

**Α.Τ.Ε.Ι ΚΡΗΤΗΣ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΝΙΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗΡΑ ΙΣΧΥΟΣ ΕΩΣ 1KW ΧΑΜΗΛΩΝ
ΣΤΡΟΦΩΝ ΜΕ ΜΟΝΙΜΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ.**

**Εισηγητής: ΑΣΚΟΡΔΑΛΑΚΗΣ ΠΑΝΤΕΛΗΣ
Σπουδαστής: ΚΑΛΑΪΤΖΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ**

ΧΑΝΙΑ, 2013

**TECHNOLOGICAL EDUCATIONAL INSTITUTE OF CRETE
BRANCH OF CHANIA
DEPARTMENT OF ELECTRONICS**

THESIS

**CONSTRUCTION OF LOW-SPEED PERMANENT MAGNET
ALTERNATOR, WITH OUTPUT POWER RATED 1KW**

KALAITZAKIS NIKOLAOS

Supervisor: ASKORDALAKIS PANTELIS

CHANIA, 2013

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αν και φαίνεται τυπική η διαδικασία των ευχαριστιών, εντούτοις περιλαμβάνει γνήσια συναισθήματα που έχουν κατασταλάξει κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Κατά την πάροδο του χρόνου που χρειάστηκε για να ολοκληρωθεί η εργασία, οι εμπειρίες ήταν πολλές και ιδιαίτερα χρήσιμες για την μελλοντική πορεία μας στο χώρο της τεχνολογίας.

Για όλα αυτά τα χρήσιμα στοιχεία που αποκομίσθηκαν κύριοι υπεύθυνοι είναι ο εισηγητής καθηγητής του παραρτήματος Τ.Ε.Ι. Χανίων Π. Ασκορδαλάκης και ο καθηγητής Δ. Πατεράκης τους οποίους ευχαριστώ θερμότατα για τις γνώσης και τις πολύτιμες εμπειρίες που μετάδωσαν.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συνάδελφο Σάββα και από το τμήμα Φυσικών Πόρων & Περιβάλλοντος τους Πέτρο και Θοδωρή για τη πολύτιμη βοήθεια που μας προσέφεραν στην κατεργασία μερικών τμημάτων, και γενικά τη βοήθειά τους στον χώρο του εργαστηρίου του μηχανουργείου του Τ.Ε.Ι. αλλά και τις συμβουλές τους πάνω σε μηχανολογικά και ηλεκτρολογικά θέματα.

Περιεχόμενα

Σύνοψη	1
Abstract	3
Εισαγωγή: Ανεμογεννήτριες	4
1. Ανεμογεννήτριες Μεταβλητών Στροφών	4
2. Τα κυρίως τμήματα μιας ανεμογεννήτριας είναι τα εξής:.....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΜΗΧΑΝΩΝ - ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ	10
1.1 Περιγραφή μαγνητικού πεδίου.....	10
1.1.1 Ένταση μαγνητικού πεδίου H	14
1.1.2 Μαγνητική επαγωγή	15
1.1.3 Μαγνητική επαγωγή και ένταση μαγνητικού πεδίου σε υλικό	17
1.2 Μόνιμοι μαγνήτες.....	19
1.2.1 Εισαγωγή	19
1.2.2 Σκληροί φερριτές.....	20
1.2.3 Νεοδύμιο - σίδηρος - βόριο (Nd-Fe-B)	21
1.2.4 Βασικά υλικά παραγωγής μόνιμων μαγνητών	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ.....	23
2.1 Σύνοψη περιγραφή γεννητριών.....	23
2.1.1 Γενικά.....	23
2.1.2 Διάκριση εναλλακτών:.....	24
2.1.3 Κατασκευαστικό μέρος εναλλακτών	26
2.2 Γενική περιγραφή σύγχρονων γεννητριών	27
2.2.1 Στάτης.....	27
2.2.2 Δρομέας (ή ρότορας).....	29
2.2.3 Βαθμός απόδοσης.....	32
2.2.4 Υλικά πειραματικών γεννητριών	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΜΕ ΜΟΝΙΜΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ	34
3.1 Εισαγωγή.....	34
3.1.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μετατροπής άμεσης-οδήγησης.....	35
3.2 Τύποι σύγχρονων μηχανών και οι διαφορές τους.....	36
3.2.1 Πλεονεκτήματα σύγχρονων μηχανών και συγκρίσεις	37
3.2.2 Σύγχρονες μηχανές: Διέγερση ΜΜΠ με ηλεκτρική διέγερση.....	37
3.3 Περιγραφή τοπολογιών μηχανών με μόνιμο μαγνητικό πεδίο.....	38
3.3.1 Προσανατολισμός κενού αέρος: ακτινικός(R) ή αξονικός(A).....	38
3.3.2 Προσανατολισμός πυρήνα στάτη: διαμήκης ροής(L) ή εγκάρσιας ροής(T).....	39

3.3.3 Προσανατολισμός MM ως προς το κενό αέρος: επιφανειακά τοποθετημένοι(SF) ή συγκεντρωτικής ροής(FC).....	40
3.3.4 Προσανατολισμός ως προς το σχήμα του στάτη: με εγκοπές(S) ή χωρίς εγκοπές(SL)	41
3.4 Κυριότεροι συνδυασμοί μηχανών μονίμων μαγνητών.....	42
3.4.1 Συμβατική σύγχρονη μηχανή μόνιμων μαγνητών.....	43
3.4.2 Συμβατική σύγχρονη μηχανή MM με συγκεντρωτική ροή.....	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΙΑΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ.....	46
4.1 Εισαγωγή.....	46
4.2 Κατασκευή περιελίξεων εναλλασσόμενου ρεύματος	48
4.2.1 Τύποι περιελίξεων οπλισμού: Βροχοειδής και κυματοειδής περιελίξεις.....	49
4.2.2 Επίπεδα στρώσεων περιελίξεων.....	53
4.2.3 Γέμισμα αυλάκωσης (S.F.).....	55
4.2.4 Συνδεσμολογία φάσεων: Αστέρα (Υ) και Τριγώνου (Δ).....	57
4.3 Κατασκευή του στάτη.....	58
4.3.1 Αριθμός των πόλων και το βέλτιστο πάχος τους.....	59
4.3.2 Τοποθέτηση μαγνητών στον πυρήνα του ρότορα	60
4.4 Παρασιτικά φαινόμενα	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	67
5.1 Εισαγωγή.....	67
5.2 Επεξεργασία του στάτη	68
5.2.1 Το είδος και η τοπολογία των περιελίξεων	69
5.2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά περιελίξεων	72
5.2.3 Κατασκευή των περιελίξεων.....	76
5.3 Επεξεργασία του ρότορα.....	79
5.3.1 Επιλογή των μονίμων μαγνητών	79
5.4 Πειραματικές μετρήσεις	85
5.4.1 Αποτελέσματα μετρήσεων και γραφήματα	86
5.4.2 Παρατηρήσεις και Συμπεράσματα.....	90
5.4.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	92
Βιβλιογραφία.....	94

Σύνοψη

Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη και κατασκευή μίας σύγχρονης γεννήτριας με διέγερση μόνιμου μαγνητικού πεδίου, με τέτοια σχεδίαση ώστε σε χαμηλές περιστροφές να έχουμε τη καλύτερη δυνατή απόδοση. Στο πλαίσιο αυτό έγινε η ανακατασκευή μίας παλιάς μηχανής από πλυντήριο από την οποία αφαιρέθηκαν όλα τα περιττά μέρη.

Υπάρχει μεγάλο πλήθος εφαρμογών πάνω στις γεννήτριες μόνιμων μαγνητών και αρκετές παραμετροποιήσεις που μπορούν να γίνουν. Πραγματοποιήθηκε έρευνα ανάμεσα στις διάφορες τοπολογίες που υπάρχουν διαθέσιμες στη βιβλιογραφία πριν φτάσουμε στην τελική επιλογή. Για την επιλεγόμενη τοπολογία η οποία είναι μία γεννήτρια ακτινικής ροής με εσωτερικό ρότορα, μελετήθηκαν τα επιμέρους χαρακτηριστικά της και λήφθηκαν υπόψη οι βελτιώσεις που μπορούν να γίνουν.

Στην παρούσα εργασία, αρχικά αναφέρεται η βασική αρχή των μηχανών, ο ηλεκτρομαγνητισμός, ποια είναι η ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά των υλικών κατασκευής και οι ιδιότητες τους. Στη συνέχεια εξηγείται το πώς λειτουργούν οι γεννήτριες, εστιάζοντας στις σύγχρονες γεννήτριες (ή εναλλακτήρες), τα μέρη από τα οποία αποτελούνται και μερικά τεχνικά χαρακτηριστικά τους.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι διάφορων ειδών τοπολογίες που υπάρχουν για γεννήτριες μόνιμων μαγνητών, γίνεται σύγκριση μεταξύ των τοπολογιών αυτών και τελικώς παρουσιάζονται οι πιθανοί συνδυασμοί τους.

Έπειτα παρουσιάζονται οι τρόποι κατασκευής για τα μέρη της γεννήτριας, όπως οι περιελίξεις στο στάτη και το μαγνητικό πεδίο στο ρότορα, οι υπολογισμοί που μπορούν να γίνουν, οι τρόποι σύνδεσης των τμημάτων και τα τεχνικά χαρακτηριστικά που πρέπει να ληφθούν υπόψη.

Εν συνεχεία, περιγράφεται ο τρόπος κατασκευής της γεννήτριας βήμα προς βήμα, όπως και υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων που χρησιμοποιήθηκαν

Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων

τα συμπεράσματα που πηγάζουν από αυτές και καταθέτονται βελτιωτικές προτάσεις.

Λέξεις κλειδιά:

Γεννήτρια, εναλλακτήρας, μόνιμοι μαγνήτες, μικρές ανεμογεννήτριες, χαμηλές στροφές

Abstract

Subject of this research is the study and construction of a synchronous generator (else alternator) with permanent magnet excitation, with such a design so we can get maximum output in low speed operation. In that framework an old machine from a washing machine has taken, all the useless parts have been removed, and it's been reconstructed as a permanent magnet alternator (PMA).

There is a variety of applications upon PMAs and a lot parameterization that can be done. A research has been done amongst the topologies that are known nowadays before the decision is made. For the chosen topology, which is an inner rotor axial flux generator, there's been a further study in its characteristics and the improvement that can be done.

In the current thesis, first mentioned the basic principle of machines, electromagnetism, the electromagnetic behavior of the materials used and their properties. Then it's been demonstrated how generators work focusing on alternators, the parts they consist of and their major technical characteristics.

Continuing, various existing topologies for PMAs are presented, as well as comparison between them and their possible combinations.

Subsequently, it's been analyzed the various ways of construction for each part of the alternator, such as the windings of the stator and the rotor magnetic field. The calculations that need to be done, the ways of connecting parts together and the technical characteristics that needs to be considered.

Then, the way of construction of the alternator is described step by step and the topology chosen, the calculations that are done, as well as the technical characteristics of the material used.

At the final step the measurements taken are represented with the characteristic curves. The inferences of the results are being discussed along with the improvements and the further research that can be done.

