση των μερών της Μηχανής Εναλλασσόμενης Ροής Τοπολογία τύπου «πυρήνα C». Από αριστερά προς τα δεξιά διακρίνονται, ο δρομέας, τα τυλίγματα, οι μαγνήτες και ο στάτης.

Η τοπολογία που τυλίγονται μόνο οι μισοί πόλοι της μηχανής εμφανίστηκε ως εναλλακτική που προσφέρει φυσική, ηλεκτρική και θερμική απομόνωση μεταξύ των τυλιγμάτων αυξάνοντας έτσι την αξιοπιστία της μηχανής. Ιδιαίτερα σε εφαρμογές όπως οι αεροπορικές τα χαρακτηριστικά αυτά δεν είναι απλά επιθυμητά αλλά απαραίτητα. Γι' αυτό επιλέξαμε να εξετάσουμε μόνο αυτή την τοπολογία.

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσεται η μεθοδολογία και τα βήματα που έγιναν προκειμένου να σχεδιαστεί μια μηχανή η οποία θα πληρεί τα επιθυμητά χαρακτηριστικά .

5.2 Προκαταρκτική Σχεδίαση

Πριν προχωρήσουμε στη σχεδίαση της μηχανής πρέπει να συνοψίσουμε τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της τα οποία είναι:

- Εξωτερική Διάμετρος: $D_{out.} = 75 \text{ mm}$
- Ενεργό μήκος: $L = 117 \text{ mm}$
- Ονομαστική Ταχύτητα περιστροφής: $n = 7500 \text{ ΣΑΛ}$
- Ελάχιστη Μέση Ροπή: $T_{μέση} = 1,8 \text{ Nm}$
- Μήκος Διακένου: 1mm
- $J_{rms} = 2 \text{ A/mm}^2$

Η πρώτη κρίσιμη επιλογή που πρέπει να γίνει αφορά των αριθμό των φάσεων. Η επιλογή αριθμού φάσεων που είναι πολλαπλάσιο του τρία είναι η συνηθέστερη στις περισσότερες εφαρμογές. Παράλληλα το μικρό μέγεθος της μηχανής είναι ανασταλτικός παράγοντας ως προς την επιλογή μεγάλου αριθμού φάσεων. Επομένως επιλέγεται αριθμός φάσεων:

$$m = 3$$

Η επόμενη κρίσιμη επιλογή που πρέπει να γίνει αφορά των αριθμό των πόλων δρομέα και στάτη. Με βάση μελέτες που έχουν γίνει [1] για τις μηχανές εναλλασσόμενης ροής ο αριθμός των πόλων δρομέα και ο αντίστοιχος αριθμός για το στάτη πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά, χωρίς ποτέ να μπορούν να γίνουν ίσοι. Ο λόγος που δεν μπορούν να γίνουν ίσοι είναι ότι στην περίπτωση αυτή η χάνεται η ασυμμετρία την οποία

εκμεταλλευόμαστε προκειμένου να παράξουμε σύγχρονη ροπή και αυξάνονται δραματικά οι ταλαντώσεις ροπής. Η επιλογή του αριθμού πόλων δρομέα επίσης επηρεάζει και την ηλεκτρική συχνότητα. Μάλιστα, μιας και η μηχανική ταχύτητα περιστροφής είναι απόλυτα συγκεκριμένη, η ηλεκτρική συχνότητα θα προσδιοριστεί από τον αριθμό των πόλων δρομέα. Όμως οι απώλειες πυρήνα αυξάνονται τουλάχιστον τετραγωνικά σε σχέση με την αύξηση της συχνότητας. Τέλος οι εξωτερικές διαστάσεις αποτελούν όριο στη αύξηση του αριθμού των πόλων καθώς όσο αυξάνεται ο αριθμός των πόλων μειώνονται το πάχος προκειμένου να χωρέσουν σε περιορισμένο χώρο.

Με βάση τα παραπάνω αποφασίστηκε να εξεταστούν οι εξής συνδυασμοί πόλων στάτη και δρομέα και με κριτήριο την επίδοσή τους σε ροπή να επιλεγεί ο καλύτερος. Οι συνδυασμοί που θα εξετασθούν είναι:

Αριθμός Πόλων Στάτη N_s	Αριθμός Πόλων Δρομέα N_r
6	5
6	7
12	10
12	11
12	13
12	14

Για τους προαναφερθείσες συνδυασμούς ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία προκαταρκτικής σχεδίασης.

Προσδιορίστηκε η συχνότητα χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$f_e = N_r \cdot f_m$$

Στη συνέχεια επιλέγουμε την μαγνητική φόρτιση ίση με:

$$\bar{B} = 0.75 T$$

Θεωρώντας γωνία μεταξύ της εφαπτομενικής συνιστώσας και της ακτινικής συνιστώσας 45° έχουμε:

$$B_n = B_t = \bar{B} \cdot \sin(45^\circ) = 0,75 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cong 0,53 T$$

Από την βιβλιογραφία γνωρίζουμε ότι γι' αυτές τις μηχανές ισχύει[2]:

$$T = \frac{3}{2} \cdot N_r \cdot \varphi_{\text{πόλου}} \cdot I_{rms}$$

Επίσης γνωρίζουμε ότι:

$$\varphi_{\text{πόλου}} = B_n \cdot S_{\text{πόλου}} = B_n \cdot L \cdot \frac{\pi \cdot D_g}{N_s}$$

Η ηλεκτρική φόρτιση δίνεται από τη σχέση[2]:

$$A = \frac{N_t I_{rms}}{\pi \cdot D_g}$$

Αφού επιλέξουμε και την ηλεκτρική φόρτιση μπορούμε να προσδιορίσουμε τη διάμετρο που βρίσκεται το διάκενο:

$$D_g = \sqrt{\frac{2 \cdot T \cdot N_s \cdot N_t}{3 \cdot \pi^2 \cdot A \cdot B_n}}$$

Για να συνεχιστεί η αρχική διαστασιολόγηση απαιτείται να ορίσουμε το επίπεδο τάσης που θέλουμε να λειτουργεί η μηχανή. Επιλέγουμε λοιπόν $V_{rms} = 30 V$

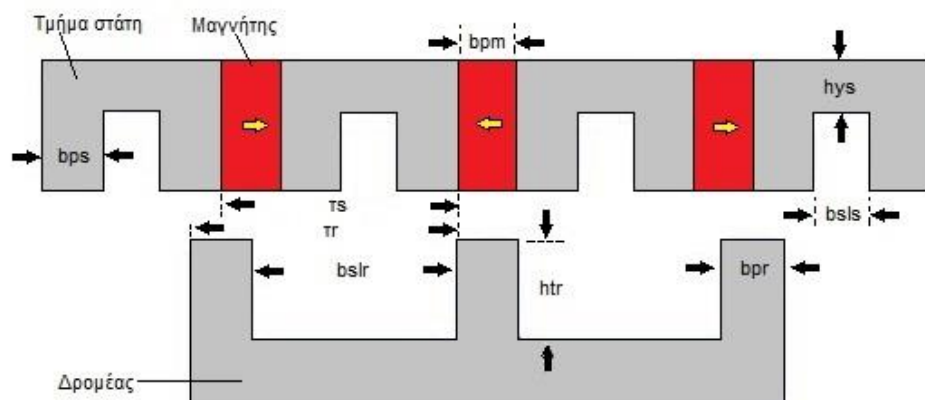
Έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε τον αριθμό των σπειρών:

$$N_t = \frac{V_{rms}}{4,44 \cdot f_e \cdot \varphi_{πόλου} \cdot N_s}$$

Ορίζουμε επίσης τα εξής μεγέθη:

- b_{PM} : πλάτος μόνιμου μαγνήτη
- b_{pS} : πλάτος δοντιού στάτη
- h_{tR} : ύψος δοντιού δρομέα
- b_{pR} : μήκος πόλου δρομέα
- h_{yR} : πάχος σώματος δρομέα
- h_{yS} : πάχος σώματος στάτη
- b_{sIS} : άνοιγμα αύλακας
- τ_s : πολικό βήμα

Τα οποία αναγράφονται και στο σχήμα της εικόνας 25:



Εικόνα 25: Απεικόνιση μεγεθών που πρέπει να διαστασιολογηθούν

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [1] μια καλή αρχική επιλογή είναι τα b_{pS} , b_{SIS} , b_{pR} και b_{PM} να είναι ίσα. Κατά συνέπεια,

$$b_{pS} = b_{SIS} = b_{pR} = b_{PM} = \frac{\tau_s}{4}$$

Γνωρίζουμε ότι:

$$\tau_s = \frac{\pi D_g}{N_s}$$

Η διατομή των αγωγών μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$A_{cond} = \frac{I}{J}$$

Επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της διατομής των αγωγών:

$$A_{coil} = A_{cond} \frac{N_t}{c}$$

Όπου $c=2$ στην περίπτωση που οι πόλοι στάτη είναι 6 και $c=4$ στην περίπτωση που πόλοι στάτη είναι 12.

Το εμβαδόν κάθε αύλακας προσδιορίζεται εύκολα τώρα ως:

$$A_{slot} = \frac{A_{coil}}{k_{fill}}$$

Ο συντελεστής πληρότητας k_{fill} παίρνει τιμές από 0.4 έως 0.6. Μιας και απαιτούμε μεγάλη πυκνότητα ισχύος από τη μηχανή επιλέγεται ίσως με 0.6. Έχοντας υπολογίσει το εμβαδόν της αύλακας μπορούμε να προσδιορίσουμε το ύψος της ως εξής:

$$h_{SIS} = \frac{A_{slot}}{b_{SIS}}$$

Επίσης προτείνεται [2] για ισορροπημένες σχεδιάσεις το πάχος του σώματος του σιδήρου να είναι λίγο μεγαλύτερο με το b_{pS} προκειμένου να αποφεύγεται ο κορεσμός. Συνήθως:

$$h_{yS} = 1,2 \cdot b_{pS}$$

Όμως στην περίπτωσή μας που επιβάλλεται η εξωτερική διάμετρος από τους περιορισμούς το ύψος του μαγνήτη και των δοντιών του στάτη κατά αντιστοιχεία είναι:

$$h_{PM} = \frac{D_{εξ\omega\tau.} - D_g}{2}$$

Και επομένως:

$$h_{yS} = h_{PM} - h_{SIS}$$

Τέλος πρέπει να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά του δρομέα. Το πολικό βήμα του δρομέα προκύπτει εμφανώς από τη σχέση:

$$\tau_R = \frac{\pi \cdot D_g}{N_r}$$

Το κενό ανάμεσα στους πόλους είναι ίσο με:

$$b_{sIR} = \tau_R - b_{pR}$$

Το ύψος των πόλων του δρομέα καθορίζει την εκτυπότητα της μηχανής. Παρόλο που οι μηχανές εναλλασσόμενης ροής έχουν ως βάση λειτουργίας τη σύγχρονη ροπή, η αύξηση του h_{tR} αυξάνει ελαφρώς την ροπή σύμφωνα με μελέτες [2]. Μάλιστα επιφέρει τη θετικότερη επίδραση στη ροπή όταν είναι περίπου ίσο με το διπλάσιο του b_{pS} .

Κλείνοντας το πάχος του σώματος δρομέα προκύπτει αφού γίνει μια αξιολόγηση της αντοχής που πρέπει να έχει ο άξονας. Κρίθηκε ότι με άξονα διαμέτρου $D_{shaft} = 10mm$ ικανοποιούνται οι μηχανικές προδιαγραφές αντοχής.

Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

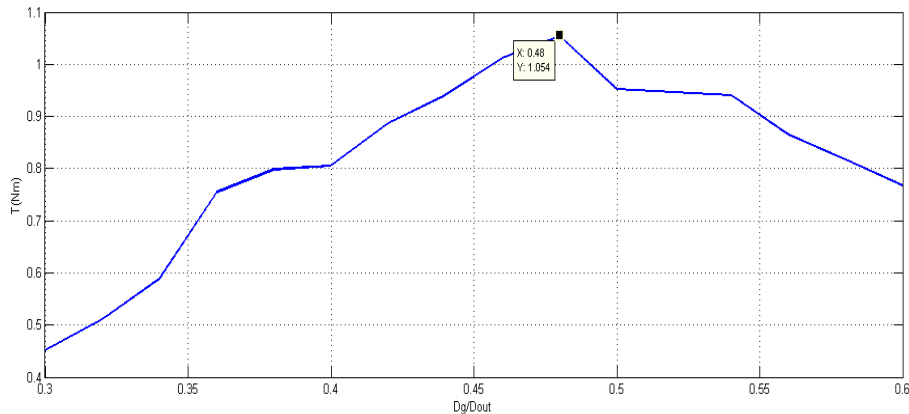
Πόλοι Στάτη	Πόλοι Δρομέα	Μέση ροπή (Nm)
6	5	0,8416
6	7	0,9621
12	10	0,9403
12	11	0,9743
12	13	0,9247
12	14	0,7063

Τα αποτελέσματα μας οδηγούν στην επιλογή του συνδυασμού 12/11. Όμως είναι εμφανές ότι τα αποτελέσματα της προκαταρκτικής σχεδίασης δεν πληρούν την προδιαγραφή της ροπής. Γι' αυτό κρίνεται απαραίτητη η χρήση επιπλέον διεργασιών και μεθόδων βελτιστοποίησης προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

5.3 Επιλογή Βέλτιστου D_g

Η διάμετρος του διακένου είναι κατά κοινή παραδοχή η πλέον σημαντική παράμετρος ως προς την ηλεκτρομηχανική μετατροπή. Ως εκ τούτου αποφασίσαμε να διεξάγουμε μια

ανάλυση ευαισθησίας προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη τιμή της και μετά να προχωρήσουμε στη μελέτη των υπόλοιπων γεωμετρικών χαρακτηριστικών.



Εικόνα 26: Στο σχήμα βλέπουμε τη μεταβολή της ροπής της μηχανής ως προς D_g , το οποίο είναι κανονικοποιημένο με την εξωτερική διάμετρο της μηχανής.

Έτσι, η βέλτιστη διάμετρος διακένου προέκυψε ίση με $D_g = 0,48 \cdot 75mm = 36mm$

5.4 Εφαρμογή Μεθοδολογίας Taguchi

Αρχικά πρέπει να επιλεγούν οι γεωμετρικές παράμετροι οι οποίοι θα μεταβάλλονται. Οι παράμετροι που επιλέγηκαν είναι:

- Το άνοιγμα της αύλακας (μεταβλητή A)
- Το μήκος του πόλου του δρομέα ως ποσοστό του πάχους του σώματος του δρομέα, D_{rp}/D_{ry} (μεταβλητή B).
- Το άνοιγμα του πόλου του δρομέα ως ποσοστό του ανοίγματος του πόλου στάτη (Γ), L_{rp}/L_p
- Το πάχος του μαγνήτη ως ποσοστό του ανοίγματος του πόλου στάτη (μεταβλητή Δ).

Οι υπόλοιπες παράμετροι θα διαμορφώνονται σε κάθε περίπτωση έτσι ώστε να μην εμφανίζεται έντονος κορεσμός στο σίδηρο.