Keywords:

Generator, alternator, permanent magnet, low speed, small wind turbine

Εισαγωγή: Ανεμογεννήτριες

1. Ανεμογεννήτριες Μεταβλητών Στροφών



Η αύξηση της παγκόσμιας ζήτησης ενέργειας, η συνεχόμενη μείωση των φυσικών καυσίμων και το αυξανόμενο ενδιαφέρον για την περιβαλλοντολογική μόλυνση κέντρισε το ενδιαφέρον των ειδικών στη ανάπτυξη νέων τρόπων παραγωγής ενέργειας, όπως η αιολική ενέργεια, η ηλιακή κ.α. Η αιολική ενέργεια θεωρείται ο ταχύτερα αναπτυσσόμενος κλάδος της παραγωγής ενέργειας. Σήμερα, η

εγκατεστημένη ισχύς των ανεμογεννητριών διεθνώς καλύπτει πάνω από το 4% της απαιτούμενης ισχύος. Το ενδιαφέρον για την εκμετάλλευση της ενέργειας του ανέμου οφείλεται κυρίως στην ευαισθητοποίηση παγκοσμίως σε θέματα προστασίας του περιβάλλοντος. Οι δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την λειτουργία των θερμοηλεκτρικών σταθμών έχουν οδηγήσει τα τελευταία χρόνια στην άνθηση των λεγόμενων 'εναλλακτικών' τρόπων παραγωγής ενέργειας, οι οποίοι αποσκοπούν κυρίως στην διαφύλαξη της περιβαλλοντικής ισορροπίας και την ορθότερη διαχείριση των περιορισμένων ενεργειακών πόρων του πλανήτη μας. Το κόστος παραγωγής της αιολικής ενέργειας είναι πλέον συγκρίσιμο με το κόστος της θερμοηλεκτρικής, ενώ συνεχώς μειώνεται με την αύξηση της ζήτησης και την ανάπτυξη της τεχνολογίας. Επιπλέον και σε σύγκριση με τις υπόλοιπες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, είναι η φθηνότερη και περισσότερο διαδεδομένη. Έτσι, είναι σαφές πως στα επόμενα χρόνια η αιολική ενέργεια θα διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στο χώρο της απελευθερωμένης αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Όπως είναι γνωστό, η σχεδίαση μιας ανεμογεννήτριας προϋποθέτει τη

μελέτη του αεροδυναμικού, του μηχανικού και του ηλεκτρικού της μέρους, επομένως είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που απαιτεί τη στενή συνεργασία μηχανικών διαφόρων ειδικοτήτων.

Τα τελευταία έτη, η έρευνα στον τομέα των ανεμογεννητριών στοχεύει κυρίως στην ανάπτυξη τεχνολογιών για την βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους. Από την πληθώρα των προτεινομένων διατάξεων, επιλέγεται η εξέταση μιας ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών, με σύγχρονη ηλεκτρική γεννήτρια μονίμων μαγνητών.

Η σύνδεση σύγχρονης ή ασύγχρονης γεννήτριας απευθείας στο δίκτυο, συνεπάγεται τον καθορισμό της συχνότητας λειτουργίας από την συχνότητα του δικτύου, οπότε έχουμε λειτουργία σταθερών στροφών. Η λειτουργία μεταβλητών στροφών, δηλαδή ουσιαστικά η αποδέσμευση από την συχνότητα του δικτύου, επιτυγχάνεται με την παρεμβολή μετατροπένων συχνότητας μεταξύ της ηλεκτρικής γεννήτριας και του δικτύου. Η χρήση μηχανικών κιβωτίων ταχυτήτων μεταβλητού λόγου δε συναντάται στην πράξη. Γενικά, υπάρχει η τάση ανάπτυξης συστημάτων χωρίς μηχανικό κιβώτιο ταχυτήτων (gearless), λόγω των εγγενών μειονεκτημάτων αυτών (κόστος, πολυπλοκότητα, βάρος, απώλεια μεταφερόμενης ισχύος, ανάγκη συντήρησης).

Η λειτουργία μεταβλητών στροφών επιτρέπει τη λειτουργία υπό της βέλτιστες στροφές (δηλαδή με το βέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος) για μεγαλύτερο εύρος ταχυτήτων ανέμου και συνεπώς την καλύτερη εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, με αύξηση της παραγόμενης ενέργειας που μπορεί να φτάσει το 5 έως 10%.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της λειτουργίας μεταβλητών στροφών συνδέεται με τα δυναμικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Οι μηχανικές υπερφορτίσεις στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης (drive train), οι οποίες καταπονούν κυρίως το κιβώτιο ταχυτήτων και προκαλούν αντίστοιχες μεταβολές της ηλεκτρομαγνητικής ροπής και της παραγόμενης ισχύος, εξαρτώνται από τη στρεπτική (torsional) δυσκαμψία και στην περίπτωση των ανεμογεννητριών σταθερών στροφών είναι γενικά εντονότερες αν η κλίση της χαρακτηριστικής στροφών-ροπής της γεννήτριας είναι απότομη. Με την λειτουργία μεταβλητών στροφών η σύνδεση με το δίκτυο γίνεται 'ελαστική' και η επίδραση των μεταβολών του ανέμου μπορεί να μειωθεί με τη χρησιμοποίηση της αδρανείας των στρεφόμενων μαζών για την μείωση των δυναμικών φορτίσεων σε

ολόκληρο το σύστημα και ειδικότερα στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης και το δρομέα. Η μείωση των μηχανικών καταπονήσεων επιτρέπει την αύξηση της αναμενόμενης διάρκειας ζωής των μηχανικών συνιστωσών, τη βελτίωση της αξιοπιστίας της διάταξης καθώς και την ορθότερη διαστασιολόγηση των στοιχείων του μηχανικού μέρους (αποφυγή του λεγόμενου over-engineering), με συνακόλουθη μείωση του ολικού βάρους και κόστους.

Σημαντικό πλεονέκτημα είναι επίσης η 'φιλικότητα' που παρουσιάζουν προς το ηλεκτρικό δίκτυο με τη χρήση κατάλληλου τύπου αντιστροφέα στην έξοδο. Στον ορό αυτό συμπεριλαμβάνεται η καλύτερη ποιότητα ισχύος που παρέχουν, η δυνατότητα λειτουργίας με ρυθμιζόμενο συντελεστή ισχύος (επαγωγικό ή χωρητικό) ανάλογα με τις ανάγκες και ακόμα η δυνατότητα ρύθμισης της ενεργού ισχύος και του ρυθμού μεταβολής αυτής. Σε περίπτωση βραχυκυκλώματος, το κύκλωμα ελέγχου είναι σε θέση να απομονώσει ταχύτατα τη διάταξη, ελαχιστοποιώντας έτσι την συνεισφορά της γεννήτριας. Ας σημειωθεί ότι η δυνατότητα ρύθμισης της ροής ισχύος, που είναι ιδιαίτερα επιθυμητή σε αιολικά πάρκα υπό μερική φόρτιση ή σε απομονωμένη λειτουργία, δεν είναι γενικά ευχερής με συστήματα ανεμογεννητριών σταθερών στροφών.

Ανάμεσα στα πλεονεκτήματα των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών συγκαταλέγεται και η μείωση των επιπέδων του θορύβου, όταν οι στρόφες είναι χαμηλές. Ο παραγόμενος θόρυβος μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα όταν οι ανεμογεννήτριες εγκαθίστανται κοντά σε κατοικημένες περιοχές.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα των διατάξεων μεταβλητών στροφών είναι το αυξημένο κόστος και πολυπλοκότητα λόγω της ύπαρξης των μετατροπένων ηλεκτρονικών ισχύος. Ένα ακόμα πρόβλημα είναι η έγχυση αρμονικών στο δίκτυο με την παραμόρφωση της τάσης εξόδου.

Λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων τους, η χρήση των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών αναμένεται να γενικευθεί στο μέλλον με την ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών ισχύος, η οποία επιτρέπει την κατασκευή μετατροπένων ισχύος με χαμηλό κόστος, υψηλή αξιοπιστία και πολύ ικανοποιητικά λειτουργικά χαρακτηριστικά.

Η επιλογή της σύγχρονης γεννήτριας προσφέρει τη δυνατότητα ευρείας μεταβολής της ταχύτητας λειτουργίας της μηχανής (π.χ. 5% έως 110% των

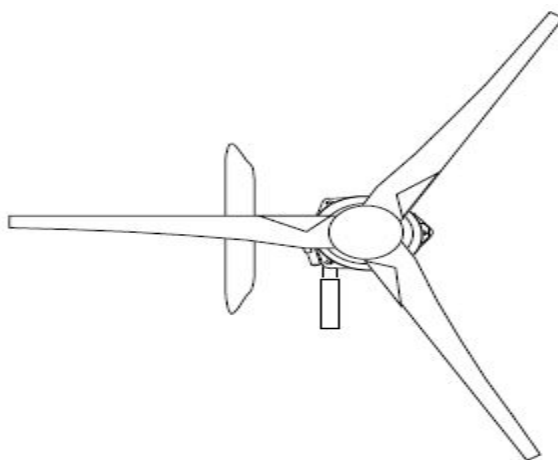
ονομαστικών στροφών). Το ίδιο μπορεί να επιτευχθεί και με τη χρήση ασύγχρονης γεννήτριας, με τη διαφορά ότι απαιτείται σαφώς πιο σύνθετος μετατροπέας ισχύος για την οδήγηση της (συνήθως πηγής τάσης PWM) καθώς και πιο σύνθετος έλεγχος.

Αντίθετα, χρησιμοποιώντας σύγχρονη γεννήτρια αρκεί ένας απλός μη ελεγχόμενος ανορθωτής. Η σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών προσφέρει μια σειρά από πλεονεκτήματα, όπως οι μηδενικές απώλειες χαλκού στο δρομέα, η απλούστερη κατασκευή, το μικρότερο βάρος και όγκος για τα ίδια ονομαστικά μεγέθη, με μειωμένες απώλειες και άρα καλύτερο βαθμό απόδοσης.

Τα μειονεκτήματα είναι ότι οι τιμές των υλικών μονίμων μαγνητών είναι σχετικά υψηλές (με εξαίρεση τους φερρίτες) και ότι τα μαγνητικά χαρακτηριστικά μεταβάλλονται με το χρόνο. Ωστόσο, με δεδομένο τον τρόπο σχεδίασης των γεννητριών αυτών, είναι δυνατή η ενσωμάτωση μεγάλου αριθμού μαγνητικών πόλων ώστε να καθίστανται περιττή η χρήση του κιβωτίου ταχυτήτων ανύψωσης των στροφών. Για τους ανωτέρω λόγους οι σύγχρονες γεννήτριες μονίμων μαγνητών συνιστούν αντικείμενο συνεχούς μελέτης τα τελευταία χρόνια και η χρήση τους σε συστήματα ανεμογεννητριών αποτελεί πραγματικά μια τεχνολογία αιχμής.

2. Τα κυρίως τμήματα μιας ανεμογεννήτριας είναι τα εξής:

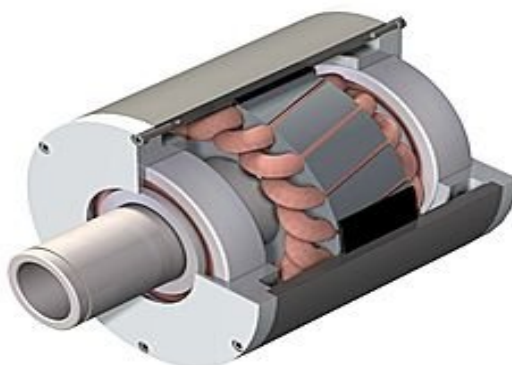
α) Πτέρυγες/ σύστημα ρότορα:



Εικόνα 1: Πτερύγια ανεμογεννήτριας

Το σύστημα του ρότορα αποτελείται από δύο ή τρεις πτέρυγες και είναι φτιαγμένες συνήθως από υαλόνημα. Οι πτέρυγες μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε περιστροφικές δυνάμεις μπορούν να στρέψουν μια γεννήτρια. Η ενίσχυση με ύφανση γυαλιού που διαρρέει όλο το μήκος τους, εξασφαλίζει την υψηλή ανθεκτικότητά τους, διατηρώντας το βάρος τους ιδιαίτερα μικρό.