Εικόνα 27: Απεικόνιση των διαστάσεων που χρησιμοποιούνται στη σχεδίαση μέσω της μεθόδου Taguchi

Το επόμενο βήμα της μεθοδολογίας Taguchi περιλαμβάνει την επιλογή του αριθμού των επιπέδων των τιμών καθώς και το ποιές θα είναι οι τιμές αυτές. Επιθυμούμε να εξετάσουμε όσο το δυνατόν περισσότερες επιλογές γι' αυτό θα έχουμε 5 επίπεδα τιμών, που είναι και το μέγιστο δυνατό σύμφωνα με τους πίνακες του Κεφαλαίου 4. Οι τιμές των ακραίων επιπέδων (1 & 5) επιλέγονται εποπτικά έτσι ώστε να τηρούνται λογικά και λειτουργικά όρια για την μηχανή και στην περίπτωση μας είναι:

Επίπεδα Τιμών				
Επίπεδο	A (°)	B	Γ	Δ
1	1	0,4	0,15	0,15
2	4	0,7	0,275	0,22
3	7	1,1	0,4	0,3
4	10	1,4	0,525	0,37
5	13	1,6	0,65	0,47

Πλέον απομένει η προσομείωση των συνδυασμών σύμφωνα με τον πίνακα L25 που είναι:

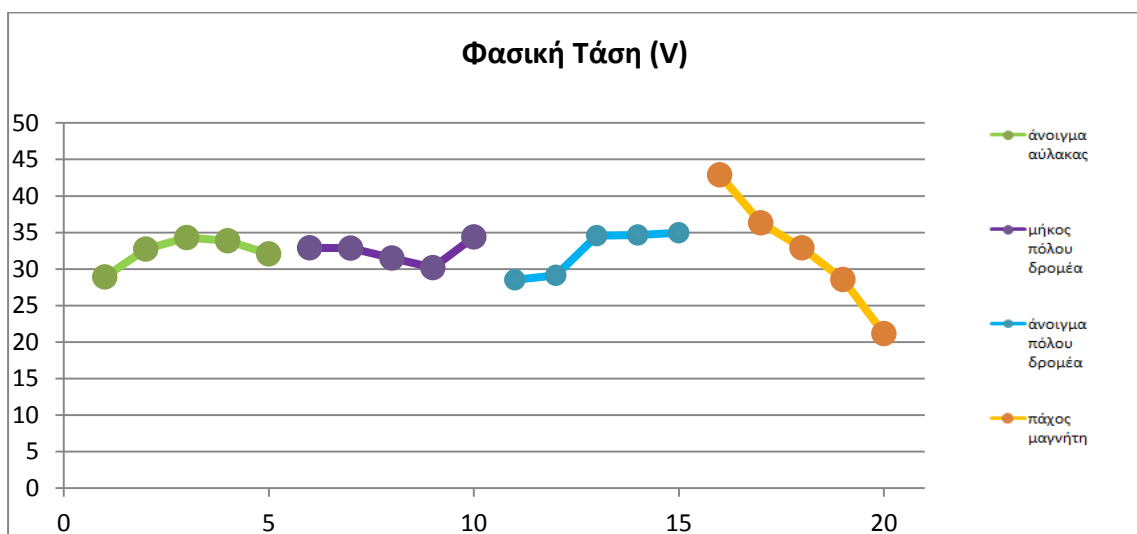
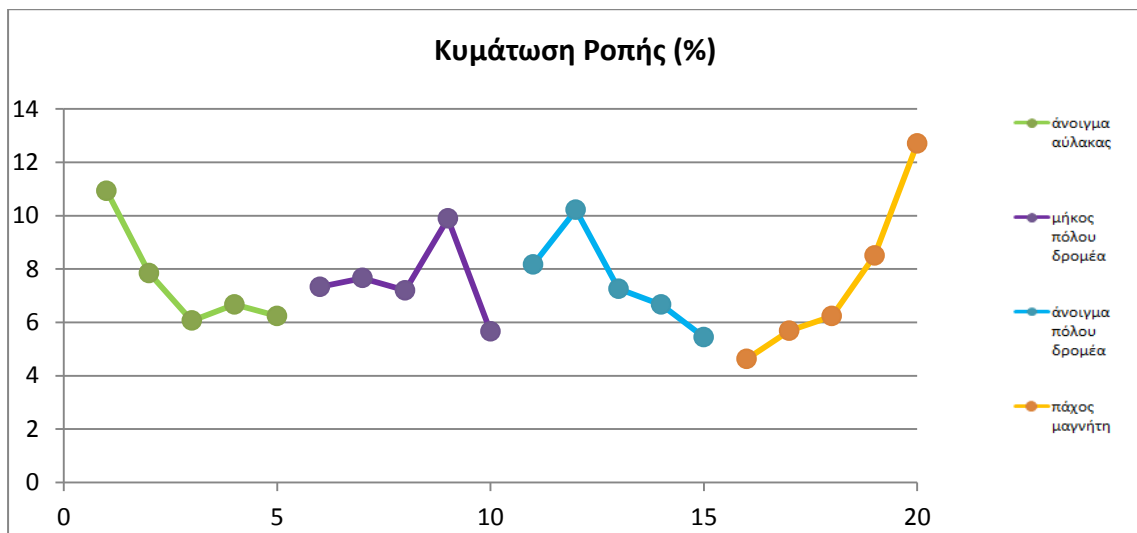
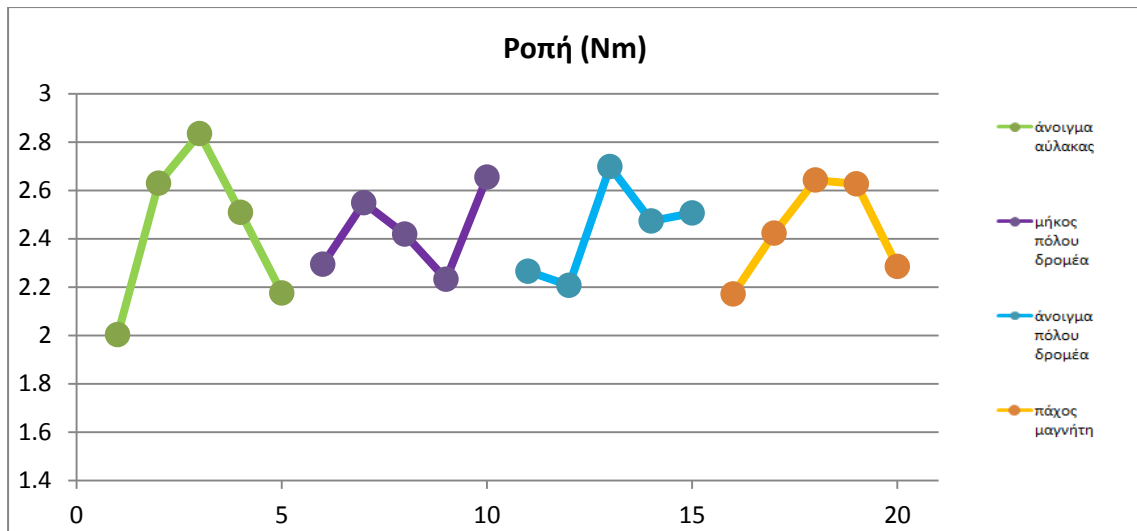
Πίνακας Συνδυασμών Taguchi και τα αποτελέσματά των αντίστοιχων προσομειώσεων										
A	B	Γ	Δ	Ροπή(N m)	Κυμ. Ροπής	Τάση (V)	THD(%)	Απώλειες Χαλκού (W)	Απώλειες Σιδήρου (W)	Σύνολο Απωλειών (W)
1	1	1	1	2,034	0,052	43,90	5,511	143,3	316,3	459,6
2	2	2	2	3,016	0,057	41,18	6,219	130,6	457,9	588,5
3	3	3	3	3,357	0,055	36,54	6,895	125,6	598,1	723,8
4	4	4	4	3,106	0,061	36,89	6,539	119,7	659,8	779,6
5	5	5	5	2,900	0,054	31,54	6,600	138,6	597,3	736,0
2	3	4	5	2,533	0,108	23,69	7,056	82,00	1097,	1179,
3	4	5	1	2,381	0,026	45,46	5,862	151,4	370,2	521,7
4	5	1	2	2,043	0,072	29,40	5,321	165,8	296,4	462,3
5	1	2	3	2,012	0,068	29,69	5,681	157,8	244,0	401,9
1	2	3	4	2,582	0,120	26,80	7,488	81,71	899,1	980,8
3	5	2	4	3,129	0,078	31,14	6,866	116,4	695,8	812,3
4	1	3	5	2,500	0,114	26,71	6,621	119,7	526,5	646,2
5	2	4	1	1,634	0,071	39,87	5,088	178,2	191,3	369,6
1	3	5	2	2,119	0,070	35,46	7,336	106,8	770,6	877,4
2	4	1	3	2,553	0,107	27,31	6,937	124,7	470,4	595,1
4	2	5	3	2,924	0,035	38,17	6,361	132,7	455,6	588,4
5	3	1	4	2,112	0,077	23,64	6,047	157,1	261,1	418,2
1	4	2	5	0,906	0,258	5,598	6,170	144,6	528,1	672,8
2	5	3	1	2,834	0,033	47,20	6,541	147,2	450,4	597,7
3	1	4	2	2,720	0,044	40,05	6,191	136,1	392,4	528,6
5	4	3	2	2,218	0,039	35,54	5,753	171,5	256,8	428,3
1	5	4	3	2,371	0,045	32,74	7,746	93,39	1133,	1226,
2	1	5	4	2,208	0,085	24,24	6,898	90,08	837,4	927,5
3	2	1	5	2,587	0,098	18,24	7,364	103,4	397,4	500,8
4	3	2	1	1,973	0,047	38,11	5,536	173,8	218,3	392,2

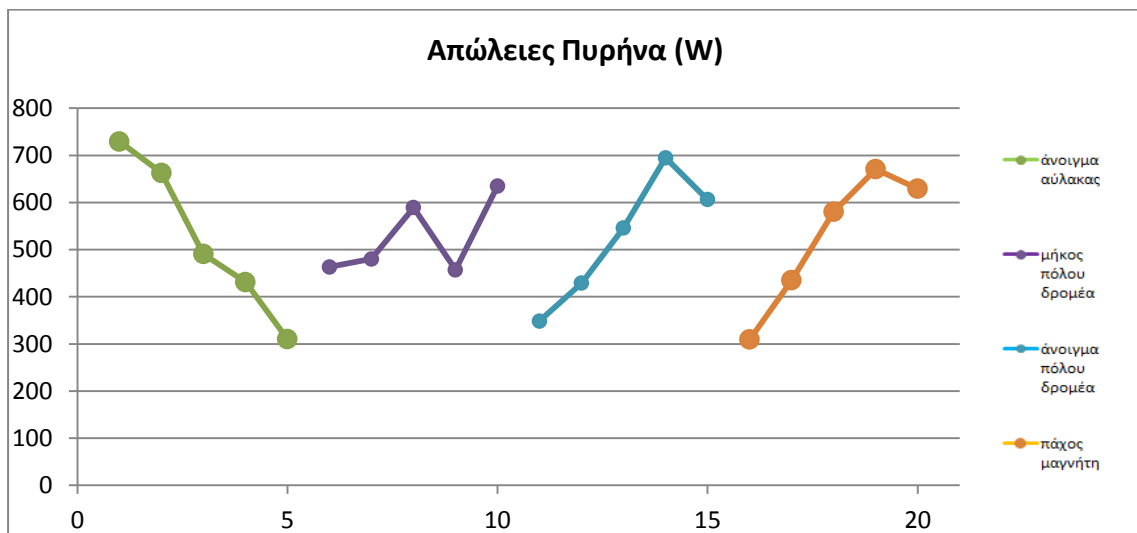
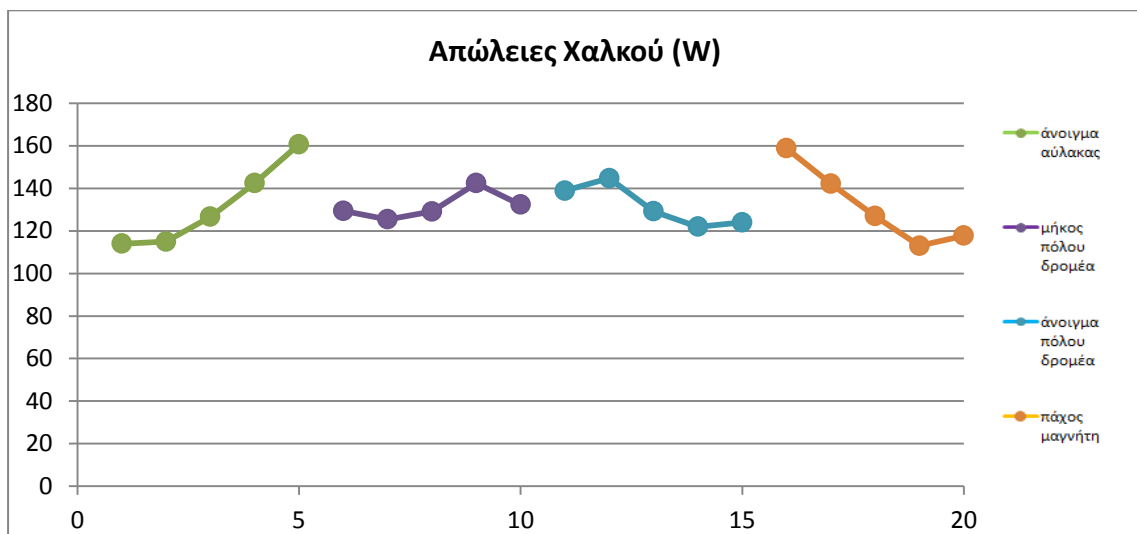
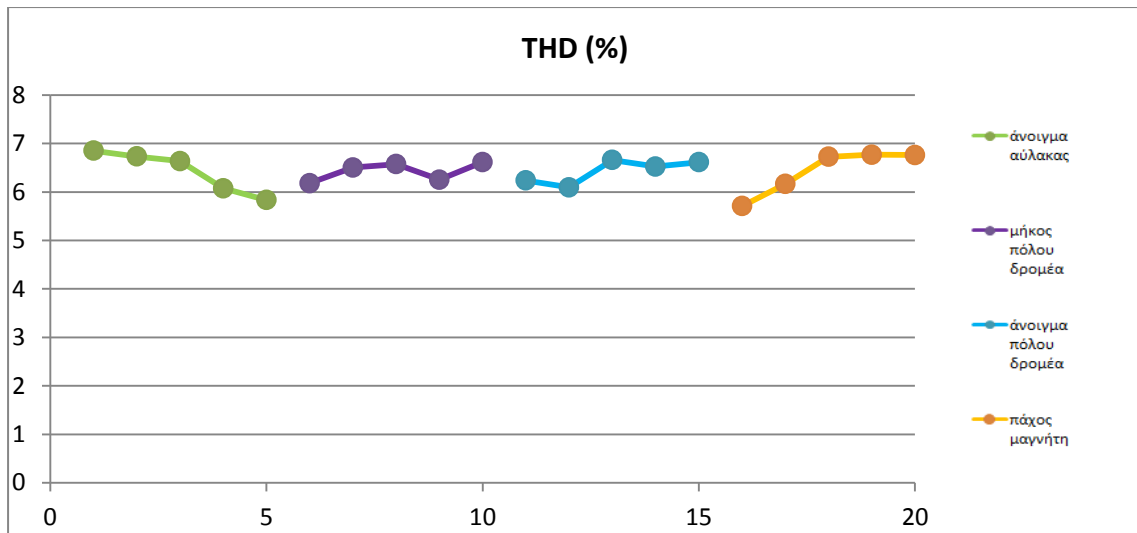
Υπολογισμός Μέσης Επίδρασης

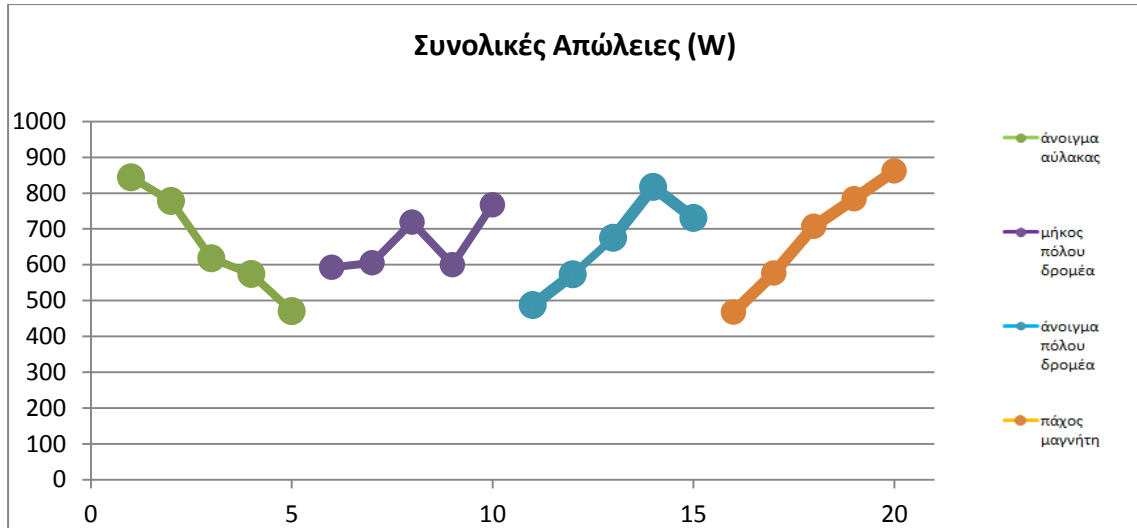
Στη συνέχεια υπολογίζονται οι μέσες τιμές των μεγεθών που προκύπτουν κάθε φορά που εμφανίζεται στο συνδυασμό το εκάστοτε επίπεδο της μεταβλητής. Για παράδειγμα το A1 αντιστοιχεί στη μέση τιμή των παρατηρήσεων των συνδυασμών που η μεταβλητή A (δηλαδή το άνοιγμα της αύλακας) έχει την τιμή του πρώτου επιπέδου, δηλαδή 1 μοίρα. Τα αποτελέσματα είναι:

	Αριθμός Συνδυασμού	Ροπή(Nm)	Κυμ. Ροπής (ποσοστό της ροπής)	Τάση (V)	THD(%)	Απώλειες Χαλκού (W)	Απώλειες Σιδήρου (W)	Σύνολο Απωλειών(W)
A1	1	2,00	0,109	28,9	6,85	113,9	729,5	843,5
A2	2	2,62	0,078	32,72	6,78	114,9	662,8	777,7
A3	3	2,83	0,060	34,29	6,636	126,6	490,5	617,4
A4	4	2,50	0,066	33,86	6,07	142,4	431,3	573,5
A5	5	2,17	0,0622	32,06	5,83	160,6	310,15	470,5
B1	6	2,29	0,07	32,92	6,180	129,4	463,3	592,8
B2	7	2,54	0,076	32,85	6,50	125,3	480,3	605,8
B3	8	2,41	0,072	31,49	6,574	129,0	589,2	718,3
B4	9	2,23	0,09	30,16	6,252	142,4	457,1	599,5
B5	10	2,65	0,056	34,40	6,61	132,3	634,7	767,0
Γ1	11	2,26	0,081	28,50	6,23	138,8	348,3	487,2
Γ2	12	2,20	0,10	29,146	6,094	144,70	428,8	573,5
Γ3	13	2,69	0,072	34,562	6,65	129,1	546,2	675,4
Γ4	14	2,47	0,066	34,65	6,524	121,9	694,9	816,9
Γ5	15	2,50	0,05	34,97	6,611	123,9	606,29	730,2
Δ1	16	2,17	0,046	42,91	5,70	158,8	309,3	468,20
Δ2	17	2,42	0,05	36,33	6,16	142,2	434,8	577,0
Δ3	18	2,64	0,06	32,89	6,724	126,8	580,3	707,2
Δ4	19	2,62	0,085	28,54	6,768	113,02	670,6	783,7
Δ5	20	2,28	0,12	21,15	6,762	117,7	629,45	862

Και ακολουθεί η σχηματική τους αναπαράσταση:







5.5 Ανάλυση Ευαισθησίας (ANOVA)

Για κάθε μεταβλητή πρέπει να υπολογιστεί η ποσότητα SS (Sum of Squares) η οποία στην περίπτωση μας ορίζεται ως:

$$SS = 5 \cdot \sum_{i=1}^5 (E - E_i)^2$$

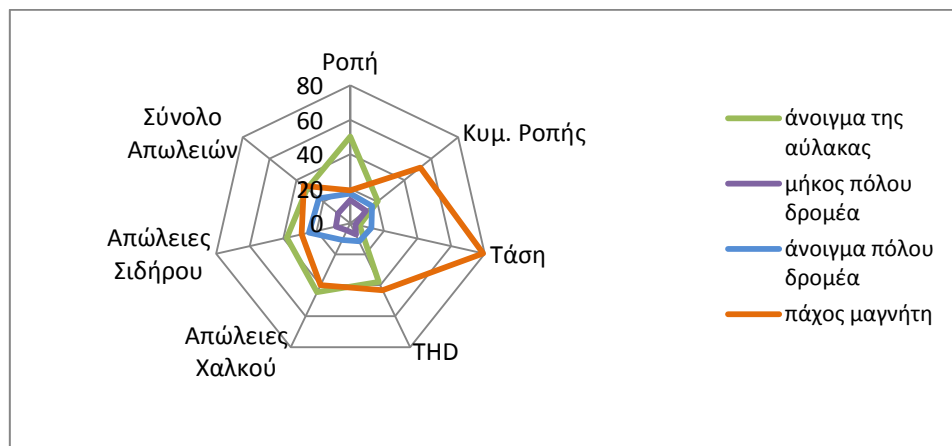
Όπου E: η μέση τιμή όλων των παρατηρήσεων του μεγέθους από τον πίνακα σχεδιασμού Taguchi. E_i: η μέση τιμή των παρατηρήσεων του μεγέθους όταν η μεταβλητή έχει το i επίπεδο. Έτσι κατασκευάζεται ο πίνακας:

Πίνακας Αθροίσματος Τετραγώνων							
	Ροπή(N)	Κυμ. Ροπής (%)	Τάση (V)	THD(%)	Απώλειες Χαλκού (W)	Απώλειες Σιδήρου (W)	Σύνολο Απωλειών(W)
A	2,29	0,81	90,7	3,95	7879,21	584688,5	462623,1
B	0,61	0,46	51,67	0,77	836,28	132863,6	129668,8
Γ	0,78	0,64	210,86	1,22	1914,96	382015	335255,9
Δ	0,86	2,06	1337,19	4,52	7072,9	449097,5	513544,3

Προκειμένου όμως να έχουμε σαφή εικόνα της επίδρασης της κάθε μεταβλητής πρέπει να υπολογίσουμε τις εκατοστιαίες επιδράσεις οι οποίες είναι:

Εκατοστιαία Επίδραση							
	Ροπή(N)	Κυμ. Ροπής (%)	Τάση	THD(%)	Απώλειες Χαλκού	Απώλειες Σιδήρου	Σύνολο Απωλειών
A	50,37	20,43	5,37	37,78	44,51	37,75	32,1
B	13,44	11,63	3,06	7,37	4,72	8,58	9
Γ	17,2	16,09	12,47	11,69	10,82	24,67	23,26
Δ	18,99	51,86	79,1	43,17	39,95	29	35,64

Τα αποτελέσματα του πίνακα της εκατοστιαίας επίδρασης απεικονίζονται στην εικόνα.



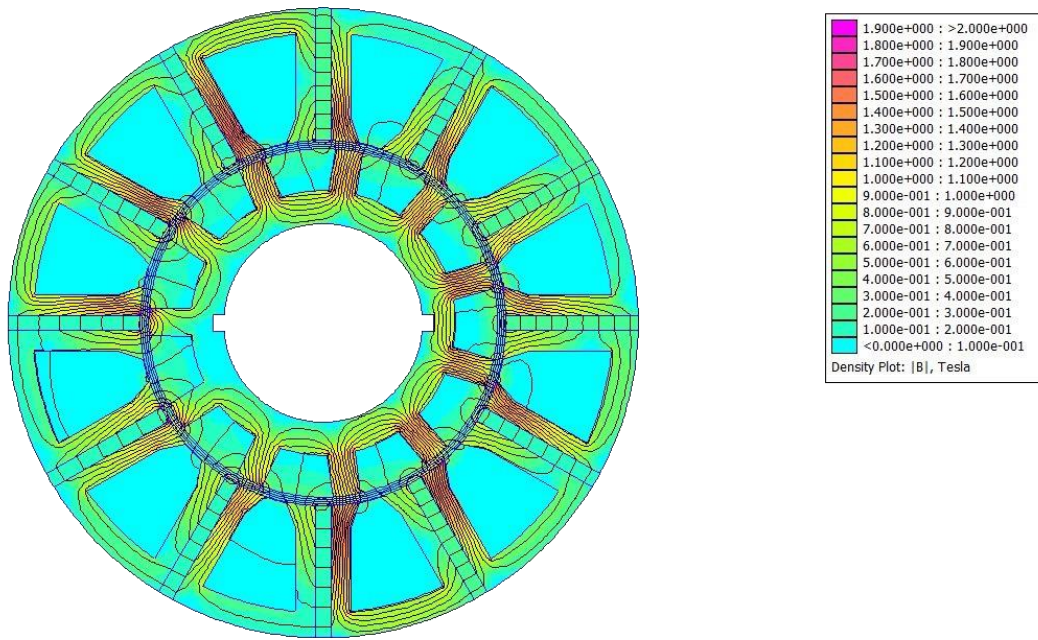
Εικόνα 28: Εκατοστιαία επίδραση των παραμέτρων

5.6 Τελικό Σχέδιο

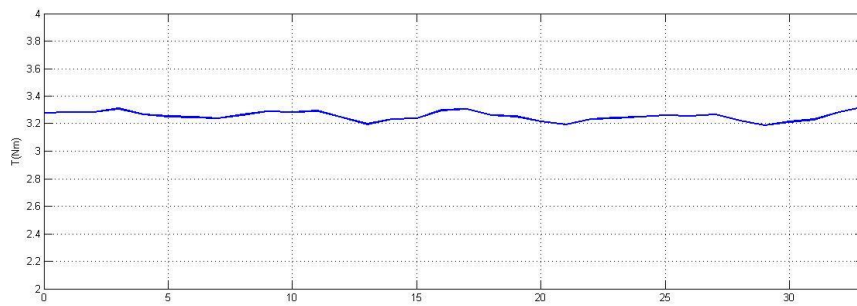
Με βάση τα αποτελέσματα αυτά βλέπουμε ότι ο ένας συνδυασμός που μας εξασφαλίζει πολύ υψηλή ροπή και απώλειες σε λογικό επίπεδο είναι:

- Άνοιγμα της αύλακας 7°.
- Το μήκος του πόλου του δρομέα ως ποσοστό του πάχους του σώματος του δρομέα ίσο με 70%
- Το άνοιγμα του πόλου του δρομέα ως ποσοστό του ανοίγματος του πόλου στάτη ίσο με 40%
- Το πάχος του μαγνήτη ως ποσοστό του ανοίγματος του πόλου στάτη ίσο με 30%.

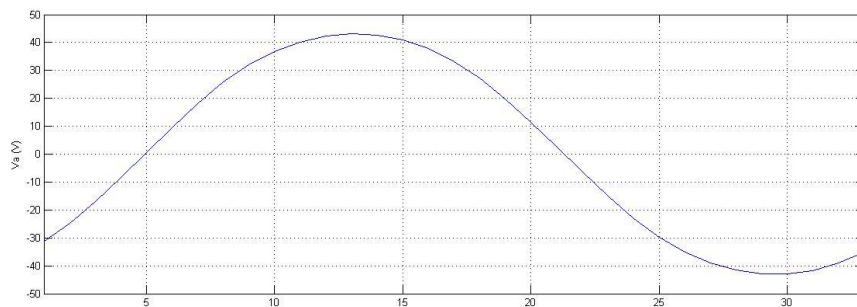
Η μηχανή που προκύπτει από αυτό το σχεδιασμό είναι:



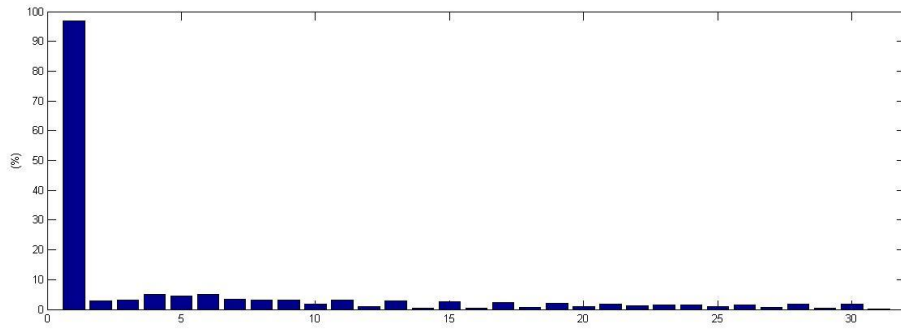
Εικόνα 27: Πεδιακή Αναπαράσταση της μηχανής που προέκυψε



Εικόνα 30: Η ροπή της μηχανής κατά την περιστροφή της κατά ένα πολικό βήμα



Εικόνα 31: Η φασική τάση κατά την περιστροφή της μηχανής κατά ένα πολικό βήμα



Εικόνα 28: Ανάλυση Αρμονικού Περιεχομένου της τάσης

Επίσης υπολογίστηκαν,

Σύνολο απωλειών: 596 W

Απόδοση: 77,1%

Είναι εμφανές ότι η μηχανή πλήρει πλέον το σύνολο των προδιαγραφών που τέθηκαν.

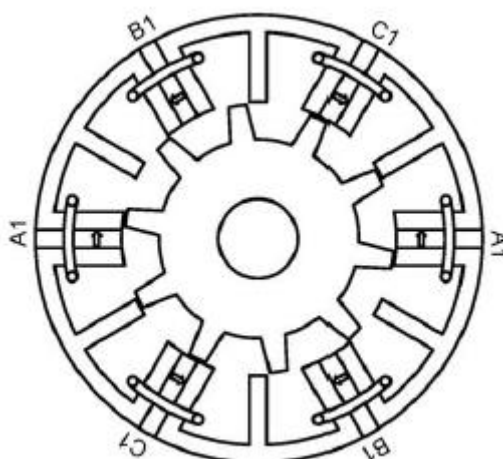
5.7 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- [1] J.T. Chen, Z.Q. Zhu, “Winding configuration and optimal stator and rotor combination of flux-switching PM brushless AC machines”, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol.25, no 2, pp.293-302, 2010.
- [2] Z.Q. Zhu, Y. Pang, J.T. Chen, Z.P. Xia, D. Howe, “Influence of design parameter on output torque of flux-switching permanent magnet machines”, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference VPCC 2008, pp. 1-6, Harbin, China, 2008.

Κεφάλαιο 6: Μηχανή Εναλλασσόμενης Ροής Τύπου «πυρήνα Ε»

6.1 Εισαγωγή

Η μηχανή εναλλασσόμενης ροής τύπου «πυρήνα Ε» είναι μια τοπολογία που αναπτύχθηκε ως συνέχεια της μηχανής τύπου «πυρήνα C». Αφορμή για την εξέλιξη αυτή ήταν η κακή συμπεριφορά της μηχανής τύπου «πυρήνα C» σε σφάλματα[1].



Εικόνα 33: Απεικόνιση της δομής μιας μηχανής Εναλλασσόμενης Ροής τύπου «πυρήνα Ε»

Όπως και η προγενέστερη τοπολογία της οποίας αποτελεί εξέλιξη αντλεί το όνομά της από το σχήμα των ελασμάτων μαγνητικής λαμαρίνας του στάτη το οποίο μοιάζει με το γράμμα «Ε» του αγγλικού αλφαβήτου. Η θεμελιώδης διαφοράς του είναι η ύπαρξη ενός επιπλέον δοντιού στο στάτη με σκοπό την επίτευξη φυσικής, ηλεκτρικής, μαγνητικής και θερμικής απομόνωσης μεταξύ των τυλιγμάτων στάτη. Αξίζει να σημειωθεί ότι η φυσική, ηλεκτρική και θερμική απομόνωση των τυλιγμάτων στη μηχανή τύπου πυρήνα “C” επιτυγχάνεται σε ικανοποιητικό βαθμό όταν τυλίγονται μόνο οι μισοί πόλοι. Αντίθετα η αλληλεπαγωγή των τυλιγμάτων παραμένει αρκετά ισχυρή ενώ η αυτεπαγωγή τους πολύ μικρή με αποτέλεσμα τον δύσκολο χειρισμό της μηχανής σε περίπτωση σφάλματος. Σκοπός της προσθήκης του επιπλέον δοντιού είναι να αναιρέσει όσα προαναφέρθηκαν[1].



Εικόνα 294: Ανάλυση των μερών της Μηχανής Εναλλασσόμενης Ροής Τοπολογία τύπου «πυρήνα Ε». Από αριστερά προς τα δεξιά διακρίνονται, ο δρομέας, τα τυλίγματα, οι μαγνήτες και ο στάτης.

6.2 Προκαταρκτική Σχεδίαση

Τα επιθυμητά χαρακτηριστικά παραμένουν:

- Εξωτερική Διάμετρος: $D_{εξωτ.} = 75 \text{ mm}$
- Ενεργό μήκος: $L = 117 \text{ mm}$
- Ονομαστική Ταχύτητα περιστροφής: $n = 7500 \text{ ΣΑΛ}$
- Ελάχιστη Μέση Ροπή: $T_{μέση} = 1,8 \text{ Nm}$
- Μήκος Διακένου: 1 mm
- $J_{rms} = 2 \text{ A/mm}^2$

Επίσης, επιλέχθηκε να διατηρηθεί η επιλογή του αριθμού φάσεων, δηλαδή:

$$m = 3$$

Όσον αφορά τον αριθμό πόλων δρομέα και στάτη αξιοποιούμε τα συμπεράσματα της μελέτης των Chen και Zhu [2] και αναζητούμε την βέλτιστη επιλογή ανάμεσα στο συνδυασμούς που οι πόλοι στάτη και δρομέα είναι σχεδόν ίσοι. Για να βρισκόμαστε σε αντιστοιχία μάλιστα με την μελέτη που έγινε για την c core μηχανή οι συνδυασμοί που θα εξετασθούν είναι:

Αριθμός Πόλων Στάτη N_s	Αριθμός Πόλων Δρομέα N_r
6	5
6	7
12	10
12	11
12	13
12	14

Η διαδικασία της προκαρκτικής σχεδίασης είναι ταυτίζεται σχεδόν με εκείνη που περιγράφεται στο 5^ο κεφάλαιο. Η μόνη διαφορά είναι ότι πλέον να διαστασιοποιηθεί και το το επιπλέον δόντι. Βασιζόμενοι στην ιδέα ότι ένα πολύ μεγάλο μέρος της ροής διέρχεται από το δόντι αυτό κατά τη λειτουργία επιλέγουμε το πλάτος του ίσο με:

$$b_{separator} = 0,7 \cdot b_{pS}$$

Έτσι ισχύει πλέον ότι:

$$b_{pS} = b_{SIS} = b_{pR} = b_{PM}$$

$$\tau_s = 2 \cdot b_{pS} + 2 \cdot b_{SIS} + b_{separator} + b_{PM}$$

Συνδυάζοντας τα παραπάνω προκύπτει:

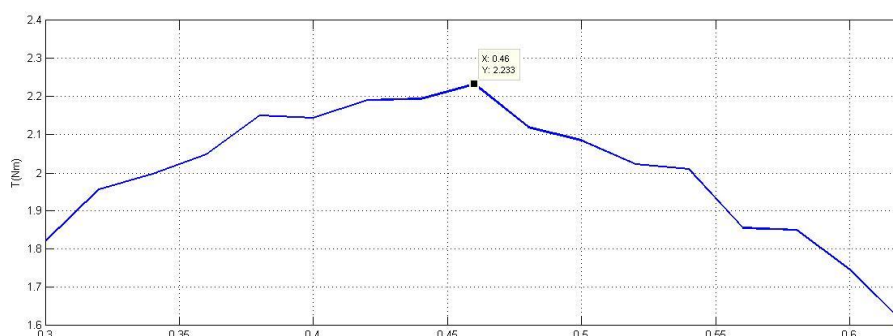
$$b_{pS} = \frac{\tau_s}{5,7}$$

Πόλοι Στάτη	Πόλοι Δρομέα	Μέση ροπή (Nm)
6	5	1,5109
6	7	2,171
12	10	1,0461
12	11	1,0831
12	13	1,2065
12	14	1,2794

Με βάση τα παραπάνω η υπεροχή του συνδυασμού 6/7 ως προς την ηλεκτρομηχανική μετατροπή είναι προφανής, για αυτό και είναι ο συνδυασμός που επιλέγεται τελικά.