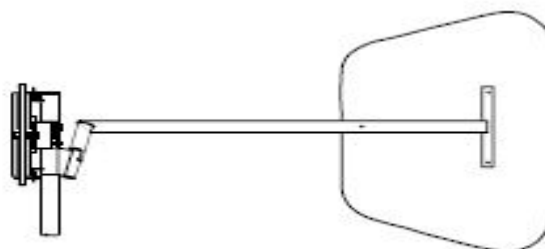
β) Ηλεκτρική γεννήτρια:



Εικόνα 2: Σύγχρονη ηλεκτρική γεννήτρια

Τον ρόλο κλειδί στη μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική τον έχει η ηλεκτρική γεννήτρια, είναι το μέσο που μετατρέπει την κινητική ενέργεια που λαμβάνει ο ρότορας σε ηλεκτρική ενέργεια. Υπάρχουν διάφορων ειδών γεννήτριες και διατάξεις οι οποίες έχουν εφαρμογή στις ανεμογεννήτριες ωστόσο την προνομιακή θέση κατέχουν οι σύγχρονες γεννήτριες άμεσης-οδήγησης τις οποίες θα αναλύσουμε παρακάτω.

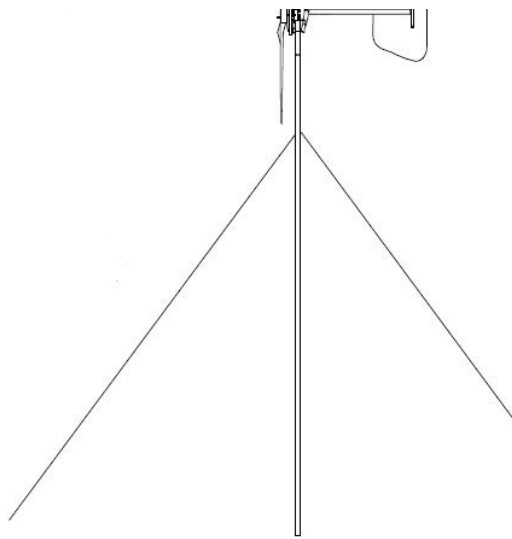
γ) Σύστημα ουράς



Εικόνα 3: Σύστημα ουράς ανεμογεννήτριας

Το σύστημα ουράς, αποτελούμενο από το σωλήνα της ουράς, το πτερύγιο και ένα γραμμικό επενεργητή διατηρεί τον ρότορα εντός της ροής του ανέμου σε ταχύτητες που του έχουν οριστεί. Το σύστημα ελέγχου μέσω του γραμμικού επενεργητή, στρέφει τον ρότορα εκτός ροής ανέμου για να περιορίσει την ταχύτητα του.

δ) Ιστός ανεμογεννήτριας



Εικόνα 4: Ιστός στήριξης ανεμογεννήτριας

Τον ιστό, ο οποίος στηρίζει όλη την παραπάνω ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση. Ο ιστός είναι συνήθως σωληνωτός ή δικτυωτός και σπανίως από οπλισμένο σκυρόδεμα.

ε) Βάση ανεμογεννήτριας

Η βάση στηρίζει όλο το σύστημα της ανεμογεννήτριας και είναι κατασκευασμένη με το ίδιο υλικό με αυτό του ιστού. Το μεγαλύτερο μέρος της βάσης βρίσκεται κάτω από το έδαφος το οποίο είναι προτιμότερο να είναι βραχώδες και γύρω από αυτό χρησιμοποιείται σκυρόδεμα για την σταθεροποίηση του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΜΗΧΑΝΩΝ - ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

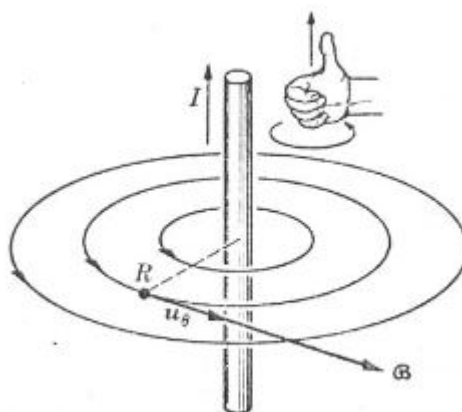
1.1 Περιγραφή μαγνητικού πεδίου

Μία από τις θεμελιώδεις ιδέες του μαγνητισμού είναι η έννοια του μαγνητικού πεδίου. Όταν σε μία περιοχή του χώρου δημιουργείται μαγνητικό πεδίο αυτό σημαίνει, ότι στην περιοχή αυτή υπάρχει μία μεταβολή της ενέργειας. Ακόμη περισσότερο, υπάρχει μία βαθμίδα ενέργειας, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση δυνάμεων. Οι δυνάμεις, που εμφανίζονται ανιχνεύονται από την επιτάχυνση ενός ηλεκτρικού φορτίου, που κινείται μέσα στο μαγνητικό πεδίο, από την δύναμη, που ασκείται σε ρευματοφόρο αγωγό, από την στρέψη ενός μαγνητικού διπόλου, όπως ο ραβδοειδής μαγνήτης ή ακόμη και από των αναπροσανατολισμό των μαγνητικών ροπών των ηλεκτρονίων σε ορισμένους τύπους ατόμων. Η απόκλιση της βελόνας μιας πυξίδας, που αποτελεί παράδειγμα μαγνητικού διπόλου, είναι ίσως η πιο οικεία ιδιότητα ενός μαγνητικού πεδίου.

Το μαγνητικό πεδίο είναι πάντα αποτέλεσμα της κίνησης ηλεκτρικών φορτίων. Για παράδειγμα, ένα ηλεκτρικό ρεύμα που ρέει σε αγωγό, όπως πρώτος ανακάλυψε ο Oersted το 1819. Μαγνητικό πεδίο παράγεται και από έναν μόνιμο μαγνήτη. Στην περίπτωση αυτή, δεν υπάρχουν συμβατικά ηλεκτρικά ρεύματα, αλλά η τροχιακή και περιστροφική κίνηση των ηλεκτρονίων, τα λεγόμενα ρεύματα Ampère, στο εσωτερικό του μόνιμου μαγνήτη, που οδηγούν στη μαγνήτιση του υλικού στον εσωτερικό, και στην δημιουργία μαγνητικού πεδίου στον εξωτερικό χώρο. Το μαγνητικό πεδίο ασκεί δυνάμεις τόσο σε ρευματοφόρους αγωγούς, όσο και σε μόνιμους μαγνήτες.

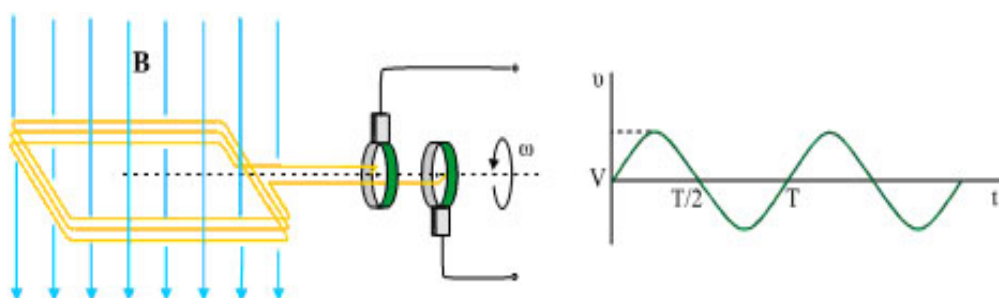
Η δράση των μαγνητικών πεδίων είναι ο βασικός μηχανισμός μετατροπής ενέργειας στους κινητήρες, στις γεννήτριες και στους μετασχηματιστές. Τέσσερις είναι οι βασικές αρχές σύμφωνα με τις οποίες δρουν τα μαγνητικά πεδία:

1. Ένας ρευματοφόρος αγωγός παράγει γύρω του μαγνητικό πεδίο, όπως φαίνεται στο σχήμα παρακάτω.



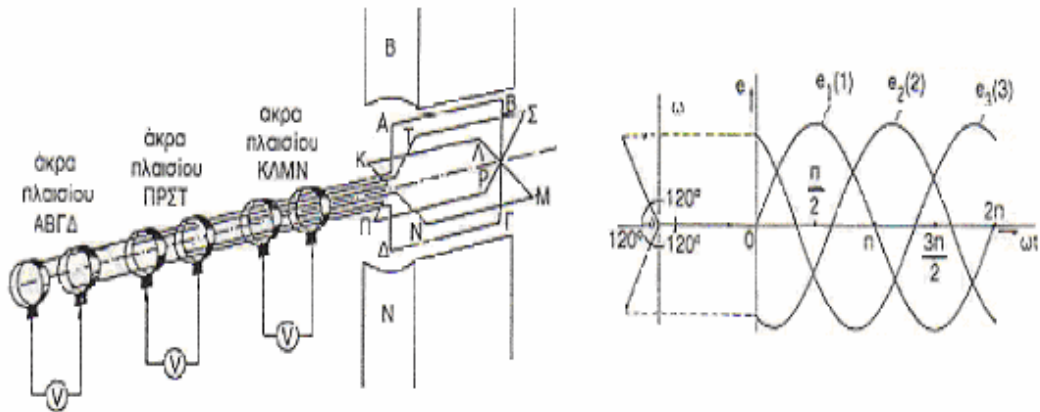
Σχήμα 1-1: Ρευματοφόρος αγωγός

2. Ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο του οποίου οι δυναμικές γραμμές διέρχονται μέσα από κάποιο πηνίο (αγωγός σε σπείρες), επάγει τάση στα άκρα του πηνίου (σ' αυτήν την αρχή βασίζεται η λειτουργία του μετασχηματιστή).
3. Σ' ένα ρευματοφόρο αγωγό που βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο εξασκείται δύναμη εξ' επαγωγής (αρχή λειτουργίας του κινητήρα).
4. Στα άκρα ενός αγωγού που κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο επάγεται τάση (αρχή λειτουργίας της γεννήτριας).
 - i. Όταν έχουμε περιστροφή ενός πλαισίου με το επίπεδο του κάθετο σε μαγνητικό πεδίο (B), παράγεται Η.Ε.Δ. μίας φάσης στα άκρα του (σχήμα 1-2).



Σχήμα 1-2: Καμπύλη της Η.Ε.Δ. ενός πλαισίου.

- ii. Η περιστροφή τριών πλαισίων τοποθετημένων έτσι ώστε να σχηματίζουν γωνία 120 ηλεκτρικές μοίρες μεταξύ τους, μέσα σε μαγνητικό πεδίο (B) έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση εναλλασσόμενης Η.Ε.Δ τριών φάσεων στα άκρα του (σχήμα 1-3).



Σχήμα 1-3: Καμπύλες της Η.Ε.Δ. των τριών πλαισίων.

Πιο συγκεκριμένα στο Σχ. 1-3 διακρίνεται:

- ✓ **η καμπύλη της Η.Ε.Δ (1)**, που δημιουργείται από την περιστροφή του πλαισίου (1) με πλευρικούς αγωγούς ΑΒ, ΓΔ μέσα στο μαγνητικό πεδίο.
- ✓ **η καμπύλη της Η.Ε.Δ (2)**, που δημιουργείται από την περιστροφή του πλαισίου (2) με πλευρικούς αγωγούς ΚΛ,ΜΝ μέσα στο μαγνητικό πεδίο και καθυστερεί ως προς την καμπύλη (1) κατά 120 μοίρες που είναι η διαφορά γωνίας τοποθέτησης των δυο πλαισίων και
- ✓ **η καμπύλη της Η.Ε.Δ (3)**, δημιουργείται από την περιστροφή του πλαισίου (3) με πλευρικούς αγωγούς ΠΡ,ΣΤ μέσα στο μαγνητικό πεδίο και καθυστερεί ως προς την καμπύλη (2) κατά 120 μοίρες που είναι η διαφορά γωνίας τοποθέτησης των δυο πλαισίων.

Η καθυστέρηση αυτή οφείλεται γιατί ότι συμβαίνει στον αγωγό ΑΒ μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, θα συμβεί το ίδιο στον αγωγό ΚΛ μετά την στροφή του συστήματος των πλαισίων κατά 120 μοίρες και θα συμβεί το ίδιο στον αγωγό ΠΡ μετά από στροφή του συστήματος των πλαισίων κατά 120 μοίρες.

Στην τριφασική γεννήτρια Ε.Ρ το ένα από τα άκρα των πλαισίων συνδέονται μεταξύ τους, έτσι ώστε, να εξέρχονται τρία ελεύθερα άκρα. Αυτά συνδέονται τελικά στα δακτυλίδια που πλέον είναι τρία (και όχι έξι.) Οι τριφασικές γεννήτριες Ε.Ρ μπορούν να είναι κατασκευασμένες είτε με:

- α)** πλαίσια περιστρεφόμενα μέσα σε ακίνητο μαγνητικό πεδίο, είτε με
- β)** πλαίσια ακίνητα μέσα σε μαγνητικό πεδίο που στρέφεται.

Οι στιγμιαίες τιμές που παράγουν τα δυο στρεφόμενα πλαίσια μέσα στο

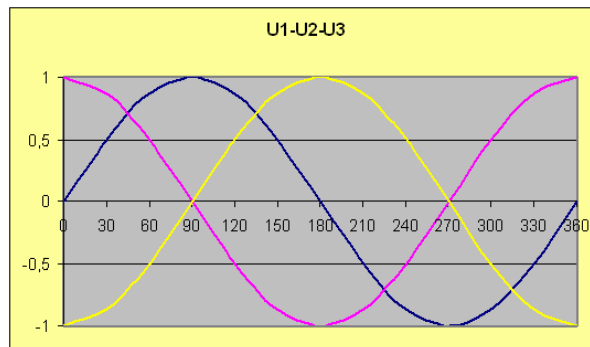
μαγνητικό πεδίο, περιγράφονται απ'τις σχέσεις:

$$u_1 = u_m * \eta\mu(\omega t) \quad (6)$$

$$u_2 = u_m * \eta\mu(\omega t + 2\pi/3) \quad (7)$$

$$u_3 = u_m * \eta\mu(\omega t - 2\pi/3) \quad (8)$$

και παρουσιάζονται στην Εικ.1-1.



Εικόνα 1-1: Στιγμαίεις τιμές τάσης

Το άθροισμα των στιγμιαίων τιμών των τάσεων για την κάθε χρονική στιγμή, είναι μηδέν. Δηλαδή:

$$u = u_1 + u_2 + u_3 \Leftrightarrow u=0$$

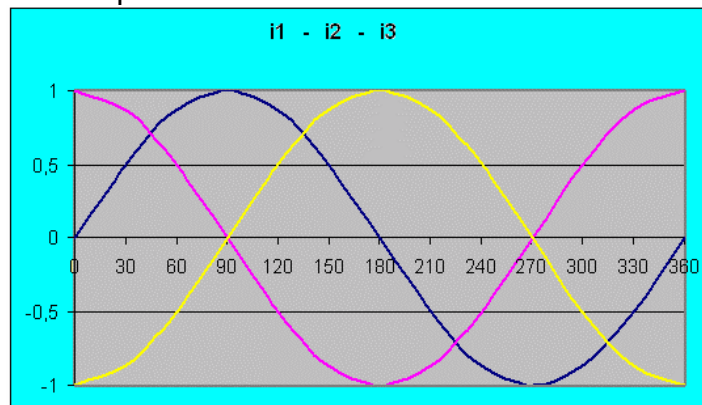
Οι στιγμιαίες τιμές των εντάσεων των ρευμάτων που διαρρέουν τα δυο στρεφόμενα πλαίσια μέσα στο μαγνητικό πεδίο, αντίστοιχα είναι: (Εικ. 1.2)

$$i_1 = I_m * \eta\mu \omega t \quad (9)$$

$$i_2 = I_m * \eta\mu(\omega t + 2\pi/3) \quad (10)$$

$$i_3 = I_m * \eta\mu(\omega t - 2\pi/3) \quad (11)$$

και παρουσιάζονται στην Εικ.1-2.



Εικόνα 1-2: Στιγμαίεις τιμές έντασης ρεύματος

Τέλος, το άθροισμα των στιγμιαίων τιμών των εντάσεων των ρευμάτων

για την κάθε χρονική στιγμή , είναι μηδέν. Δηλαδή:

$$\mathbf{i} = \mathbf{i}_1 + \mathbf{i}_2 + \mathbf{i}_3 \qquad \mathbf{i} = \mathbf{0} \qquad (12)$$

1.1.1 Ένταση μαγνητικού πεδίου H

Υπάρχουν πολλοί τρόποι να ορισθεί η ένταση του μαγνητικού πεδίου H . Για να δοθεί έμφαση στη σχέση μαγνητικού πεδίου H και ηλεκτρικού ρεύματος, είναι καλύτερα η μονάδα της έντασης του μαγνητικού πεδίου, η ένταση του ρεύματος ανά μέτρο, να ορισθεί με όρους ρεύματος. Το μαγνητικό πεδίο H είναι η ένταση του ρεύματος ανά μέτρο, A/m, που παράγεται από ένα σωληνοειδές απείρου μήκους, που περιέχει n περιελίξεις ανά μέτρο και διαρρέεται από ρεύμα έντασης $1/n$ A. Βέβαια, το σωληνοειδές άπειρου μήκους είναι μία υποθετική έννοια. Ένας πιο πρακτικός, εναλλακτικός, τρόπος να ορισθεί η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι ο ακόλουθος. Ρεύμα έντασης 1A που διαρρέει έναν ευθύγραμμο αγωγό μήκους ενός μέτρου παράγει ένταση εφαπτομενικού μαγνητικού πεδίου $1/4\pi$ A/m σε ακτινική απόσταση ενός μέτρου.

Η παραπάνω θεώρηση του μαγνητικού πεδίου H καθορίζεται μόνον από το μέγεθος και την κατανομή των ρευμάτων, που το παράγουν, και είναι ανεξάρτητη από το μαγνητικό μέσο. Η θεώρηση αυτή επιτρέπει την διάκριση μεταξύ μαγνητικού πεδίου και μαγνητικής επαγωγής. Όπως θα δούμε, όμως, στα επόμενα η θεώρηση αυτή πρέπει να τροποποιηθεί υπό προϋποθέσεις, ιδιαίτερα όταν λαμβάνονται υπ' όψιν πεδία απομαγνήτισης στα μαγνητικά υλικά. Στην περίπτωση αυτή είναι απαραίτητο να ορισθεί η μονάδα έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος.

Δύο ευθύγραμμοι ρευματοφόροι αγωγοί απείρου μήκους, τοποθετούνται παράλληλα σε απόσταση d στο κενό. Το μέτρο της δύναμης, που ασκούν ο ένας στον άλλο ανά μονάδα μήκους δίνεται από τη σχέση (9):

$$F = \frac{\mu_0 \times I_2}{2 \times \pi \times d} \quad N/m \quad (13)$$

Όταν οι αγωγοί είναι από το ίδιο υλικό με την ίδια διατομή, βρίσκονται σε απόσταση $d = 1 \text{ m}$, και διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα I , η δύναμη, που ασκείται ανά μονάδα μήκους είναι ίση με $2 \times 10^{-7} \text{ N/m}$. Στην περίπτωση αυτή η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος I ισούται με 1 A . Η σταθερά μ_0 , η διαπερατότητα του κενού, είναι ίση με $4\pi \times 10^{-7} \text{ kgms}^{-2}\text{A}^{-2}$ στο σύστημα μονάδων SI και $\mu_0 = 1$ στο σύστημα μονάδων CGS.

1.1.2 Μαγνητική επαγωγή

Όταν ένα μαγνητικό πεδίο παράγεται σε ένα μέσο από ένα ηλεκτρικό ρεύμα, η απόκριση του μέσου είναι η μαγνητική του επαγωγή \mathbf{B} . Η μαγνητική επαγωγή ορισμένες φορές αναφέρεται και σαν πυκνότητα μαγνητικής ροής, που είναι σωστός όρος, ενώ άλλες φορές αναφέρεται, ατυχώς, και σαν μαγνητικό πεδίο. Όταν στον κενό χώρο δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο εμφανίζεται η μαγνητική ροή Φ . Η μαγνητική ροή δίνεται σε μονάδες weber (Wb) και ο ρυθμός μεταβολής της μπορεί να μετρηθεί, καθώς παράγει ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) σε ένα κλειστό κύκλωμα αγωγού μέσα από τον οποίο περνά η μαγνητική ροή. Όμως, το ποσό μαγνητικής ροής που παράγεται από ένταση μαγνητικού πεδίου \mathbf{H} , εξαρτάται από τις ιδιότητες του μέσου και μεταβάλλεται από μέσο σε μέσο. Η μαγνητική επαγωγή μπορεί να ορισθεί σαν η μαγνητική ροή 1 Wb , που περνά από επιφάνεια εμβαδού 1 m^2 . Καθώς η μαγνητική ροή εξαρτάται από το μέσο, η μαγνητική επαγωγή είναι κι αυτή ιδιότητα του μέσου, σε αντίθεση με την ένταση του μαγνητικού πεδίου, που είναι μία ιδιότητα του χώρου.