6.3 Επιλογή Βέλτιστου D_g

Η διάμετρος του διακένου είναι κατά κοινή παραδοχή η πλέον σημαντική παράμετρος ως προς την ηλεκτρομηχανική μετατροπή. Ως εκ τούτου αποφασίσαμε να διεξάγουμε μια ανάλυση ευαισθησίας προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη τιμή της και μετά να προχωρήσουμε στη μελέτη των υπόλοιπων γεωμετρικών χαρακτηριστικών.



Εικόνα 30: Στο σχήμα βλέπουμε τη μεταβολή της ροπής της μηχανής ως προς D_g , το οποίο είναι κανονικοποιημένο με την εξωτερική διάμετρο της μηχανής

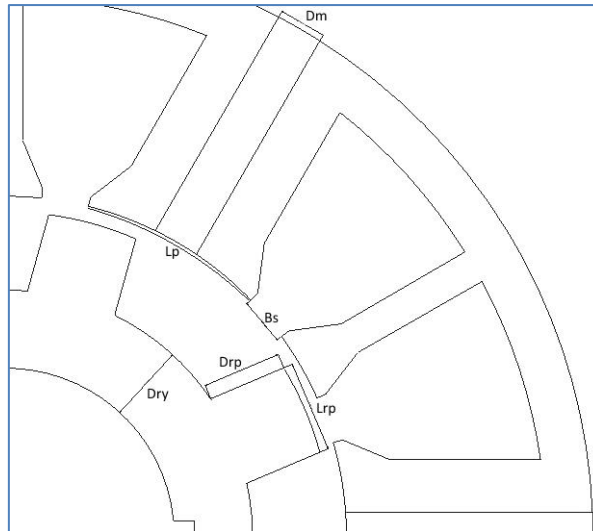
Έτσι, η βέλτιστη διάμετρος διακένου προέκυψε ίση με $D_g = 0,46 \cdot 75mm = 34,5mm$

6.4 Εφαρμογή Μεθοδολογίας Taguchi

Αρχικά πρέπει να επιλεγούν οι γεωμετρικές παράμετροι οι οποίοι θα μεταβάλλονται. Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν είναι:

- Το άνοιγμα της αύλακας (μεταβλητή A)
- Το μήκος του πόλου του δρομέα ως ποσοστό του πάχους του σώματος του δρομέα (μεταβλητή B)
- Το άνοιγμα του πόλου του δρομέα ως ποσοστό του ανοίγματος του πόλου στάτη (Γ)
- Το πάχος του μαγνήτη ως ποσοστό του ανοίγματος του πόλου στάτη (μεταβλητή Δ)

Οι υπόλοιπες παράμετροι θα διαμορφώνονται σε κάθε περίπτωση έτσι ώστε να μην εμφανίζεται έντονος κορεσμός στο σίδηρο.



Εικόνα 36: Απεικόνιση των διαστάσεων που χρησιμοποιούνται στη σχεδίαση μέσω της μεθόδου Taguchi

Το επόμενο βήμα της μεθοδολογίας Taguchi περιλαμβάνει την επιλογή του αριθμού των επιπέδων των τιμών καθώς και το ποιές θα είναι οι τιμές αυτές. Επιθυμούμε να εξετάσουμε όσο το δυνατόν περισσότερες επιλογές γι' αυτό θα έχουμε 5 επίπεδα τιμών, που είναι και το μέγιστο δυνατό σύμφωνα με τους πίνακες του κεφαλαίου 4. Οι τιμές των ακραίων επιπέδων (1 & 5) επιλέγονται εποπτικά έτσι ώστε να τηρούνται λογικά και λειτουργικά όρια για την μηχανή και στην περίπτωση μας είναι:

Επίπεδα Τιμών				
Επίπεδο	A (°)	B	Γ	Δ
1	1	0,3	0,1	0,15
2	4	0,4	0,18	0,22
3	8	0,5	0,26	0,3
4	12	0,6	0,34	0,37
5	16	0,7	0,45	0,47

Πλέον απομένει η προσομείωση των συνδυασμών σύμφωνα με τον πίνακα L25 που είναι:

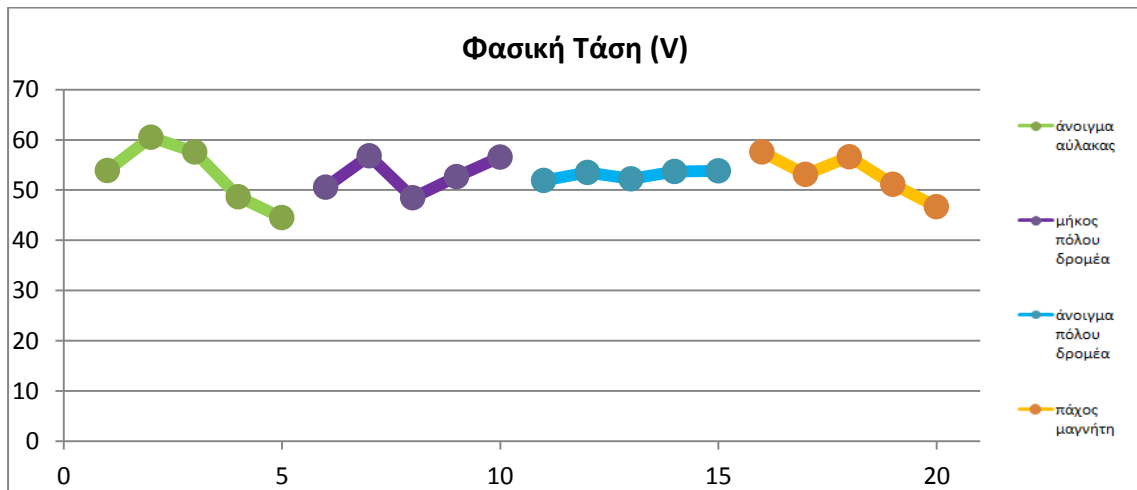
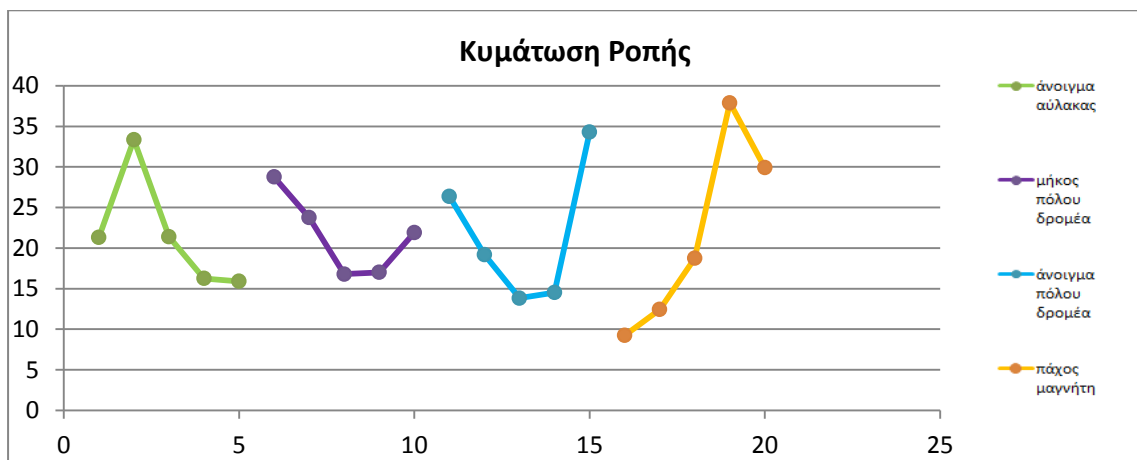
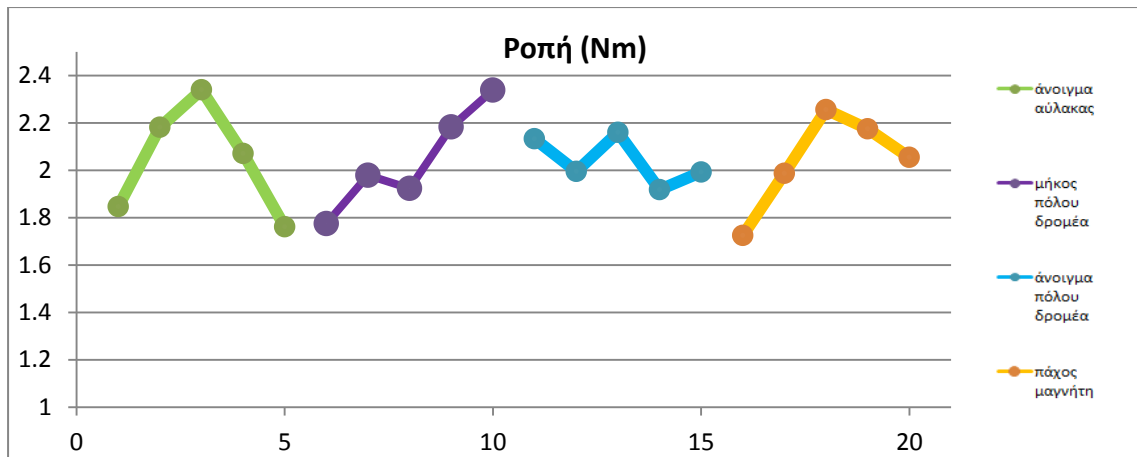
A	B	Γ	Δ	Ροπή(Nm)	Κυμ. Ροπής	Τάση (V)	THD(%)	Απώλειες Χαλκού (W)	Απώλειες Σιδήρου (W)	Σύνολο Απωλειών(W)
1	1	1	1	1,83	0,1	59,39	2,12	131,64	219,96	351,6
1	2	2	2	2,43	0,15	72,22	2,67	115,13	421,03	536,16
1	3	3	3	2,78	0,1	57,09	2,49	121,16	443,05	564,21
1	4	4	4	2,62	0,13	49,95	2,24	124,82	440,35	565,17
1	5	5	5	2,55	0,33	46,74	2,41	130,3	477,49	607,79
2	1	2	3	1,84	0,21	45,26	2,39	83,03	888,89	971,92
2	2	3	4	1,93	0,11	60,47	2,87	144,79	213,35	358,14
2	3	4	5	2,03	0,19	42,94	2,38	145,55	217,53	363,08
2	4	5	1	1,47	0,13	39,59	1,88	143,06	216,63	359,69
2	5	1	2	1,97	0,31	49,67	2,55	85,58	786,31	871,89
3	1	3	5	2,81	0,27	63,36	2,34	112,9	610,93	723,83
3	2	4	1	1,95	0,18	45,51	2,03	117,47	480,43	597,9
3	3	5	2	1,08	0,05	53,85	2,04	159,51	116,93	276,44
3	4	1	3	1,63	0,15	52,16	2,23	108,05	530,39	638,44
3	5	2	4	2,76	0,29	65,97	2,25	110,92	536,11	647,03
4	1	4	2	2,32	0,16	61,29	2,36	129,13	352,93	482,06
4	2	5	3	1,95	0,22	44,32	2,5	143,54	281,99	425,53
4	3	1	4	1,84	0,25	48,87	2,94	76,04	885,73	961,77
4	4	2	5	2,35	0,04	70,56	3,4	134,72	293,1	427,82
4	5	3	1	2,09	0,07	60,03	2,56	128,14	325,27	453,41
5	1	5	4	1,76	0,07	38,17	2,94	153,27	163,2	316,47
5	2	1	5	1,96	0,26	59,28	3,47	97,4	808,12	905,52
5	3	2	1	1,53	0,97	48,44	2,27	90,52	741,83	832,35
5	4	3	2	2,1	0,52	47,1	2,53	104,84	528,09	632,93
5	5	4	3	1,43	0,16	43,59	1,92	156,72	103,68	260,39

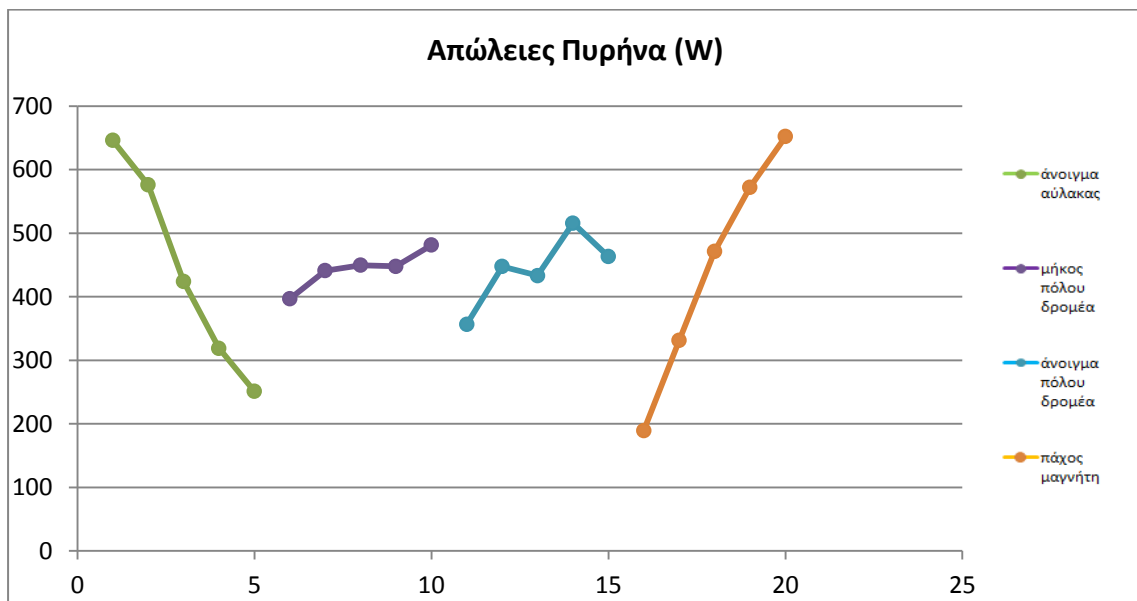
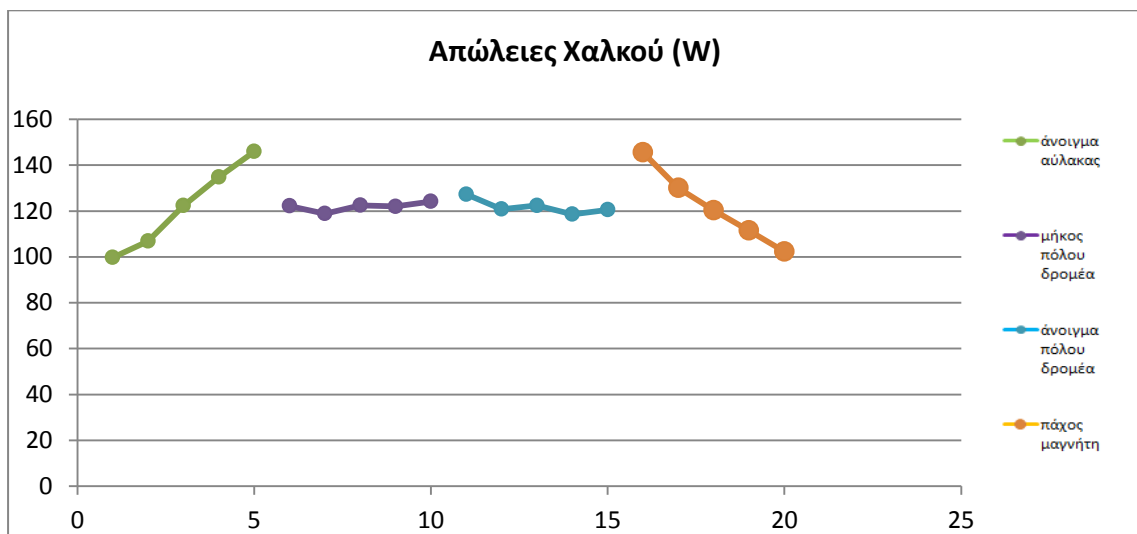
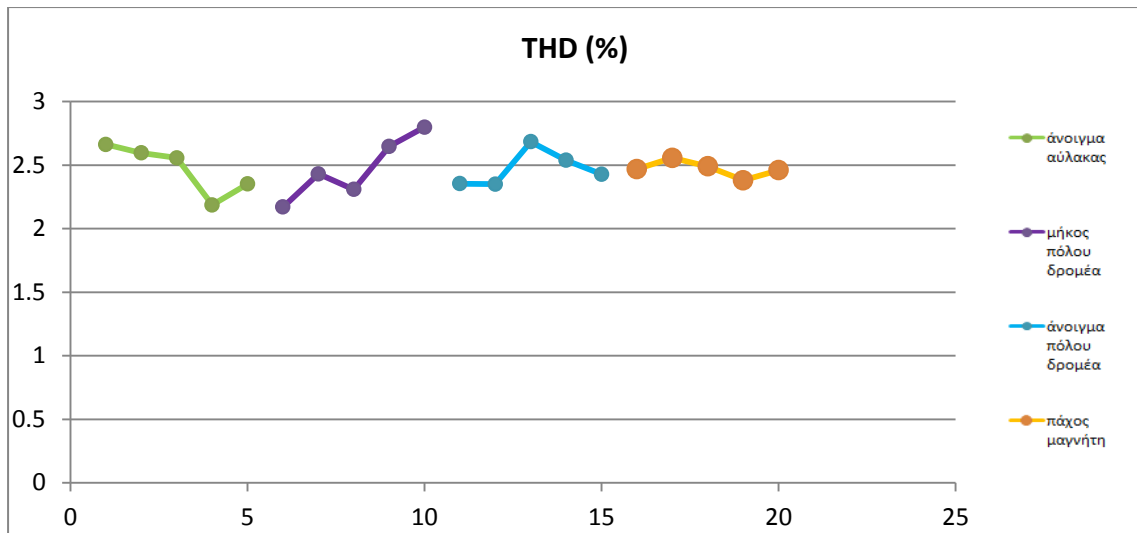
Υπολογισμός Μέσης Επίδρασης