Συνηθέστερα, η μαγνητική επαγωγή ορίζεται με όρους δύναμης, που ασκείται σε κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο ή σε ηλεκτρικό ρεύμα και μετράται σε μονάδες tesla (T), κατ' αναλογία προς τον ορισμό της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, που ορίζεται με όρους δύναμης, που ασκείται σε στατικά ηλεκτρικά φορτία. Εάν ένα ηλεκτρικό φορτίο q κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο με ταχύτητα \mathbf{v} η δύναμη \mathbf{F} , που ασκείται στο φορτίο δίνεται από τη σχέση (10):

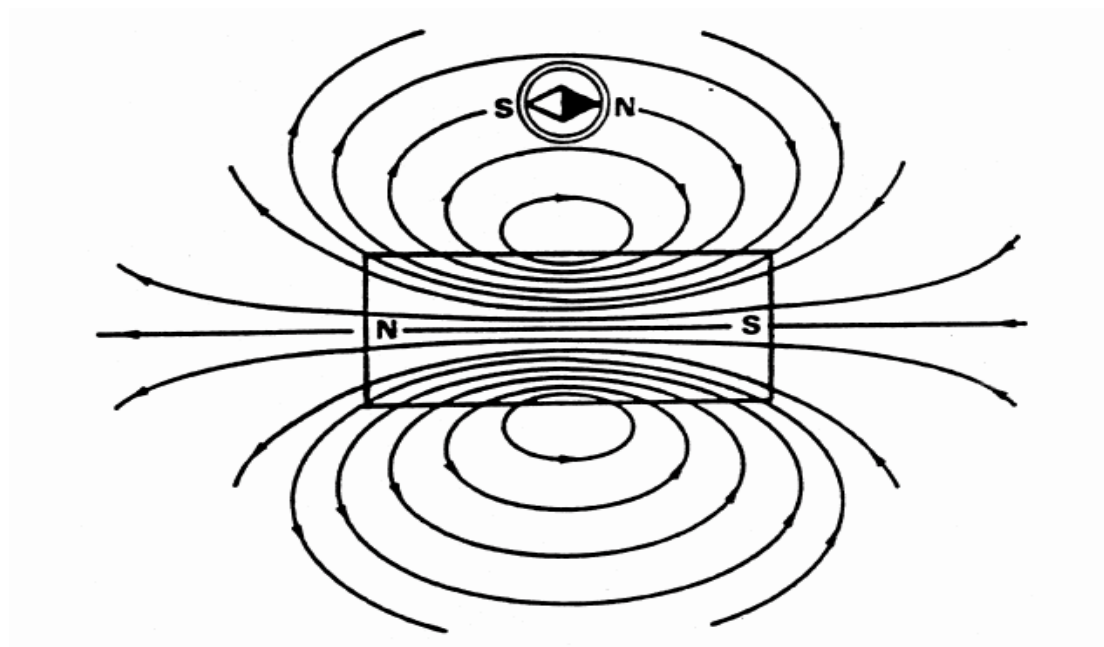
$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (14)$$

Η εξίσωση (2) ορίζει το tesla (T), τη μονάδα της μαγνητικής επαγωγής B . Ένα tesla είναι η μαγνητική επαγωγή σε ένα σημείο του χώρου, όπου ασκείται δύναμη 1 N σε ηλεκτρικό φορτίο 1 Cb, που κινείται με ταχύτητα 1 m/s κάθετα προς την μαγνητική επαγωγή. Στον Πίνακα 1-1 δίνονται ορισμένες τιμές μαγνητικής επαγωγής με διαφορετική τάξη μεγέθους.

Πίνακας 1-1: Τυπικές τάξεις μεγέθους μαγνητικής επαγωγής

Πηγή	B [T]
Μαγνητική επαγωγή στην επιφάνεια της γης	5×10^{-5}
Μόνιμοι μαγνήτες	$10^{-2} - 1$
Ηλεκτρομαγνήτες με πυρήνα σιδήρου	μέχρι 3
Υπεραγώγιμοι μαγνήτες	μέχρι 20

Η μαγνητική επαγωγή B μπορεί να περιγραφεί σχηματικά από τις γραμμές του μαγνητικού πεδίου, που είναι πάντα κλειστές διαδρομές, όπως φαίνεται στο σχήμα 1-4.



Σχήμα 1-4: Γραμμές μαγνητικής επαγωγής ενός απλού ραβδόμορφου μαγνήτη

Σε πολλά μέσα, και στο κενό, η μαγνητική επαγωγή \mathbf{B} είναι μία γραμμική συνάρτηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου \mathbf{H} . Ειδικότερα, στον κενό χώρο ισχύει:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} = 4\pi \times 10^{-7} \mathbf{H} \quad (15)$$

όπου μ_0 είναι η διαπερατότητα του κενού, η οποία είναι παγκόσμια σταθερά και μετράται σε H/m.

1.1.3 Μαγνητική επαγωγή και ένταση μαγνητικού πεδίου σε υλικό

Όταν ένα υλικό τοποθετείται μέσα σε εξωτερική μαγνητική επαγωγή, \mathbf{B}_0 , τρεις τύποι μαγνητικής συμπεριφοράς είναι δυνατοί: διαμαγνητισμός, παραμαγνητισμός και σιδηρομαγνητισμός. Μέσα σε ένα διαμαγνητικό υλικό η εσωτερική μαγνητική επαγωγή, \mathbf{B}_{int} , είναι λίγο μικρότερη από την εξωτερική μαγνητική επαγωγή, \mathbf{B}_0 . Μέσα σε ένα παραμαγνητικό υλικό η εσωτερική μαγνητική επαγωγή, \mathbf{B}_{int} , είναι λίγο μεγαλύτερη από την εξωτερική μαγνητική επαγωγή, \mathbf{B}_0 , ενώ μέσα σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό η εσωτερική μαγνητική επαγωγή, \mathbf{B}_{int} , είναι πολύ μεγαλύτερη από την εξωτερική μαγνητική επαγωγή, \mathbf{B}_0 . Με άλλα λόγια, οι δυναμικές γραμμές της μαγνητικής επαγωγής αραιώνουν από ένα διαμαγνητικό υλικό, συγκεντρώνονται από ένα παραμαγνητικό υλικό, και από ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, όπως φαίνεται στο Σχ. 6. Μετρήσεις σε διαμαγνητικά και παραμαγνητικά υλικά δείχνουν, ότι σε μικρά εφαρμοζόμενα μαγνητικά πεδία η μαγνητική επαγωγή \mathbf{B}_{int} είναι ευθέως ανάλογη προς την ένταση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου \mathbf{H} :

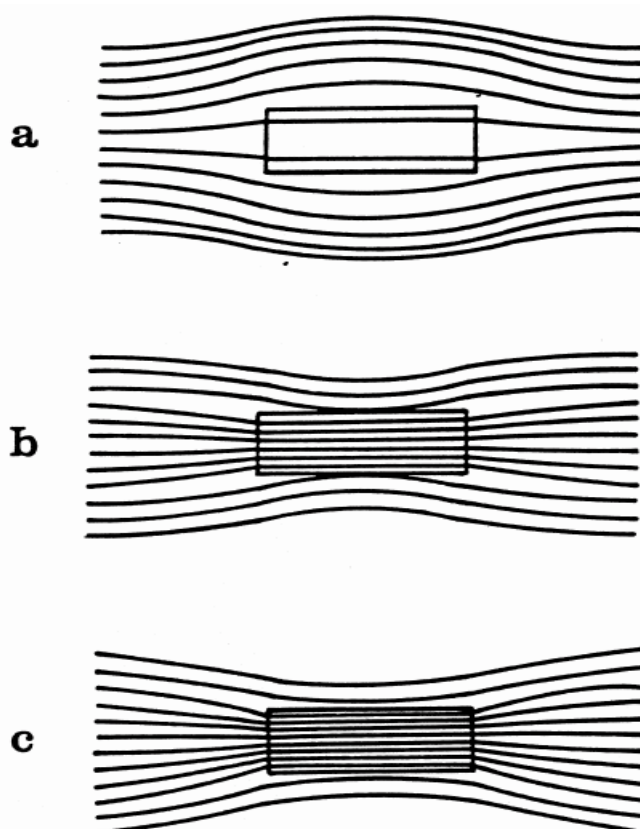
$$\mathbf{B}_{int} = \mu_r \times \mu_0 \times \mathbf{H} \quad (16)$$

όπου, μ_r είναι η σχετική διαπερατότητα του μαγνητικού υλικού, που είναι αδιάστατο μέγεθος, σε δεδομένη θερμοκρασία και πίεση. Στα διαμαγνητικά και παραμαγνητικά υλικά η ένταση του εσωτερικού μαγνητικού πεδίου \mathbf{H}_{int} δεν διαφέρει ουσιαστικά από την ένταση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου

H. Η διαπερατότητα ενός μαγνητικού υλικού, μ , ορίζεται από την σχέση:

$$\mu = \mu_r \times \mu_0 \quad (17)$$

σε μονάδες του μ_0 , δηλαδή, $\text{kgms}^{-2}\text{A}^{-2}$, H/m ή Tm/A . Η σχετική διαπερατότητα είναι ένα μέτρο της ευκολίας με την οποία οι δυναμικές γραμμές διαπερνούν ένα υλικό και ισχύει $\mu < 1$ για τα διαμαγνητικά υλικά και $\mu > 1$ για τα παραμαγνητικά. Στην περίπτωση των σιδηρομαγνητικών υλικών, η σχέση ανάμεσα στο B_{int} και στο H_{int} δεν είναι τόσο απλή, διότι γενικά εξαρτάται από την μαγνητική προϊστορία του δείγματος. Σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό η ένταση του εσωτερικού μαγνητικού πεδίου H_{int} μπορεί να διαφέρει ουσιαστικά από την ένταση του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου H , λόγω του πεδίου απομαγνήτισης, όπως φαίνεται στο σχήμα 1-5:

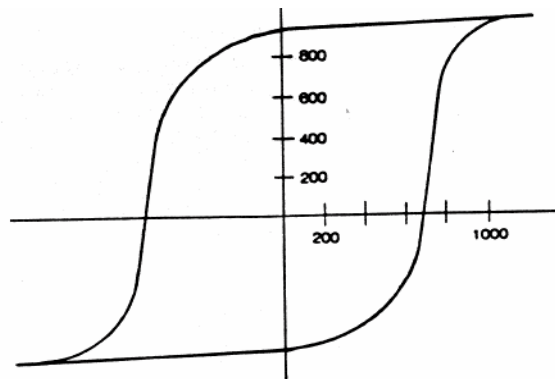


Σχήμα 1-5: Δυναμικές γραμμές μαγνητικής επαγωγής σε διαμαγνητικό (a), παραμαγνητικό (b) σε σιδηρομαγνητικό (c) υλικό.

1.2 Μόνιμοι μαγνήτες

1.2.1 Εισαγωγή

Μαζί με τους ηλεκτρικούς χάλυβες και τα υλικά μαγνητικής εγγραφής οι μόνιμοι μαγνήτες είναι η σημαντικότερη κατηγορία μαγνητικών υλικών. Μερικές από τις πιο γνωστές εφαρμογές τους είναι σε ηλεκτρικούς κινητήρες και γεννήτριες, μεγάφωνα, οθόνες τηλεόρασης, όργανα μέτρησης, κ.λ.π. Η επιλογή του κατάλληλου μαγνητικού υλικού για μόνιμο μαγνήτη με βάση το βρόχο υστέρησης εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής. Οι ιδιότητες των μονίμων μαγνητών περιγράφονται με τον καλύτερο τρόπο από την λεγόμενη “καμπύλη απομαγνήτισης”, που είναι το δεύτερο τεταρτημόριο του βρόχου υστέρησης, που προκύπτει, όταν η μαγνήτιση μειώνεται από τη μαγνήτιση κόρου. Είναι πολύ σημαντικό, να τονισθεί, ότι οι τελικές μαγνητικές ιδιότητες των υλικών μονίμων μαγνητών καθορίζονται από την μεταλλουργική επεξεργασία τους και από τη χημική τους σύσταση.



Σχήμα 1-6: Μαγνητική επαγωγή B, συναρτήσει της έντασης μαγνητικού πεδίου H

Το 1983 ανακαλύφθηκε ένα νέο υλικό μόνιμου μαγνήτη με βάση την διαμεταλλική ένωση $Nd_2Fe_{14}B$. Σε σύγκριση με τα μέχρι τότε χρησιμοποιούμενα υλικά παρουσιάζει πολύ καλύτερες μαγνητικές ιδιότητες, όπως, π.χ., συνεκτικό πεδίο μέχρι και 1.12×10^6 A/m (14000 Oe) σε σχέση με τον αμέσως προηγούμενο προκάτοχό του, που με βάση τις διαμεταλλικές ενώσεις $SmCo_5$ - Sm_2Co_{17} παρουσιάζει συνεκτικό πεδίο μέχρι 0.72×10^6 A/m (9000 Oe).