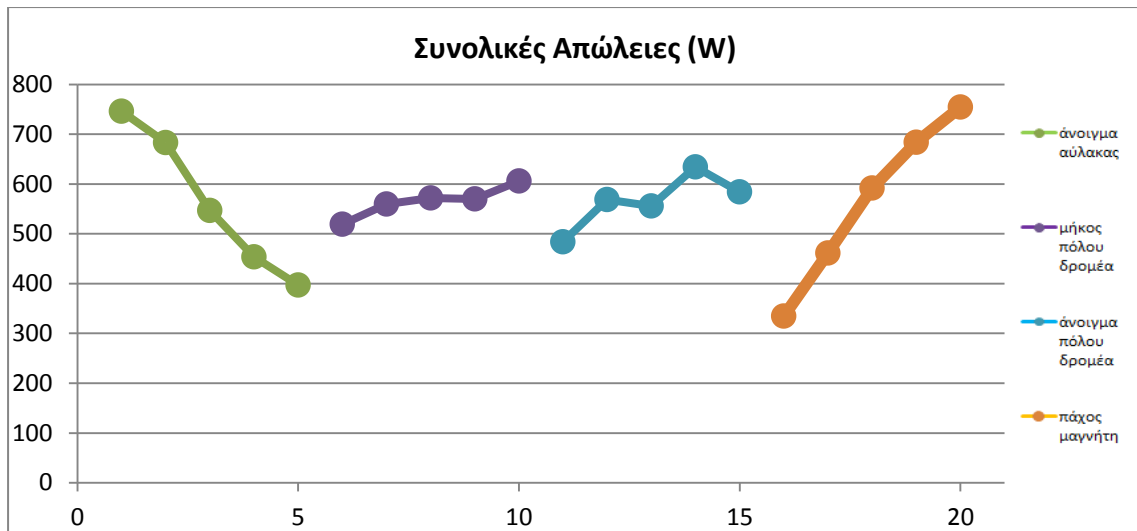
Στη συνέχεια υπολογίζονται οι μέσες τιμές των μεγεθών που προκύπτουν κάθε φορά που εμφανίζεται στο συνδυασμό το εκάστοτε επίπεδο της μεταβλητής. Για παράδειγμα το A1 αντιστοιχεί στη μέση τιμή των παρατηρήσεων των συνδυασμών που η μεταβλητή A (δηλαδή το άνοιγμα της αύλακας) έχει την τιμή του πρώτου επιπέδου, δηλαδή 1 μοίρα. Τα αποτελέσματα είναι:

	Αριθμός Συνδυασμού	Ροπή(Nm)	Κυμ. Ροπής (ποσοστό της ροπής)	Τάση (V)	THD(%)	Απώλειες Χαλκού (W)	Απώλειες Σιδήρου (W)	Σύνολο Απωλειών(W)
A1	1	2,44	0,16	57,08	2,38	124,61	400,38	524,99
A2	2	1,85	0,19	47,58	2,41	120,4	464,54	584,94
A3	3	2,05	0,19	56,17	2,18	121,77	454,96	576,73
A4	4	2,11	0,15	57,01	2,75	122,31	427,8	550,12
A5	5	1,76	0,4	47,31	2,62	120,55	468,98	589,53
B1	6	2,11	0,16	53,49	2,43	121,99	447,18	569,18
B2	7	2,04	0,18	56,36	2,71	123,67	440,98	564,65
B3	8	1,85	0,31	50,24	2,42	118,56	481,01	599,57
B4	9	2,03	0,2	51,87	2,45	123,1	401,71	524,81
B5	10	2,16	0,23	53,2	2,34	122,33	445,77	568,1
Γ1	11	1,85	0,21	53,87	2,66	99,74	646,1	745,85
Γ2	12	2,18	0,33	60,49	2,6	106,86	576,19	683,05
Γ3	13	2,34	0,21	57,61	2,56	122,37	424,14	546,51
Γ4	14	2,07	0,16	48,65	2,19	134,74	318,98	453,72
Γ5	15	1,76	0,16	44,54	2,35	145,94	251,25	397,18
Δ1	16	1,78	0,29	50,59	2,17	122,17	396,82	518,99
Δ2	17	1,98	0,24	56,82	2,43	118,84	441,06	559,9
Δ3	18	1,92	0,17	48,48	2,31	122,5	449,6	572,1
Δ4	19	2,18	0,17	52,68	2,65	121,97	447,75	569,72
Δ5	20	2,34	0,22	56,58	2,8	124,17	481,43	605,61

Και ακολουθεί η σχηματική τους αναπαράσταση:







6.5 Ανάλυση Ευαισθησίας (ANOVA)

Για κάθε μεταβλητή πρέπει να υπολογιστεί η ποσότητα SS (Sum of Squares) η οποία στην περίπτωση μας ορίζεται ως:

$$SS = 5 \cdot \sum_{i=1}^5 (E - E_i)^2$$

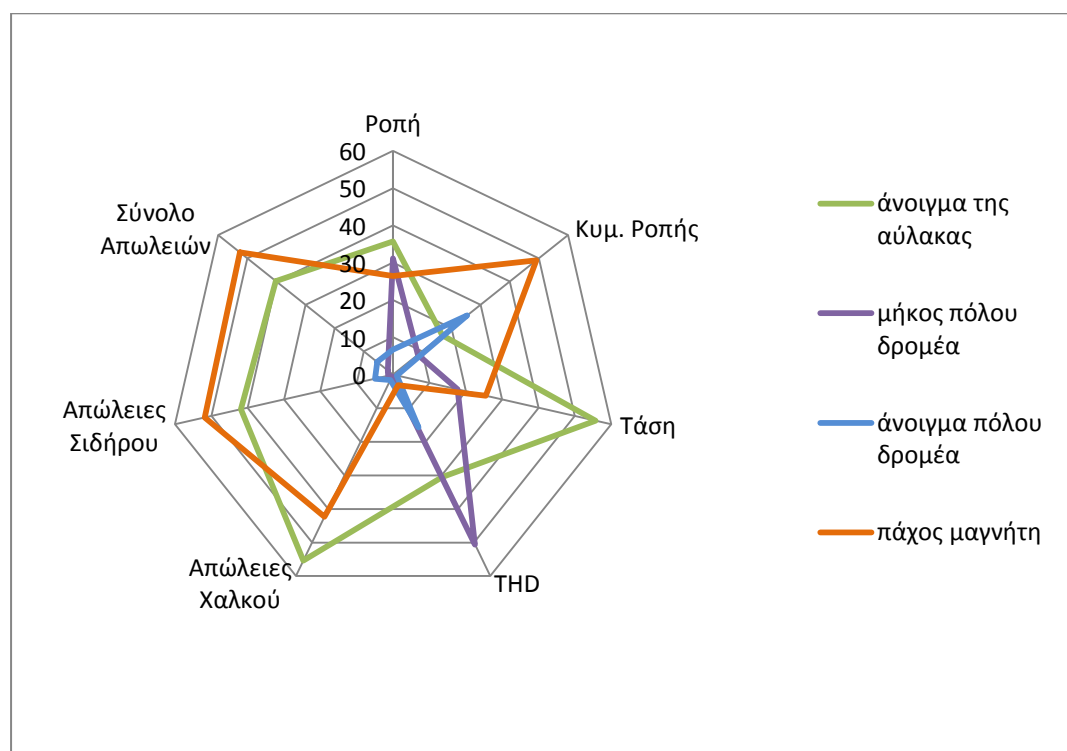
Όπου E: η μέση τιμή όλων των παρατηρήσεων του μεγέθους από τον πίνακα σχεδιασμού Taguchi. E_i η μέση τιμή των παρατηρήσεων του μεγέθους όταν η μεταβλητή έχει το i επίπεδο. Έτσι κατασκευάζεται ο πίνακας:

	Πίνακας Αθροίσματος Τετραγώνων						
	Ροπή(N)	Κυμ. Ροπής (%)	Τάση (V)	THD(%)	Απώλειες Χαλκού (W)	Απώλειες Σιδήρου (W)	Σύνολο Απωλειών(W)
A	1,13	0,099	843,04	0,77	7299,04	557476	437646
B	0,99	0.0501	268,6	1,29	74,94	18393,73	19321,43
Γ	0,21	0,15	15,79	0,4	217,6	66410,14	59175,33
Δ	0,84	0,28	386,61	0,08	5579,25	689992,7	571879,7

Προκειμένου όμως να έχουμε σαφή εικόνα της επίδρασης της κάθε μεταβλητής πρέπει να υπολογίσουμε τις εκατοστιαίες επιδράσεις οι οποίες είναι:

	Εκατοστιαία Επίδραση						
	Ροπή(N)	Κυμ. Ροπής (%)	Τάση	THD(%)	Απώλειες Χαλκού	Απώλειες Σιδήρου	Σύνολο Απωλειών
A	35,75	16,89	55,68	30,47	55,42	41,84	40,22
B	31,15	8,5	17,74	50,65	0,57	1,38	1,78
Γ	6,68	25,46	1,04	15,73	1,65	4,98	5,44
Δ	26,42	49,15	25,53	3,16	42,36	51,79	52,56

Τα αποτελέσματα του πίνακα της εκατοστιαίας επίδρασης απεικονίζονται στην εικόνα.



Εικόνα 317: Σχηματική Απεικόνιση της επίδρασης των διαφόρων παραμέτρων στα μεγέθη που εξετάζουμε

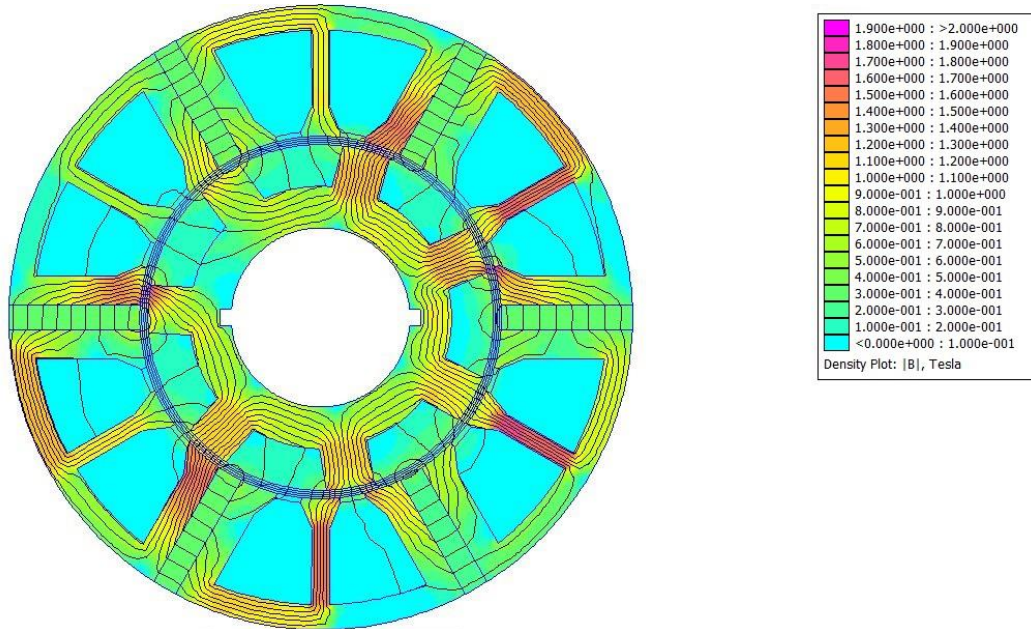
Με βάση τα αποτελέσματα αυτά βλέπουμε ότι ο ένας συνδυασμός που μας εξασφαλίζει πολύ υψηλή ροπή και απώλειες σε λογικό επίπεδο είναι:

- Άνοιγμα της αύλακας 8°.
- Το μήκος του πόλου του δρομέα ως ποσοστό του πάχους του σώματος του δρομέα ίσο με 70%
- Το άνοιγμα του πόλου του δρομέα ως ποσοστό του ανοίγματος του πόλου στάτη ίσο με 26%

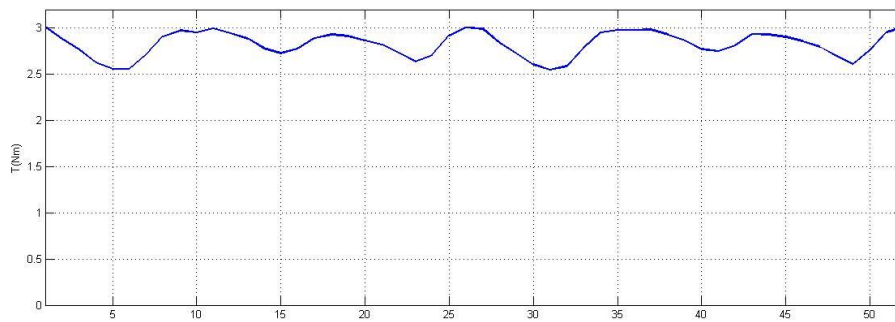
- Το πάχος του μαγνήτη ως ποσοστό του ανοίγματος του πόλου στάτη ίσο με 47%.