Η πιο πρόσφατη εξέλιξη, που αφορά στην ανακάλυψη νέων υλικών με ιδιότητες κατάλληλες για μόνιμους μαγνήτες, είναι η ανακάλυψη από τους J.M.D. Coey et al. το 1990. Η ανακάλυψη αυτή δραματική βελτίωση των μαγνητικών ιδιοτήτων των υλικών αυτών. Η έρευνα για την εμπορική αξιοποίηση των υλικών αυτών είναι ακόμη σε εξέλιξη.

Μία σημαντική παράμετρος, που χαρακτηρίζει ένα μόνιμο μαγνήτη είναι το μέγιστο ενεργειακό γινόμενο $(BH)_{max}$, που εκφράζει τη μαγνητική ενέργεια, που είναι αποθηκευμένη στο μόνιμο μαγνήτη. Η σημασία της παραμέτρου αυτής θα συζητηθεί στα επόμενα κεφάλαια. Για πολλά χρόνια το μέγιστο ενεργειακό γινόμενο ήταν της τάξης των $50 \times 10^3 \text{ J/m}^3$. Με την ανάπτυξη των μόνιμων μαγνητών Sm-Co έφθασε τα $160 \times 10^3 \text{ J/m}^3$, ενώ οι μόνιμοι μαγνήτες Nd-Fe-B εμφανίζουν μέγιστο ενεργειακό γινόμενο μέχρι και $320 \times 10^3 \text{ J/m}^3$.

Στις περισσότερες εφαρμογές μεγάλο ρόλο παίζει η σταθερότητα των μόνιμων μαγνητών. Για το λόγο αυτό τα υλικά πρέπει να χρησιμοποιούνται σε θερμοκρασίες αρκετά χαμηλότερες από τη θερμοκρασία Curie*, καθώς η αυθόρμητη μαγνήτιση μειώνεται πολύ γρήγορα για θερμοκρασίες μεγαλύτερες από το 75% της θερμοκρασίας Curie. Λόγω της σχετικά χαμηλής θερμοκρασίας Curie της ένωσης Nd-Fe-B, 312°C , η χρήση αυτού του εξαιρετικού μαγνητικού υλικού περιορίζεται ε σχετικά χαμηλότερες θερμοκρασίες. (Η θερμοκρασία μετάβασης από την σιδηρομαγνητική στην παραμαγνητική συμπεριφορά ονομάζεται *θερμοκρασία Curie*.)

1.2.2 Σκληροί φερριτές

Τα υλικά αυτά, γνωστά και ως κεραμικοί μαγνήτες, αναπτύχθηκαν στη δεκαετία του '50. Οι σκληροί εξαγωγικοί φερριτές που χρησιμοποιούνται είναι οι φερριτές του βαρίου ή του στροντίου ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ή $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$). Είναι σχετικά φθηνοί στην παραγωγή και εμπορικά παραμένουν μέχρι σήμερα οι σπουδαιότεροι μόνιμοι μαγνήτες. Παρουσιάζουν συνεκτικά πεδία μεγαλύτερο από το Alnico, $150 - 250 \text{ kA/m}$, αλλά χαμηλό ενεργειακό γινόμενο, της τάξης των 20 kJ/m^3 .

1.2.3 Νεοδύμιο - σίδηρος - βόριο (Nd-Fe-B)

Το υλικό αυτό ανακαλύφθηκε το 1983 κυρίως εξ αιτίας των οικονομικών συνθηκών της εποχής εκείνης. Λόγω των προβλημάτων στην προμήθεια κοβαλτίου δημιουργήθηκε η ανάγκη για ένα νέο μαγνητικό υλικό, που θα αντικαθιστούσε το Sm-Co παρά το γεγονός, ότι τι τελευταίο κάλυπτε τις ανάγκες της εποχής στις εφαρμογές. Είχαν προηγηθεί ορισμένες προσπάθειες για την ανάπτυξη υλικών με βάση κράματα Nd-Fe, όμως παρά το μεγάλο συνεκτικό πεδίο οι ιδιότητες τέτοιων κραμάτων δεν ήταν επαρκώς επαναλήψιμες.

Από την έρευνα προέκυψε, ότι η προσθήκη μικρής ποσότητας βορίου βελτιώνει δραματικά τις μαγνητικές ιδιότητες των υλικών αυτών. Στα κράματα Nd-Fe-B η κύρια φάση περιέχει την διαμεταλλική ένωση $Nd_2Fe_{14}B$, που παρουσιάζει μεγαλύτερο συνεκτικό πεδίο και ενεργειακό γινόμενο από την Sm-Co. Οι μαγνητικές ιδιότητες των υλικών Nd-Fe-B είναι πολύ ευαίσθητες στη μεταλλουργική κατεργασία.

Παρακάτω περιγράφεται συνοπτικά η μέθοδος παραγωγής της διαμεταλλικής ένωσης Nd-Fe-B που αναπτύχθηκε από τους Sagawa et al. και περιγράφεται συνοπτικά παρακάτω. Τα συστατικά Nd, Fe, B τήκονται σε επαγωγικό φούρνο μέσα σε μία δειγματοδόχη από αλουμίνα παρουσία αδρανούς ατμόσφαιρας, π.χ. αργού, για την αποφυγή της οξειδωσης. Το κράμα κονιορτοποιείται σε σκόνη με σωματίδια διαμέτρου περίπου 3 μm . Τα σωματίδια προσανατολίζονται σε μαγνητικό πεδίο 800 kA/m, μορφοποιούνται σε δισκία κάτω από πιέσεις 200 MPa και υφίστανται συμπύκνωση μάζας χωρίς να λιώσουν (sintering) σε θερμοκρασίες 1050-1150°C.

Το κυριότερο πλεονέκτημα των κραμάτων Nd-Fe-B σε σχέση με το Sm-Co είναι το φθινό τους κόστος. Το μειονέκτημα τους είναι η σχετικά χαμηλή τιμή της θερμοκρασίας Curie, (300-500°C). Αυτό σημαίνει, ότι οι μαγνητικές τους ιδιότητες είναι περισσότερο ευαίσθητες στη θερμοκρασία σε σχέση με το Sm-Co ($T_C=720^\circ\text{C}$) κι έτσι δεν είναι κατάλληλα για ορισμένες εφαρμογές σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών. Τυπικές τιμές του συνεκτικού πεδίου των υλικών αυτών βρίσκονται στην περιοχή των 1100 kA/m και του μέγιστου ενεργειακού γινομένου 300-350 kJ/m³.

1.2.4 Βασικά υλικά παραγωγής μόνιμων μαγνητών

Οι τέσσερις οικογένειες υλικών είναι οι AlNiCo, σκληροί φερρίτες (Ferrites) , SmCo και NdFeB.

Η βιομηχανική εκμετάλλευση τέτοιων διαφορετικών υλικών, καταδεικνύει ότι τα μαγνητικά κριτήρια απόδοσης, ειδικά το μέγιστο ενεργειακό προϊόν, δεν είναι τα μόνα κριτήρια. Οι τεχνικοί περιορισμοί όπως θερμοκρασία εργασίας, θερμική σταθερότητα, δυνατότητες ελαχιστοποίησης του μεγέθους τους (miniaturization) κ.λ.π., καθώς και οι περιορισμοί δαπανών, παίζουν σημαντικό ρόλο στην επιλογή του τύπου μαγνητών.

Οι ferrites και οι μαγνήτες NdFeB παρέχουν την ενέργεια σε χαμηλή τιμή, και κατά συνέπεια, αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς. Η επιλογή εξαρτάται από το αν έχουμε ως προτεραιότητα το κόστος ή την απόδοση.

Οι Ferrites είναι ακόμα εμπορικά επιτυχείς σήμερα, αν και ανακαλύφθηκαν στις αρχές της δεκαετίας του '50. Είναι αρκετά καλοί να εκπληρώσουν τις περισσότερες κλασσικές βιομηχανικές ανάγκες με χαμηλό κόστος. Καλύπτουν την πλειοψηφία των εφαρμογών παραδοσιακής και μαζικής παραγωγής όπως μηχανές και εξαρτήματα αυτοκινήτων.

Οι μαγνήτες NdFeB προτιμώνται για τις εφαρμογές υψηλής απόδοσης, συμπεριλαμβανομένου και του πάντα αυξανόμενου αριθμού νέων εφαρμογών που απαιτούν ελαχιστοποίηση μεγέθους (miniaturization), όπως για παράδειγμα τους ενεργοποιητές (actuator) που χρησιμοποιούνται ως κεφαλές στην μαγνητική εγγραφή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

2.1 Σύντομη περιγραφή γεννητριών

2.1.1 Γενικά

Οι γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος χωρίζονται σε δυο κατηγορίες που είναι:

- οι ασύγχρονες και
- οι σύγχρονες ή εναλλακτικές

Πιο συγκεκριμένα:

Ασύγχρονες γεννήτριες E.P είναι εκείνες που η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος που παράγουν:

- είναι ανεξάρτητη από την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα τους και
- η διέγερση τους γίνεται με E.P

Οι ασύγχρονες γεννήτριες E.P χρησιμοποιούνται πολύ σπάνια στην πράξη και σε ειδικές μόνο περιπτώσεις .

Σύγχρονες γεννήτριες E.P είναι εκείνες που η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος που παράγουν :

- είναι ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα τους που λέγεται “σύγχρονη” n_s και
- η διέγερση τους γίνεται με συνεχές ρεύμα.

Η σύγχρονη γεννήτρια E.P στην πράξη συναντάται με την ονομασία “εναλλακτήρας”. Η σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής του δρομέα των εναλλακτών δίνεται από τη σχέση :

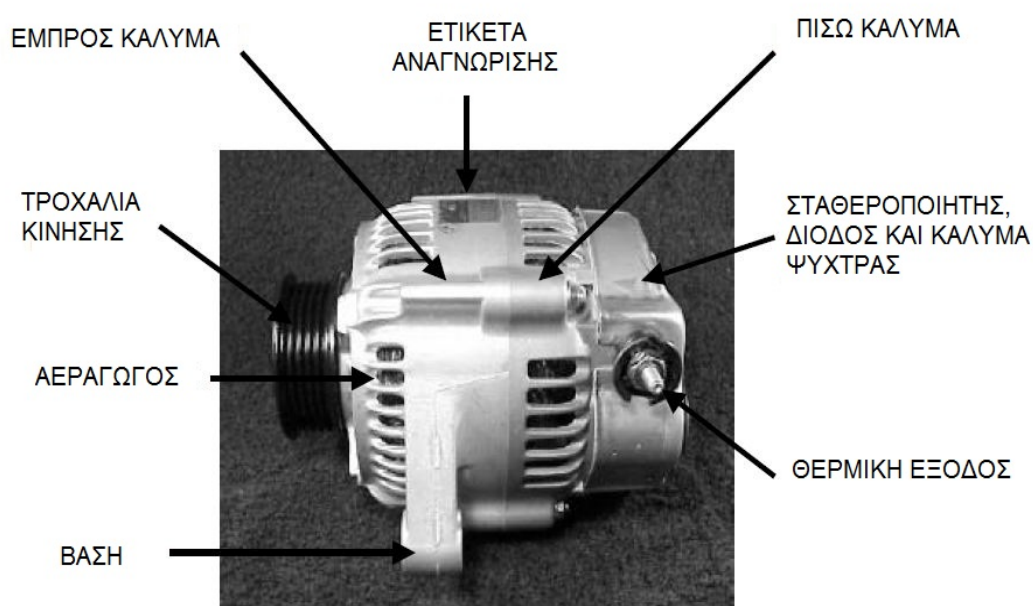
$$n_s = 60 \cdot f / p \quad [\text{στρ}/\text{min}] \quad (1)$$

όπου:

f = η συχνότητα [Hz] του εναλλασσόμενου ρεύματος που για το εθνικό μας δίκτυο είναι: $f = 50$ Hz

p = ο αριθμός ζευγών των πόλων της ηλεκτρικής μηχανής.

Οι σύγχρονες γεννήτριες Ε.Ρ (εναλλακτήρες) χρησιμοποιούνται ευρέως στην πράξη για την παραγωγή του εναλλασσόμενου ρεύματος του δικτύου γι' αυτό και εγκαθίστανται στους Σταθμούς Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας της ΔΕΗ.



Εικόνα 2-1: Μέρη ενός εναλλακτήρα

2.1.2 Διάκριση εναλλακτών

Οι εναλλακτήρες διακρίνονται σε κατηγορίες που αφορούν:

A. Το είδος του τυλίγματος Ε.Ρ του επαγωγικού τυμπάνου και χωρίζονται σε:

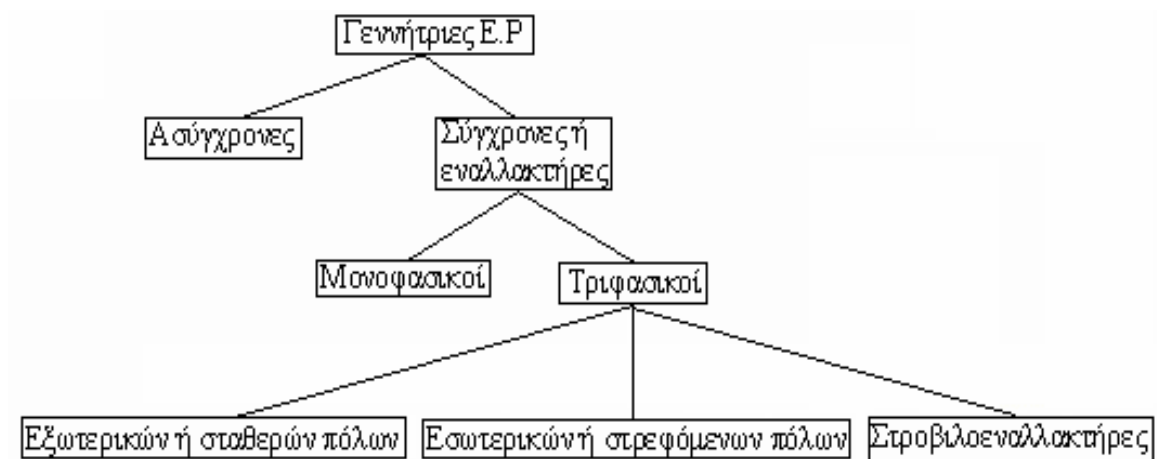
- μονοφασικούς που χρησιμοποιούνται στην πράξη σε ειδικές μόνο περιπτώσεις και
- τριφασικούς που χρησιμοποιούνται συνήθως στην πράξη για την παραγωγή Ε.Ρ από τη ΔΕΗ , και σ' αυτούς θα αναφερόμαστε

παρακάτω.

Β. τη θέση τοποθέτησης των μαγνητικών πόλων τους και χωρίζονται σε :

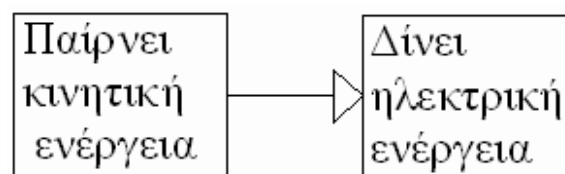
- εξωτερικών ή σταθερών πόλων
- εσωτερικών ή στρεφόμενων πόλων και
- στροβιλοεναλλακτήρες (που ουσιαστικά αποτελούν μια κατασκευαστική παραλλαγή των εναλλακτών με εσωτερικούς πόλους για υψηλές περιστροφές)

Η γενική διάκριση των γεννητριών Ε.Ρ δίνεται παρακάτω. (Σχ.2-1)



Σχήμα 2-1: Διάκριση γεννητριών Ε.Ρ

Ο εναλλακτήρας, σαν γεννήτρια Ε.Ρ, κατά τη λειτουργία του παίρνει κινητική ενέργεια και δίνει ηλεκτρική ενέργεια



Η σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής $n_s = 60 \cdot f / p$ (στρ/min) ενός εναλλακτήρα εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό ζευγών των μαγνητικών πόλων και για συγκεκριμένες τιμές συχνότητας παραγόμενου ρεύματος δίνεται στον Πίνακα 2-1.

Πίνακας 2-1: Τιμές της σύγχρονης ταχύτητας περιστροφής για συγκεκριμένο αριθμό πόλων και συχνότητας γεννήτριας.

Συχνότητα λειτουργείας (Hz)	Αριθμός ζεύγων πόλων									
	1	2	3	4	5	6	8	10	20	50
50	3000	1500	1000	750	600	50	375	300	150	60
16 2/3	1000	500	333	250	200	Δεν χρησιμοποιούνται				
60	3600	1800	1200	900	720	60	450	360	180	72

Ο τρόπος μετάδοσης κίνησης στον άξονα του εναλλακτήρα εξαρτάται από το είδος της κινητήριας μηχανής και την σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής που αναπτύσσει. Οι πιο συνηθισμένες περιπτώσεις αναφέρονται στον Πίνακα 2-2.

Πίνακας 2- 2: Ταχύτητα περιστροφής εναλλακτήρα ανάλογα με τον είδος του κινητήρα

Ταχύτητα περιστροφής εναλλακτήρα (σπρ/min)	Είδος κινητήριας μηχανής
> 500	Υδροστρόβιλος
220-2000	Μηχανή ατμού βενζίνης ή πετρελαίου
N-3600	Στρόβιλος αέρα ή ατμού

2.1.3 Κατασκευαστικό μέρος εναλλακτήρων

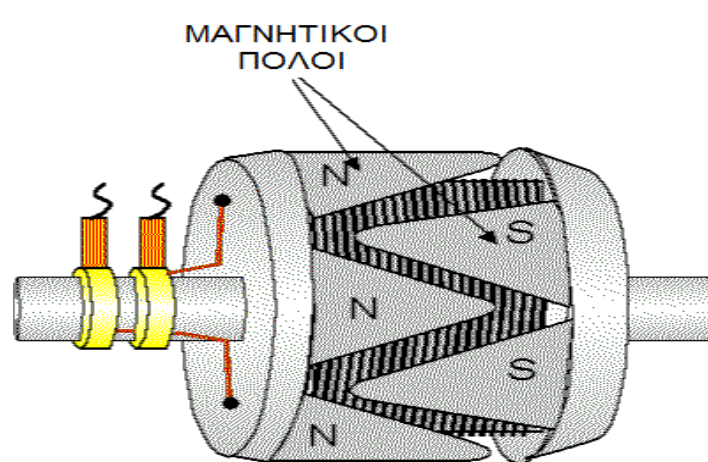
Οι εναλλακτήρες που χρησιμοποιούνται πάντα στην πράξη αποτελούνται από δυο βασικά τμήματα :

- **το στάτη** που αποτελεί το ακίνητο μέρος μιας ηλεκτρικής μηχανής



Εικόνα 2-2: Στάτης χωρίς τις περιελίξεις

- **το δρομέα (ή ρότορα)** που αποτελεί το περιστρεφόμενο μέρος μιας ηλεκτρικής μηχανής.



Εικόνα 2-3: Ρότορας ξένης διέγερσης

Η κατασκευή των βασικών τμημάτων των εναλλακτών διαφέρει ανάλογα με το είδος τους.

2.2 Γενική περιγραφή σύγχρονων γεννητριών

2.2.1 Στάτης

Θα πάρουμε σαν παράδειγμα μια σύγχρονη γεννήτρια εξωτερικών-σταθερών πόλων. Ο προορισμός του στάτη στους εναλλακτές σταθερών πόλων είναι:

- να στηρίζει την ηλεκτρική μηχανή
- να δημιουργεί καθορισμένη μαγνητική ροή στο εσωτερικό της ηλεκτρικής μηχανής
- να τροφοδοτεί το φορτίο με ηλεκτρική ενέργεια με τους ανάλογους αγωγούς.

Τα μέρη τα οποία περιλαμβάνει ο στάτης ενός εναλλακτήρα με σταθερούς πόλους είναι τα πιο κάτω:

1. **Το ζύγωμα** που αποτελεί τον κορμό του εναλλακτήρα. Το σχήμα του είναι κυλινδρικό και έχει:

- διαμόρφωση στήριξης στο κάτω μέρος ώστε να αποτελεί την βάση και
- κρίκο μεταφοράς στο πάνω μέρος.

Η κατασκευή του είναι από χυτοσίδηρο και ο προορισμός του είναι η δημιουργία κλειστού μαγνητικού κυκλώματος στην ηλεκτρική μηχανή.

Ο πυρήνας των μαγνητικών πόλων που στερεώνεται με ειδικές βίδες στο εσωτερικό μέρος του ζυγώματος η κατασκευή του πυρήνα των μαγνητικών πόλων των εναλλακτών είναι από **Ελάσματα** που είναι μονωμένα μεταξύ τους. Αυτό γίνεται για την αποφυγή των επαγωγικών ρευμάτων Foucault (δινορρεύματα) και **Σκληρό σιδηρομαγνητικό υλικό** για την ύπαρξη σημαντικής ποσότητας παραμένοντα μαγνητισμού όταν ο εναλλακτήρας δεν λειτουργεί.

Ο αριθμός των μαγνητικών πόλων είναι πάντα ζυγός αριθμός. Έτσι, αναφερόμαστε στα ζεύγη των μαγνητικών πόλων που συμβολίζονται με **p**.

Ανάλογα με τον αριθμό των μαγνητικών πόλων που έχει ένας εναλλακτήρας χαρακτηρίζεται σαν διπολικός, τετραπολικός, εξαπολικός, οκταπολικός κ.λ.π.

Η μαγνητική ροή Φ του μαγνητικού πεδίου ορίζεται από τον κατασκευαστή.

2. Τα καλύμματα ή καπάκια που στερεώνονται με βίδες στο ζύγωμα και βρίσκονται σε ζευγάρια. Η κατασκευή τους είναι από χυτοσίδηρο και στο κέντρο τους φέρουν τα έδρανα (ρουλεμάν).

Ο προορισμός τους είναι:

- να στηρίζουν τον άξονα ώστε να είναι δυνατή η περιστροφή τους στα έδρανα
- να προφυλάσσουν το εσωτερικό μέρος του εναλλακτήρα από διάφορα σκουπίδια ή μικροαντικείμενα.

3. Ο ψηκτροφορέας ο οποίος αποτελείται από:

- τη βάση, η οποία με την σειρά της αποτελείται από ένα σιδερένιο δακτυλίδι. Η βάση χρησιμεύει για την στερέωση του συστήματος του ψηκτροφορέα στο εσωτερικό μέρος του καλύμματος προς την πλευρά των δακτυλιδιών.

- **τις τρεις ψηκτροθήκες** που είναι μεταλλικές και στο εσωτερικό τους τοποθετούνται οι ψήκτρες. Το σύστημα του ψηκτροφορέα δίνει την δυνατότητα μετακίνησης των ψηκτρών.