6.6 Τελικό Σχέδιο

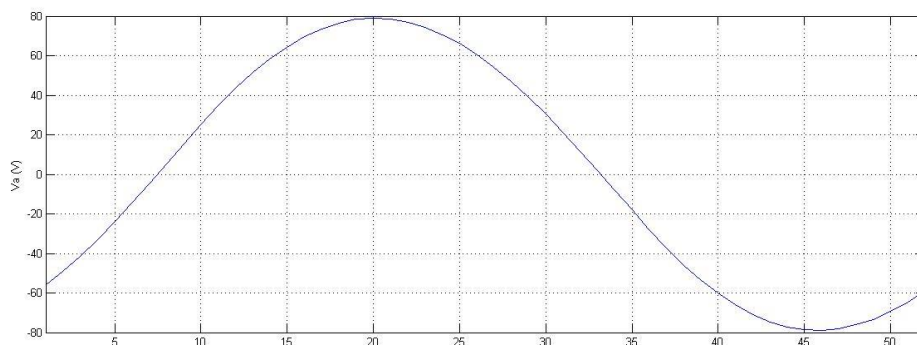
Η μηχανή που προκύπτει από αυτό το σχεδιασμό είναι:



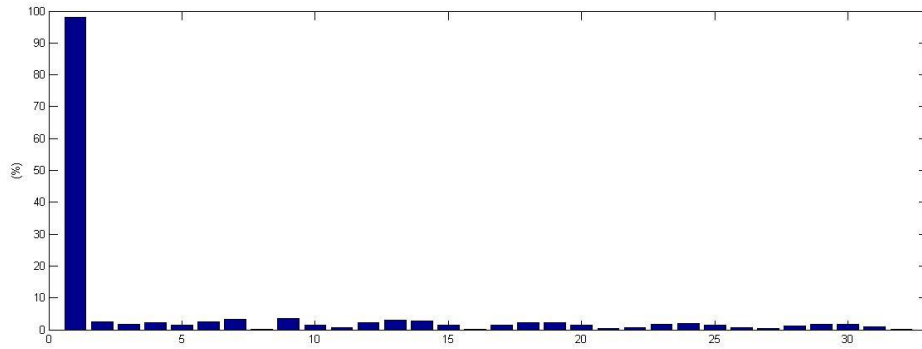
Εικόνα 328: Πεδιακή Αναπαράσταση της μηχανής που προέκυψε



Εικόνα 339: : Η ροπή της μηχανής κατά την περιστροφή της κατά ένα πολικό βήμα



Εικόνα 40: Η φασική τάση κατά την περιστροφή της μηχανής κατά ένα πολικό βήμα



Εικόνα 41: Ανάλυση Αρμονικού Περιεχομένου της τάσης

Επίσης υπολογίστηκαν:

Σύνολο απωλειών: 545 W

Απόδοση: 77,1%

Είναι εμφανές ότι η μηχανή πλήρει πλέον το σύνολο των προδιαγραφών που τέθηκαν.

6.7 Βιβλιογραφία

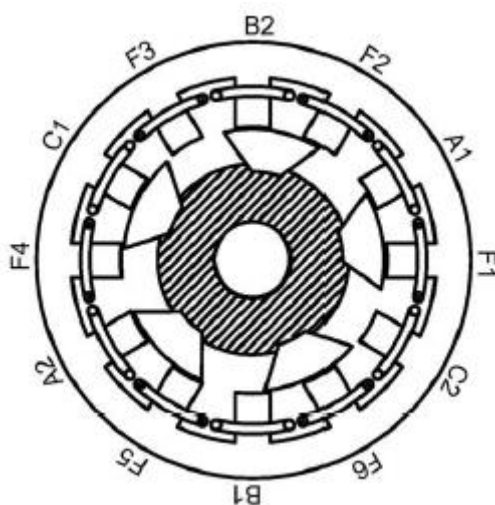
[1] T.Raminosa, C. Gerada, “A comparative study of permanent magnet - synchronous and permanent magnet -flux switching machines for fault tolerant drive systems”, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol.21, no 2, pp.293-302, 2012.

[2]J.T. Chen, Z.Q. Zhu, “Winding configuration and optimal stator and rotor combination of flux-switching PM brushless AC machines”, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol.25, no 2, pp.293-302, 2010.

Κεφάλαιο 7: Μηχανή Εναλλασσόμενης Ροής Τμηματικού Δρομέα

7.1 Εισαγωγή

Η μηχανές εναλλασσόμενης ροής τμηματικού δρομέα εμφανίζονται ως ενδιαφέρουσα εναλλακτική πρόταση για εφαρμογές που απαιτούν μεγάλη πυκνότητα ισχύος. Σημαντικό κατασκευαστικό πλεονέκτημά τους έναντι των κλασικών τοπολογιών που έχουν έκτυπο δρομέα είναι δεν απαιτούν πολύ μεγάλη ποσότητα μαγνήτη για να λειτουργήσουν.



Εικόνα 42: Απεικόνιση της δομής μιας μηχανής εναλλασσόμενης ροής τμηματικού δρομέα

Επίσης η απαίτηση, το υλικό που συνδέει τα τμήματα μαγνητικής λαμαρίνας του δρομέα με τον άξονα της μηχανής, μας δίνει την δυνατότητα, με χρήση κατάλληλων υλικών, να επιτευχθεί πολύ μικρή ροπή αδράνειας. Η μειωμένη ροπή αδράνειας είναι ένα ιδιαίτερα επιθυμητό χαρακτηριστικό για πολύστροφες μηχανές. Παράλληλα εμφανίζεται πολύ μικρή μαγνητική αλληλεπίδραση μεταξύ των φάσεων ισχύος, προσδίδοντας έτσι καλή συμπεριφορά σε περιπτώσεις σφάλματος.



Εικόνα 43: Ανάλυση των μερών της Μηχανής Εναλλασσόμενης Ροής τμηματικού δρομέα. Από αριστερά προς τα δεξιά διακρίνονται, ο δρομέας, τα τυλίγματα, οι μαγνήτες και ο στάτης.

7.2 Προκαταρκτική Σχεδίαση

Οι προδιαγραφές που πρέπει να πληρεί η μηχανή, παραμένουν:

- Εξωτερική Διάμετρος: $D_{εξ\omega\tau.} = 75 \text{ mm}$
- Ενεργό μήκος: $L = 117 \text{ mm}$
- Ονομαστική Ταχύτητα περιστροφής: $n = 7500 \text{ ΣΑΛ}$
- Ελάχιστη Μέση Ροπή: $T_{μέση} = 1,8 \text{ Nm}$
- Μήκος Διακένου: 1mm
- $J_{rms} = 2 \text{ A/mm}^2$

Επίσης, επιλέχθηκε να διατηρηθεί η επιλογή του αριθμού φάσεων, δηλαδή:

- $m = 3$

Σε αντίθεση με τις περιπτώσεις που περιγράφηκαν στα κεφάλαια 5 και 6, στις μηχανές εναλλασσόμενης ροής τμηματικού δρομέα απαιτείται για κάθε δόντι-πόλο ισχύος και ένα δόντι-πόλος διέγερσης. Κατά συνέπεια ο ελάχιστος αριθμός πόλων στάτη που μπορούμε να έχουμε είναι 12. Η επόμενη επιλογή είναι 24. Όμως σ' αυτή την περίπτωση, λόγω του περιορισμένου μεγέθους τα δόντια του στάτη πρέπει να έχουν πολύ μικρό πάχος, με αποτέλεσμα να εγείρονται ζητήματα μηχανικής αντοχής των δοντιών. Έτσι αποφασίστηκε να εξετασθούν μόνο τοπολογίες με 12 πόλους στάτη.

Μια άλλη διαφορά σε σχέση με τις μηχανές των προηγούμενων κεφαλαίων είναι ότι τα τμήματα του δρομέα είναι σχεδιασμένα ώστε να συνδέουν ένα δόντι διέγερσης με το διπλανό δόντι που περιβάλλεται από πηνίο του τυμπάνου. Κατά συνέπεια ο αριθμός των τμημάτων πρέπει να είναι κοντά στη μισή τιμή του 12, δηλαδή 6. Με βάση τα παραπάνω οι συνδυασμοί που εξετάζονται είναι:

Πόλοι Στάτη	Πόλοι Δρομέα
12	5
12	7

Τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα ακόλουθα.

Προσδιορίζεται η ηλεκτρική συχνότητα με βάση τη σχέση: $f_e = N_r \cdot f_m$

Έχοντας κατά νου ότι η μηχανή πρέπει να είναι υψηλών επιδόσεων χωρίς όμως να παρουσιάζει ιδιαίτερα αυξημένες απώλειες, η μαγνητική φόρτιση της μηχανής επιλέγεται ίση με:

$$\bar{B} = 0.75 \text{ T}$$

Θεωρώντας υποβέλτιστη γωνία μεταξύ της εφαπτομενικής συνιστώσας και της ακτινικής συνιστώσας 30° έχουμε:

$$B_n = \bar{B} \cdot \sin(40^\circ) \cong 0,482 \text{ T}$$

$$B_t = \bar{B} \cdot \cos(40) = 0,5745 \text{ T}$$

$$P_t = \frac{B_n B_t}{\mu_o} = \frac{0,482 \cdot 0,5745}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cong 220357,18 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Επίσης γνωρίζουμε ότι:

$$T = \frac{\pi}{2} \cdot D_g^2 \cdot L \cdot P_t \Rightarrow D_g = \sqrt{\frac{2T}{\pi \cdot L \cdot P_t}}$$

Η μέση ροή ανά πόλο είναι:

$$\Phi = \bar{B} \frac{\pi \cdot L \cdot D_g}{N_r}$$

Ενώ ο αριθμός των σπειρών ορίζεται από τη σχέση:

$$N_t = \frac{V_{rms}}{4,44 \cdot f_e \cdot \varphi_{\text{πόλου}} \cdot N_s}$$

Προσδιορίζουμε το ρεύμα:

$$I_{rms} = \frac{A \cdot \pi \cdot D_g}{N_t}$$

Η διατομή των αγωγών μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$A_{cond} = \frac{I}{J}$$

Επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της διατομής των αγωγών:

$$A_{coil} = A_{cond} \frac{N_t}{4}$$

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, μπορούμε ως πρώτη προσέγγιση να θεωρήσουμε αμελητέα την μαγνητική αντίσταση του σιδήρου. Τότε [1] το μήκος το μαγνήτη κατά τη διεύθυνση μαγνήτισης είναι:

$$l_m = -2l_{gap} \frac{\bar{B} \mu_{magnet}}{\mu_o (\bar{B} - B_o)}$$

Όπου B_o η μέγιστη πυκνότητα ροής που μπορεί να επιφέρει ο μαγνήτης στη συγκεκριμένη θερμοκρασία.

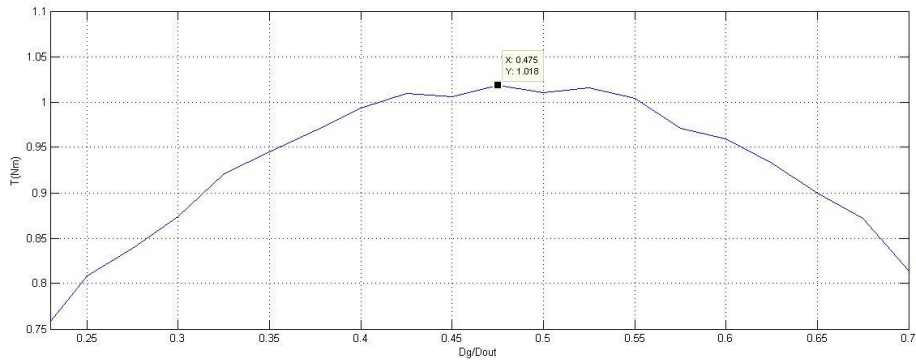
Αφού εκτελέσθηκε η παραπάνω διαδικασία λάβαμε τα εξής αποτελέσματα:

Πόλοι Στάτη	Πόλοι Δρομέα	Μέση Ροπή (Nm)
12	5	0.674
12	7	0.873

7.3 Επιλογή Βέλτιστου D_g

Η διάμετρος του διακένου είναι κατά κοινή παραδοχή η πλέον σημαντική παράμετρος ως προς την ηλεκτρομηχανική μετατροπή. Ως εκ τούτου αποφασίσαμε να διεξάγουμε μια ανάλυση ευαισθησίας προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη τιμή της και μετά να προχωρήσουμε στη μελέτη των υπόλοιπων γεωμετρικών χαρακτηριστικών.

Έτσι, η βέλτιστη διάμετρος διακένου προέκυψε ίση με $D_g = 0,475 \cdot 75mm = 35,62 mm$

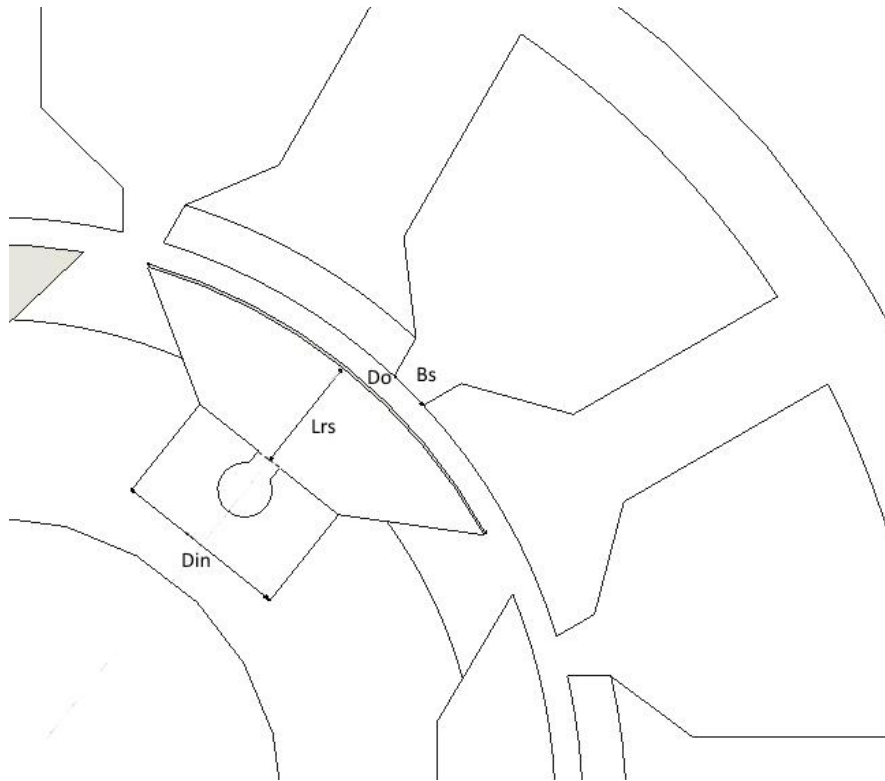


Εικόνα 44: Στο σχήμα βλέπουμε τη μεταβολή της ροπής της μηχανής ως προς D_g , το οποίο είναι κανονικοποιημένο με την εξωτερική διάμετρο της μηχανής.

7.4 Εφαρμογή Μεθοδολογίας Taguchi

Αρχικά πρέπει να επιλεγούν οι γεωμετρικές παράμετροι οι οποίοι θα μεταβάλλονται. Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν είναι:

- Το μήκος του τμήματος δρομέα κατά την αξονική διεύθυνση ως ποσοστό του της ακτίναςδιακένου $2 Lrs/Dg$ (μεταβλητή Α)
- Το έσω μήκος του δρομέα ως ποσοστό του περιφερειακού μήκους Din/Do (μεταβλητή Β)
- Το άνοιγμα της αύλακας Bs (μεταβλητή Γ)
- Το περιφερειακό άνοιγμα του τμήματος δρομέα ως ποσοστό 2 πολικών βημάτων σάτη $Do/2Ts$ (μεταβλητή Δ).



Εικόνα 45: Απεικόνιση των διαστάσεων που χρησιμοποιούνται στη σχεδίαση μέσω της μεθόδου Taguchi

Οι υπόλοιπες παράμετροι θα διαμορφώνονται σε κάθε περίπτωση έτσι ώστε να μην εμφανίζεται έντονος κορεσμός στο σίδηρο. Επίσης ανάλογα με τη γεωμετρία της μηχανής τροποποιούταν το πάχος το μαγνήτη έτσι ώστε συνολικά να διατηρείτε σταθερή ο συνολικός όγκος μαγνήτη. Το επόμενο βήμα της μεθοδολογίας Taguchi περιλαμβάνει την επιλογή του αριθμού των επιπέδων των τιμών καθώς και το ποιές θα είναι οι τιμές αυτές. Επιθυμούμε να εξετάσουμε όσο το δυνατόν περισσότερες επιλογές γι' αυτό θα έχουμε 5 επίπεδα τιμών, που είναι και το μέγιστο δυνατό σύμφωνα με τους πίνακες του κεφαλαίου 4. Οι τιμές των ακραίων επιπέδων (1 & 5) επιλέγονται εποπτικά έτσι ώστε να τηρούνται λογικά και λειτουργικά όρια για την μηχανή και στην περίπτωση μας είναι:

Επίπεδα Τιμών				
Επίπεδο	A	B	Γ	Δ
1	0,1	1	0,5	0,3
-2	0,2	5	0,7	0,4
3	0,3	10	0,9	0,5
4	0,4	15	1,1	0,6
5	0,5	20	1,3	0,7

Πλέον απομένει η προσομείωση των συνδυασμών σύμφωνα με τον πίνακα L25 που είναι:

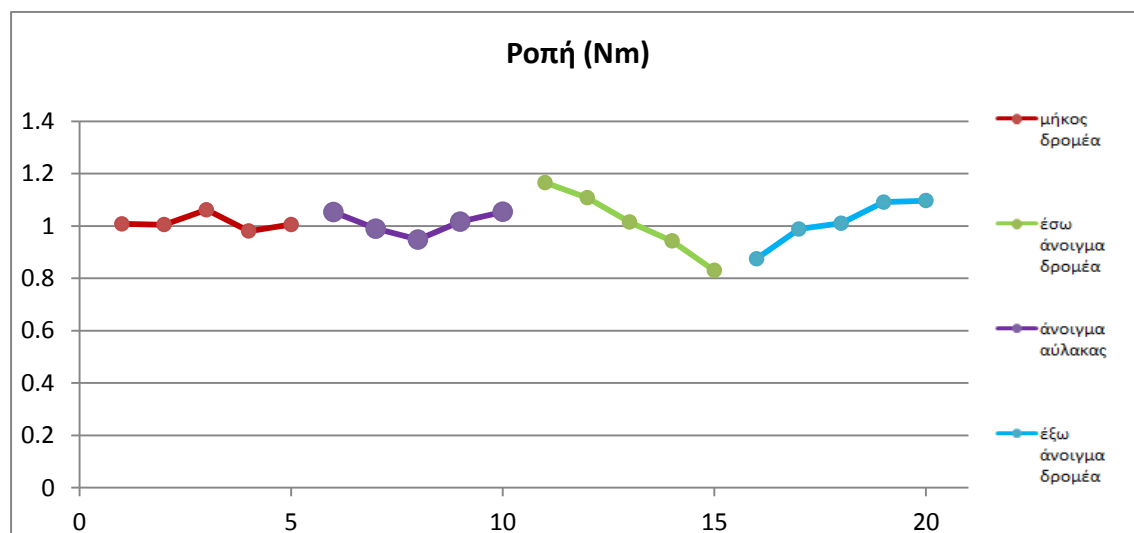
Πίνακας Συνδυασμών Taguchi και τα αποτελέσματά των αντίστοιχων προσομοιώσεων											
A	B	Γ	Δ	Ροπή(Nm)	Κυμ. Ροπής	Τάση (V)	THD(%)	Απώλειες Χαλκού (W)	Απώλειες Σιδήρου (W)	Σύνολο Απωλειών(W)	
1	1	1	1	0,31	0,07	59,64	4,36	193,12	83,61	276,73	
1	2	2	2	0,3	0,06	57,49	4,62	196,73	77,19	273,92	
1	3	3	3	0,29	0,08	55	5,34	200,45	73	273,45	
1	4	4	4	0,26	0,11	54,24	3,68	199,14	64,01	263,15	
1	5	5	5	0,23	0,11	49,43	7,43	208,2	61,98	270,18	
2	1	2	3	0,87	0,04	58,55	4,68	194,34	98,74	293,08	
2	2	3	4	0,81	0,03	57,22	5,68	198,01	95,39	293,39	
2	3	4	5	0,62	0,06	46,54	4,97	201,78	59,72	261,5	
2	4	5	1	0,58	0,09	44,48	5,84	205,64	57,39	263,04	
2	5	1	2	0,87	0,03	62,02	4,53	190,78	104,39	295,17	
3	1	3	5	1,1	0,06	54,4	4,22	195,54	104,1	299,64	
3	2	4	1	1,06	0,09	50,22	4,95	199,25	92,56	291,81	
3	3	5	2	0,98	0,09	46,13	5,65	203,06	81,96	285,02	
3	4	1	3	1,21	0,04	63,87	5,79	188,42	157,74	346,16	
3	5	2	4	1,07	0,04	57,37	3,48	191,92	107,24	299,17	
4	1	4	2	1,41	0,04	51,05	5,29	196,7	130,06	326,76	
4	2	5	3	1	0,09	42,78	4,73	200,46	77,88	278,33	
4	3	1	4	1,58	0,04	60,13	3,53	186,02	160,12	346,14	
4	4	2	5	1,47	0,07	58,23	3,96	189,47	145,45	334,92	
4	5	3	1	1,49	0,07	54,82	4,58	193,04	136,72	329,76	
5	1	5	4	1,36	0,12	44,17	4,61	197,82	107,75	305,57	
5	2	1	5	1,86	0,08	64,16	3,53	178,72	225,13	403,85	
5	3	2	1	1,83	0,06	60,17	3,59	182,16	210,22	392,37	
5	4	3	2	1,38	0,09	54,75	3,99	190,51	141,09	331,6	
5	5	4	3	1,38	0,11	45,59	3,07	194,12	105,94	300,06	

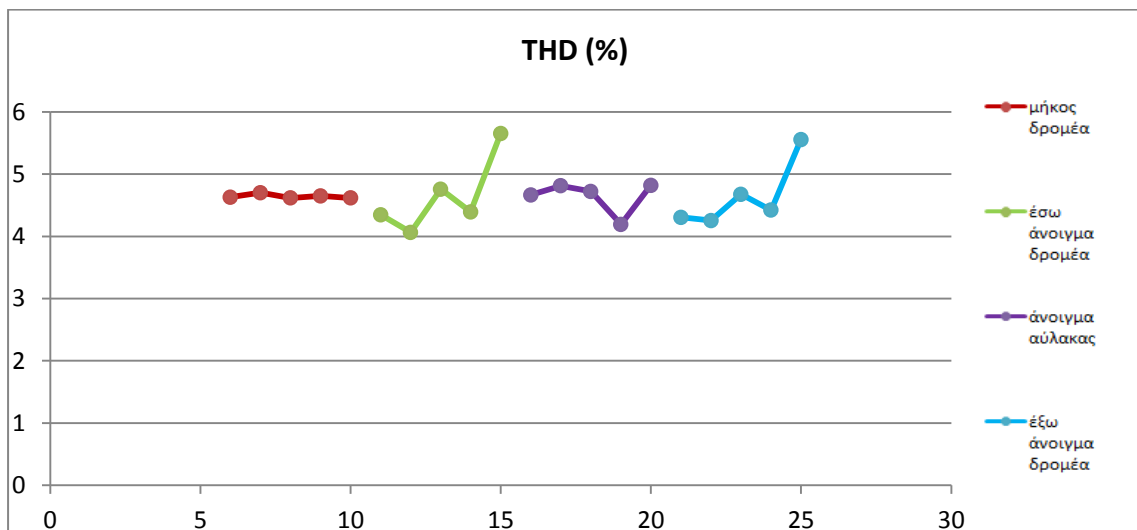
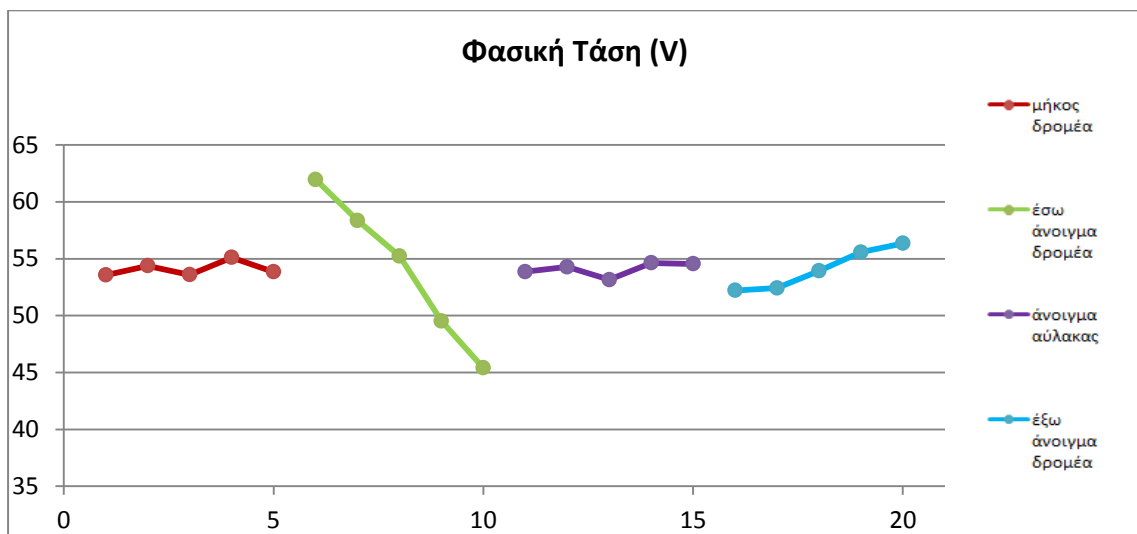
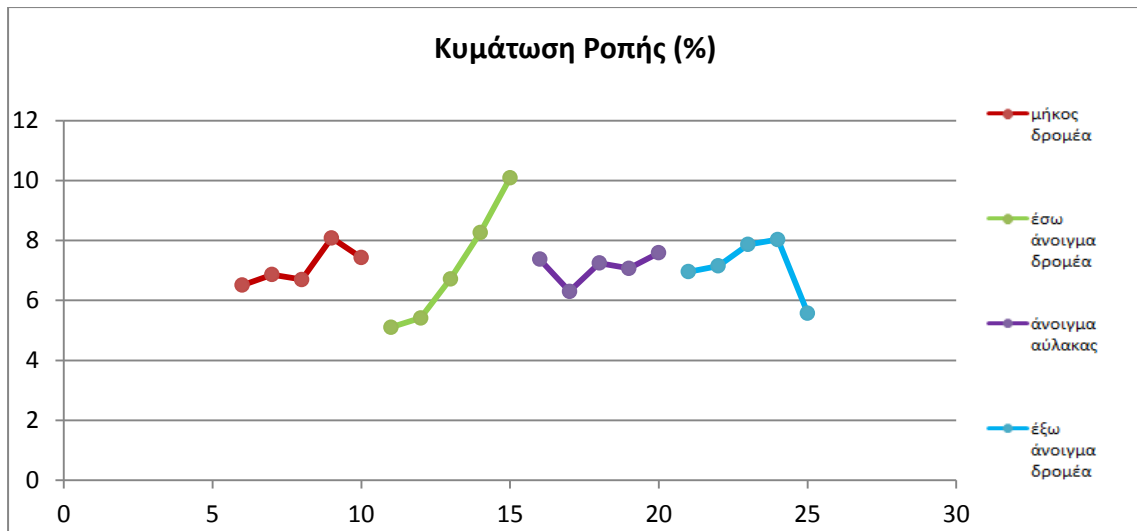
Υπολογισμός Μέσης Επίδρασης

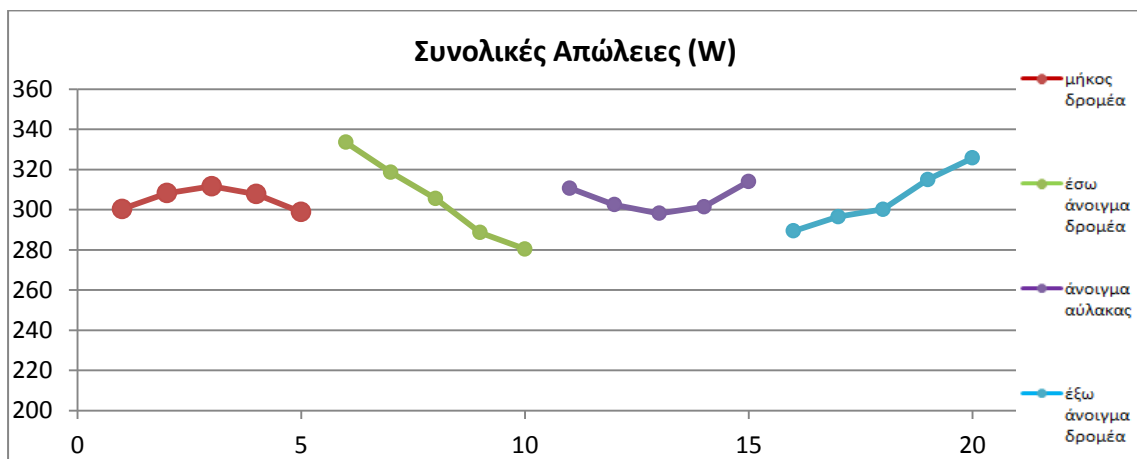
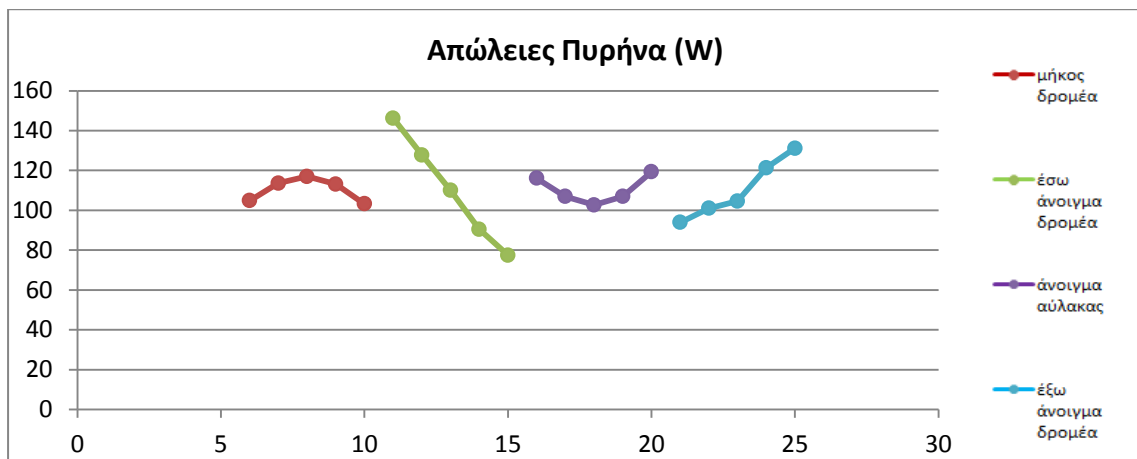
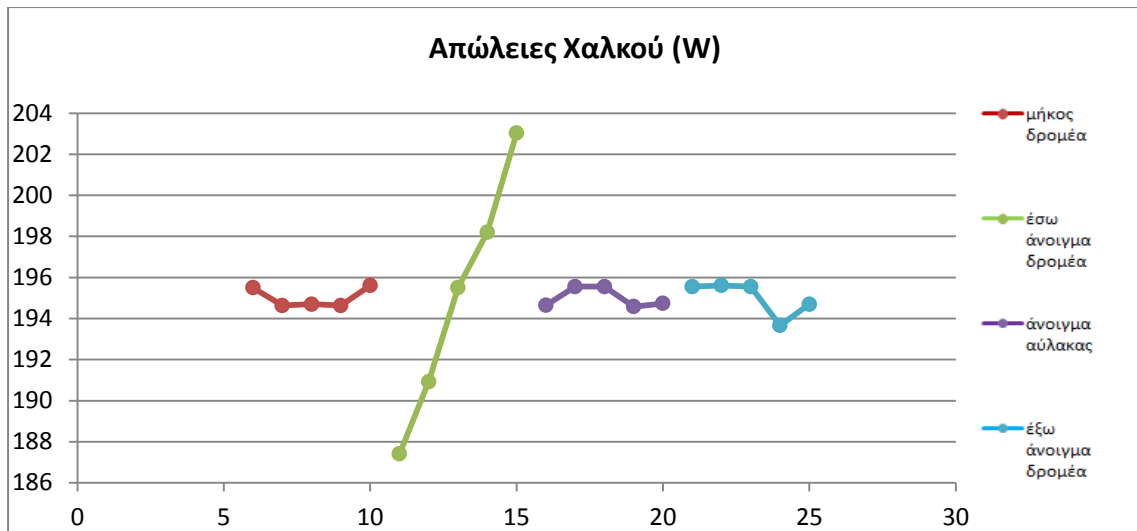
Στη συνέχεια υπολογίζονται οι μέσες τιμές των μεγεθών που προκύπτουν κάθε φορά που εμφανίζεται στο συνδυασμό το εκάστοτε επίπεδο της μεταβλητής. Για παράδειγμα το A1 αντιστοιχεί στη μέση τιμή των παρατηρήσεων των συνδυασμών που η μεταβλητή A (δηλαδή το άνοιγμα της αύλακας) έχει την τιμή του πρώτου επιπέδου, δηλαδή 1 μοίρα. Τα αποτελέσματα είναι:

	Αριθμός Συνδυασμού	Ροπή(Nm)	Κυμ. Ροπής	Τάση (V)	THD(%)	Απώλειες Χαλκού (W)	Απώλειες Σιδήρου (W)	Σύνολο Απωλειών(W)
A1	1	0,276362	0,087132	55,16047	5,084272	199,5281	71,95692	271,4851
A2	2	0,748848	0,050329	53,75954	5,13935	198,1108	83,12549	281,2363
A3	3	1,082718	0,063988	54,39528	4,81879	195,6381	108,7218	304,3599
A4	4	1,389305	0,060787	53,40109	4,416265	193,1382	130,0445	323,1827
A5	5	1,562418	0,093531	53,7654	3,75755	188,6667	158,0242	346,6909
B1	6	1,007918	0,06511	53,56044	4,630312	195,5049	104,8515	300,3563
B2	7	1,004769	0,06859	54,37212	4,701669	194,6348	113,6259	308,2607
B3	8	1,061645	0,066932	53,59242	4,616023	194,6951	117,003	311,6981
B4	9	0,980001	0,080855	55,11157	4,650331	194,6359	113,1374	307,7733
B5	10	1,005318	0,07428	53,84523	4,617892	195,6113	103,2551	298,8665
Γ1	11	1,165312	0,051008	61,96173	4,345873	187,4138	146,1966	333,6103
Γ2	12	1,107356	0,054149	58,36151	4,064536	190,9247	127,7661	318,6908
Γ3	13	1,014475	0,06715	55,23528	4,75895	195,5082	110,0597	305,5679
Γ4	14	0,942598	0,082602	49,52649	4,392785	198,1982	90,45908	288,6573
Γ5	15	0,829911	0,100858	45,39675	5,654083	203,0371	77,39151	280,4286
Δ1	16	1,052778	0,07375	53,86281	4,665402	194,643	116,0985	310,7415
Δ2	17	0,989405	0,063007	54,28609	4,81374	195,5582	106,9375	302,4957
Δ3	18	0,947619	0,072433	53,15552	4,722538	195,5575	102,6596	298,2171
Δ4	19	1,016258	0,070682	54,62728	4,193659	194,582	106,9018	301,4838
Δ5	20	1,053591	0,075896	54,55007	4,820887	194,7413	119,2756	314,0169

Και ακολουθεί η σχηματική τους αναπαράσταση:







7.6 Ανάλυση Ευαισθησίας (ANOVA)

Για κάθε μεταβλητή πρέπει να υπολογιστεί η ποσότητα SS (Sum of Squares) η οποία στην περίπτωση μας ορίζεται ως:

$$SS = 5 \cdot \sum_{i=1}^5 (E - E_i)^2$$

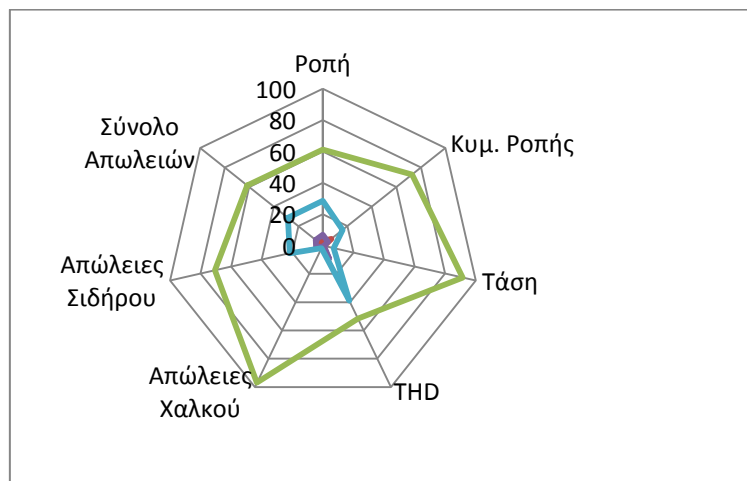
Όπου E: η μέση τιμή όλων των παρατηρήσεων του μεγέθους από τον πίνακα σχεδιασμού Taguchi. E_i η μέση τιμή των παρατηρήσεων του μεγέθους όταν η μεταβλητή έχει το i επίπεδο. Έτσι κατασκευάζεται ο πίνακας:

Πίνακας Αθροίσματος Τετραγώνων							
	Ροπή(N)	Κυμ. Ροπής (%)	Τάση (V)	THD(%)	Απώλειες Χαλκού (W)	Απώλειες Σιδήρου (W)	Σύνολο Απωλειών(W)
A	0,02	0,000824	8,55	0,03	4,930997	716,66	608,04
B	0,35	0,008622	889,6	7,61	746,2	15351,44	9381,91
Γ	0,04	0,000487	7,32	1,35	4,95	976,94	890,74
Δ	0,16	0,001904	68,3	5,75	14,42	4706,36	4329,61

Προκειμένου όμως να έχουμε σαφή εικόνα της επίδρασης της κάθε μεταβλητής πρέπει να υπολογίσουμε τις εκατοστιαίες επιδράσεις οι οποίες είναι:

Εκατοστιαία Επίδραση							
	Ροπή(N)	Κυμ. Ροπής (%)	Τάση	THD(%)	Απώλειες Χαλκού	Απώλειες Σιδήρου	Σύνολο Απωλειών
A	3,13	6,96	0,88	0,17	0,64	3,29	4
B	61,29	72,84	91,36	51,66	96,85	70,58	61,68
Γ	7	4,12	0,75	9,15	0,64	4,49	5,86
Δ	28,58	16,09	7,01	39,02	1,87	21,64	28,46

Τα αποτελέσματα του πίνακα της εκατοστιαίας επίδρασης απεικονίζονται στην εικόνα.

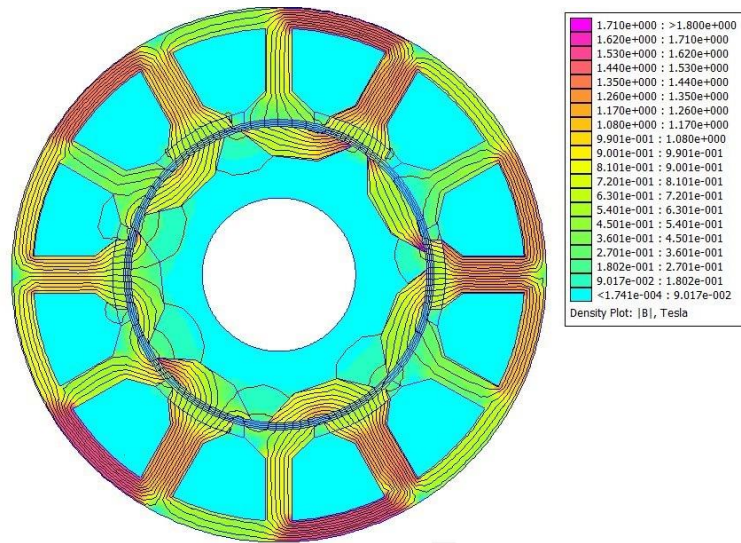


Εικόνα 46: Σχηματική Απεικόνιση της επίδρασης των διαφόρων παραμέτρων στα μεγέθη που εξετάζουμε

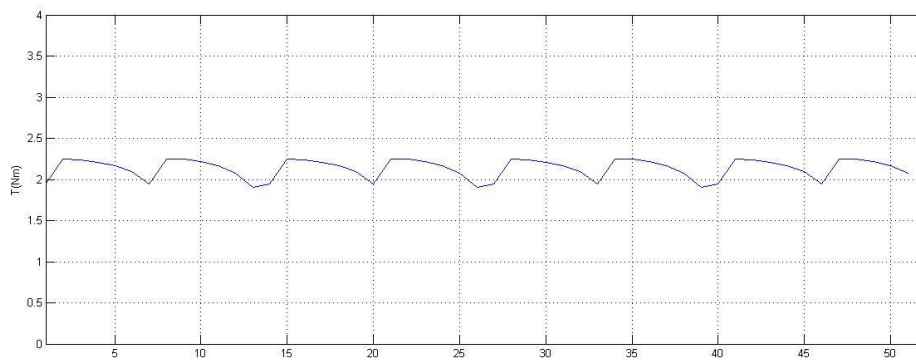
Με βάση τα αποτελέσματα αυτά βλέπουμε ότι ο ένας συνδυασμός που μας εξασφαλίζει πολύ υψηλή ροπή και απώλειες σε λογικό επίπεδο είναι ο A3, B4, Γ1, Δ5.

7.6 Τελικό Σχέδιο

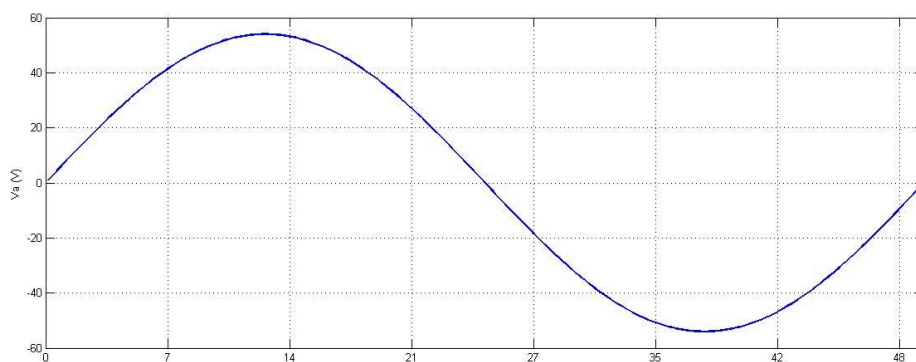
Η μηχανή που προκύπτει από αυτό το σχεδιασμό είναι:



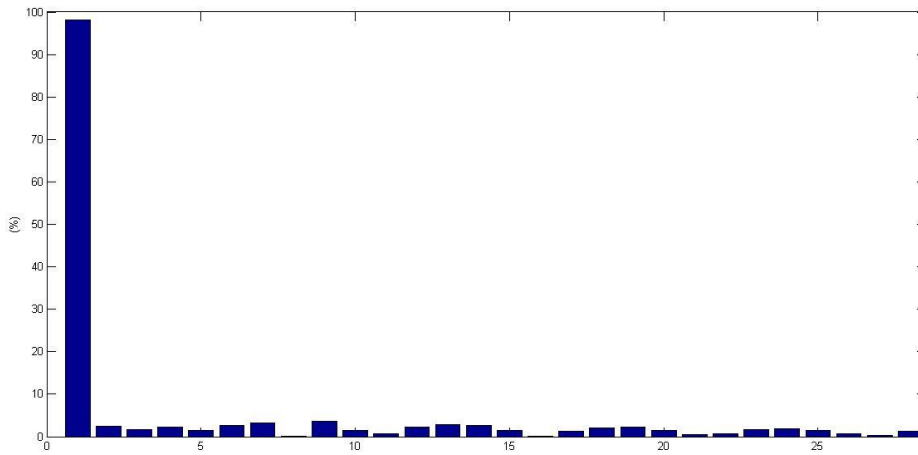
Εικόνα 47: Πεδιακή Αναπαράσταση της μηχανής που προέκυψε



Εικόνα 48: Η ροπή της μηχανής κατά την περιστροφή της κατά ένα πολικό βήμα



Εικόνα 49: Η φασική τάση κατά την περιστροφή της μηχανής κατά ένα πολικό βήμα



Εικόνα 50: Ανάλυση Αρμονικού Περιεχομένου της τάσης

Επίσης υπολογίστηκαν:

- Σύνολο απωλειών: 337 W
- Απόδοση: 80,83%

7.7 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

[1] Ackim Zulu, «Flux switching machines using segmental rotors», PHD Thesis, Newcastle University, 2010

Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα

8.1 Κυριότερα συμπεράσματα

Η εργασία αυτή αποσκοπεί στον σχεδιασμό μιας ηλεκτρικής μηχανής με συγκεκριμένα λειτουργικά χαρακτηριστικά και απόλυτα προσδιορισμένες εξωτερικές διαστάσεις. Για τον σκοπό αυτόν διερευνήθηκαν οι επιδόσεις και οι αποδόσεις τριών διαφορετικών τοπολογιών μηχανών εναλλασσόμενης μαγνητικής ροής με διέγερση μονίμων μαγνητών μέσω αναλυτικών και αριθμητικών μεθόδων. Οι τοπολογίες που εξετάστηκαν αφορούσαν μηχανές εναλλασσόμενης ροής με πυρήνα τύπου «C», μηχανές εναλλασσόμενης ροής με πυρήνα τύπου «E» και μηχανές εναλλασσόμενης ροής με τμηματικό δρομέα.

Μετά από την επιλογή συγκεκριμένου συνδυασμού των διαστάσεων που προέκυψε χρησιμοποιώντας τη μέθοδο σχεδιασμού πειραμάτων Taguchi και οι τρεις τοπολογίες εξασφάλισαν λειτουργικά χαρακτηριστικά που πληρούν πλήρως τις προδιαγραφές.

Συγκεντρωτικά η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και τα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της εργασίας αυτής είναι:

- Η μεθοδολογία σχεδίασης ηλεκτρικών μηχανών που υιοθετήθηκε περιλαμβάνει ένα πρώτο βήμα προσδιορισμού των βασικών παραμέτρων (προκαταρκτική σχεδίαση) με αναλυτικές σχέσεις και ένα δεύτερο βήμα οριστικοποίησης των τελικών τιμών των παραμέτρων (οριστική σχεδίαση), χρησιμοποιώντας λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων.
- Οι διαστάσεις που προέκυψαν κατά την οριστική σχεδίαση της εφαρμογής που μελετήθηκε διαφέρουν αρκετά από αυτές που ορίζει η προκαταρκτική σχεδίαση, καθώς στους υπολογισμούς της προκαταρκτικής σχεδίασης υπεισέρχονται απλοποιήσεις που αλλοιώνουν το ακριβές αποτέλεσμα.
- Στη μηχανή εναλλασσόμενης ροής με πυρήνα τύπου «C» αποδείχθηκε ότι το πάχος του μαγνήτη είναι η παράμετρος που επηρεάζει πιο έντονα σχεδόν το σύνολο των χαρακτηριστικών της μηχανής, ενώ το μήκος το πόλου του δρομέα κατά την ακτινική διεύθυνση είναι η παράμετρος με την ελάχιστη επίδραση.
- Στη μηχανή εναλλασσόμενης ροής με πυρήνα τύπου «E», το σύνολο των παραμέτρων που εξετάζονται έχουν σημαντική επίδραση σ' όλα τα λειτουργικά χαρακτηριστικά παρέχοντας έτσι μεγάλη ευελιξία στη σχεδίαση.
- Στη μηχανές εναλλασσόμενης ροής με τμηματικό δρομέα η παράμετρος σχεδίασης που κυριαρχεί των υπολοίπων είναι το άνοιγμα των αυλάκων του στάτη.
- Η μηχανή εναλλασσόμενης ροής με πυρήνα τύπου «C» εμφανίζει τη μεγαλύτερη ικανότητα παραγωγής ροπής.
- Η μηχανή εναλλασσόμενης ροής με πυρήνα τύπου «E» εμφανίζει τη μεγαλύτερη ικανότητα παραγωγής τάσης.
- Η μηχανή εναλλασσόμενης ροής με τμηματικού δρομέα διαθέτει την καλύτερη ποιότητα ισχύος.

Συνολικά συμπεραίνεται ότι και οι τρεις γεωμετρίες που μελετήθηκαν είναι ικανές να παρέχουν την υψηλής πυκνότητας ισχύος ηλεκτρομηχανική μετατροπή που απαιτεί η εφαρμογή. Κάθε μια εμφανίζει επιμέρους πλεονεκτήματα οπότε έγκειται στο σχεδιαστή να επιλέξει τη καλύτερη τοπολογία ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

8.2 Σημεία Επιστημονικής Συνεισφοράς

Τα κύρια σημεία πρωτότυπης συνεισφοράς της παρούσας εργασίας είναι τα εξής:

- Ανάπτυξη αλγόριθμου παραμετροποιημένης σχεδίασης για τις μηχανές εναλλασσόμενης ροής με πυρήνα τύπου «C», τις μηχανές εναλλασσόμενης ροής με πυρήνα τύπου «E» και τις μηχανές εναλλασσόμενης ροής με τμηματικό δρομέα.
- Σύνδεση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων FEMM με το Matlab με σκοπό την αριθμητική επίλυση των παραμετροποιημένων γεωμετριών.
- Πλήρης ανάλυση των παραπάνω τριών τοπολογιών ηλεκτρικών μηχανών, οι οποίες είναι ελλιπώς μελετημένες και ανεπτυγμένες, σε σχέση με άλλους τύπους μηχανών, για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ταχύτητα λειτουργίας.
- Εφαρμόζεται η μέθοδος Taguchi στη διαδικασία σχεδιασμού των μηχανών μειώνοντας δραστικά το συνολικό χρόνο προσημοιώσεων σε σχέση με τις αντίστοιχες μελέτες ανάλυσης ευαισθησίας, ενώ συγχρόνως δίνει σαφή εικόνα για την επίδραση των εξεταζόμενων παραμέτρων στη λειτουργία των μηχανών.
- Γίνεται εφικτή η σύγκριση των επιμέρους πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων που προσφέρουν στη συγκεκριμένη εφαρμογή οι τρεις εξεταζόμενες τοπολογίες.

8.3. Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

Η εργασία αυτή ανέδειξε ορισμένα σημεία που χρήζουν περαιτέρω συμπληρωματικής διερεύνησης. Τα σημεία αυτά τα οποία προτείνονται για μελλοντική εργασία είναι:

- Χρήση εξελικτικών αλγορίθμων πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης προκειμένου να βρεθεί το σύνολο των βέλτιστων λύσεων που παρέχουν γι' αυτή την εφαρμογή οι εξεταζόμενες τοπολογίες.
- Η εξέταση της συμπεριφοράς των μηχανών αυτών σε συνθήκες σφάλματος.
- Η θερμική ανάλυση αυτών των μηχανών.
- Η αξιολόγηση της κατασκευαστικής δυσκολίας για την υλοποίηση αυτών των τοπολογιών.
- Κατασκευή των τελικών προτεινομένων μηχανών και σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα προβλεπόμενα από την πεδιακή ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία.