5. Οι ψήκτρες που είναι κατασκευασμένες από ηλεκτραγώγιμο άνθρακα και χαλκό. Αυτές τοποθετούνται μέσα στις ψηκτροθήκες και με ελατηριωτό μηχανισμό που βρίσκεται στο σύστημα του ψηκτροφορέα πιέζονται, για να εφάπτονται στους δακτυλίους. Στο αντίθετο μέρος της επαφής του, έχουν αγωγό κατασκευασμένο από ευλύγιστη πλέξη χάλκινου σύρματος.

Ο προορισμός των ψηκτρών στους εναλλακτήρες σταθερών πόλων είναι να παίρνουν την ηλεκτρική ενέργεια από αυτόν και να την οδηγούν προς τον καταναλωτή.

6. Το κιβώτιο ακροδεκτών που βρίσκεται στο εξωτερικό μέρος του ζυγώματος και έχει ίδια εξωτερική κατασκευή με αυτό. Στο κιβώτιο ακροδεκτών καταλήγουν σε συγκεκριμένες θέσεις τα άκρα των διαφόρων τυλιγμάτων που περιλαμβάνει ο εναλλακτήρας. Στους ακροδέκτες του κιβωτίου ακροδεκτών γίνεται η σύνδεση των καλωδίων τροφοδοσίας φορτίων των καταναλωτών με τον εναλλακτήρα.

2.2.2 Δρομέας (ή ρότορας)

Ο προορισμός του δρομέα είναι:

- να περιστρέφεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο των πόλων
- να δημιουργεί το φαινόμενο της επαγωγής στους αγωγούς που διαθέτει

Τα μέρη τα οποία περιλαμβάνει ο δρομέας ενός εναλλακτήρα με σταθερούς πόλους είναι τα πιο κάτω:

1. Ο άξονας που είναι κατασκευασμένος από ασάλι. Κατά μήκος της επιφάνειας του διαθέτει προεξοχή που δίνει τη δυνατότητα προσαρμογής σ' αυτόν διάφορα εξαρτήματα (Σχ.2-2).



Σχήμα 2-2: Σχηματική μορφή άξονα

όταν ο δρομέας περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα.

Τα άκρα των ομάδων της περιέλιξης του επαγωγικού τυμπάνου των εναλλακτών με σταθερούς πόλους, καταλήγουν στα δακτυλίδια.

Ο προορισμός της περιέλιξης του επαγωγικού τυμπάνου (που βρίσκεται μέσα στο σταθερό μαγνητικό πεδίο των πόλων) είναι η δημιουργία του φαινομένου της επαγωγής στους αγωγούς του όταν στρέφεται ο δρομέας μέσα στο μόνιμο μαγνητικό πεδίο των πόλων.

3. Τα δακτυλίδια που έχουν κατασκευή από ορείχαλκο και ο αριθμός τους εξαρτάται από τον αριθμό των φάσεων του εναλλακτήρα. Έτσι στους τριφασικούς εναλλακτήρες με σταθερούς πόλους υπάρχουν τρία δακτυλίδια. Τα οποία δακτυλίδια:

- i. είναι μονωμένα μεταξύ τους με μίκα
- ii. στερεώνονται με ειδικό τρόπο στον άξονα του εναλλακτήρα.

Στα δακτυλίδια καταλήγουν τα άκρα της περιέλιξης του επαγωγικού τυμπάνου του εναλλακτήρα σταθερών πόλων.

Ο προορισμός των δακτυλιδιών είναι να μεταβιβάζουν την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται στην τριφασική περιέλιξη του επαγωγικού τυμπάνου του εναλλακτήρα σταθερών πόλων στην κατανάλωση.

4. Ο ανεμιστήρας που βρίσκεται τοποθετημένος πάνω στον άξονα και προς την αντίθετη πλευρά των δακτυλιδιών. Ο προορισμός του ανεμιστήρα είναι να δημιουργεί ψύξη στη περιέλιξη του επαγωγικού τυμπάνου, επειδή κατά την λειτουργία του εναλλακτήρα των σταθερών πόλων διαρρέονται από ρεύματα μεγάλων τιμών και αναπτύσσουν θερμότητα Joule.

Η κατασκευή τους είναι:

- i. σε μορφή φτερωτής πλαστική ύλη ή
- ii. από αλουμίνιο σε μορφή φτερωτής

Η βασική διαφορά της σύγχρονης γεννήτριας μόνιμων μαγνητών από μια κοινή σύγχρονη γεννήτρια είναι η απουσία του τυλίγματος διέγερσης. Το πεδίο διέγερσης της μηχανής δημιουργείται από τη συστοιχία των μόνιμων μαγνητών, οι οποίοι βρίσκονται τοποθετημένοι περιμετρικά στην επιφάνεια

του δρομέα, ώστε να δημιουργούν ακτινικό μαγνητικό πεδίο.

2.2.3 Βαθμός απόδοσης

Η σύγχρονη γεννήτρια είναι μια σύγχρονη μηχανή που λειτουργεί ως γεννήτρια μετατρέποντας μηχανική ισχύ σε τριφασική ηλεκτρική ισχύ στην έξοδο της. Φυσικά μια σύγχρονη γεννήτρια παρουσιάζει απώλειες κατά την μετατροπή της μηχανικής ισχύος σε ηλεκτρική, για αυτό και ποτέ η ισχύς εισόδου της δεν είναι ίση με την ισχύ εξόδου. Η ισχύς εισόδου της γεννήτριας είναι η μηχανική ισχύς που εφαρμόζεται στον άξονα της και δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$P_{μηχ} = T * \omega \quad (2)$$

Όπου T είναι η ροπή του συστήματος και μετριέται σε $N*m$ και ω είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας και ισχύει $\omega = 2 * \pi * f$ (όπου f η συχνότητα περιστροφής της γεννήτριας)

Η ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο της γεννήτριας δίδεται από τον παρακάτω τύπο:

$$P_{ac} = 3 * V * I * \cos\phi \quad (3)$$

Η αντίστοιχη

$$P_{dc} = V * I \quad (4)$$

Ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας υπολογίζεται από τον λόγο της ηλεκτρικής ισχύς εξόδου(dc ή ac) προς την μηχανική ισχύς εισόδου της γεννήτριας.

$$\eta = P_{ηλεκτ} / P_{μηχ} * 100\% \quad (5)$$

2.2.4 Υλικά πειραματικών γεννητριών

- Ο στάτης των γεννητριών συνήθως αποτελείται από μαλακό σίδηρο
 - Ο άξονας των γεννητριών συνήθως αποτελείται από μαλακό σίδηρο
 - Το περίβλημα του άξονα αποτελείται από αλουμίνιο
- Ο **μαλακός σίδηρος** μέσα στη σπείρα αθιστά το μαγνητικό πεδίο

ισχυρότερο επειδή γίνεται ο ίδιος μαγνήτης όταν ρέει το ρεύμα. Επίσης χρησιμοποιείται επειδή χάνει το μαγνητισμό του μόλις το ρεύμα σταματά.

Το **αλουμίνιο** είναι ένα ελαφρύ μέταλλο στο οποίο μπορεί να ασκηθεί τεράστια δύναμη με την ανάμιξη άλλων μετάλλων (κράμα). Διευθύνει τη θερμότητα και την ηλεκτρική ενέργεια, απεικονίζει την ελαφριά και ακτινοβόλο ενέργεια και αντιστέκεται στη διάβρωση. Είναι επίσης μη μαγνητικό, μη τοξικό, και μπορεί να διαμορφωθεί με όλες τις γνωστές διαδικασίες εργασίας μετάλλων. Η πυκνότητα του είναι 2.7 kg/dm^3 ή περίπου το ένα τρίτο της πυκνότητας του χάλυβα.

Τα κράματα αλουμινίου έχουν τις έκτατες δυνάμεις μεταξύ 70 και 700 N/mm^2 , στις χαμηλές θερμοκρασίες, η ασκούμενη δύναμη αυξάνεται χωρίς να γίνονται εύθραυστα, σε αντίθεση με τα περισσότερα κράματα χάλυβα. Στις υψηλές θερμοκρασίες οι δυνάμεις μειώνονται. Στις σταθερές θερμοκρασίες άνω των 100°C η δομική δύναμη επηρεάζεται τόσο πολύ, γι' αυτό πρέπει να ληφθεί ιδιαίτερη προσοχή. Έναντι άλλων μετάλλων το αλουμίνιο έχει έναν σχετικά μεγάλο συντελεστή της γραμμικής επέκτασης.

Σε μερικές κατασκευές είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη αυτό. Είναι ένας άριστος αγωγός της θερμότητας και της ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι απλό να κατασκευαστεί με περισσότερες διατηρητικές και μηχανικές τεχνικές, και είναι επίσης κατάλληλο για την προηγμένη σύνδεση και ένωση. Όπως τα περισσότερα μέταλλα, το αλουμίνιο αντιδρά με το οξυγόνο στον αέρα. Το στρώμα οξειδίων που δημιουργείται είναι πολύ λεπτό. Αυτό είναι συμπαγές και παρέχει πολύ ισχυρή προστασία διάβρωσης.

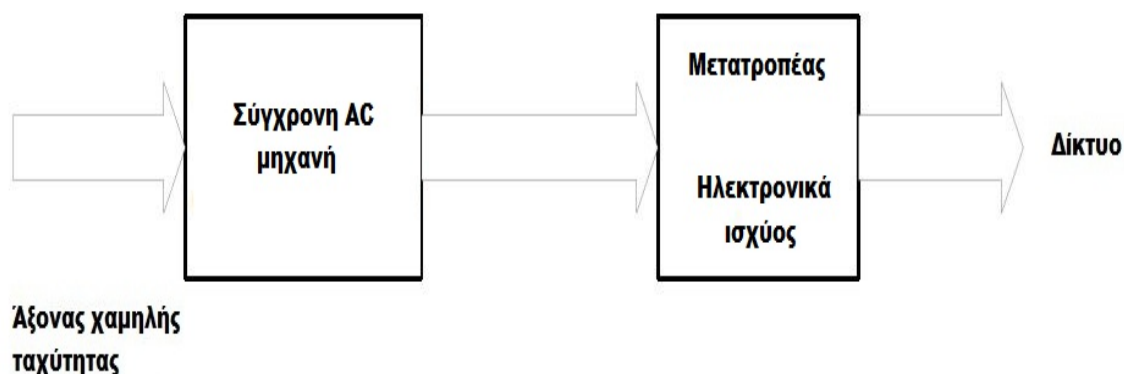
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΜΕ ΜΟΝΙΜΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

3.1 Εισαγωγή

Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να κατασκευαστούν είτε με σταθερής είτε με μεταβλητής ταχύτητας μηχανική είσοδο. Ένα από τα πεδία όπου η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει παίξει σημαντικό ρόλο τα τελευταία χρόνια είναι η ανάπτυξη καινοτόμων ανεμογεννητριών μεταβλητής ταχύτητας. Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας έχουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως υψηλή εξαγωγή ενέργειας από τον αέρα, χαμηλότερο θόρυβο σε χαμηλές στροφές και καθαρότερη μεταφορά ισχύος στο δίκτυο.

Η μεταβλητή ταχύτητα μπορεί να επιτευχθεί με πολλούς τρόπους, ωστόσο δύο εφαρμογές σε ηλεκτρομηχανικούς μετατροπείς μεταβλητής ταχύτητας διατηρούν το ενδιαφέρον σήμερα: **οι άμεσης-οδήγησης σύγχρονες γεννήτριες με μετατροπέα ισχύος και οι επαγωγικές γεννήτριες διπλής τροφοδότησης με κιβώτιο ταχυτήτων.**

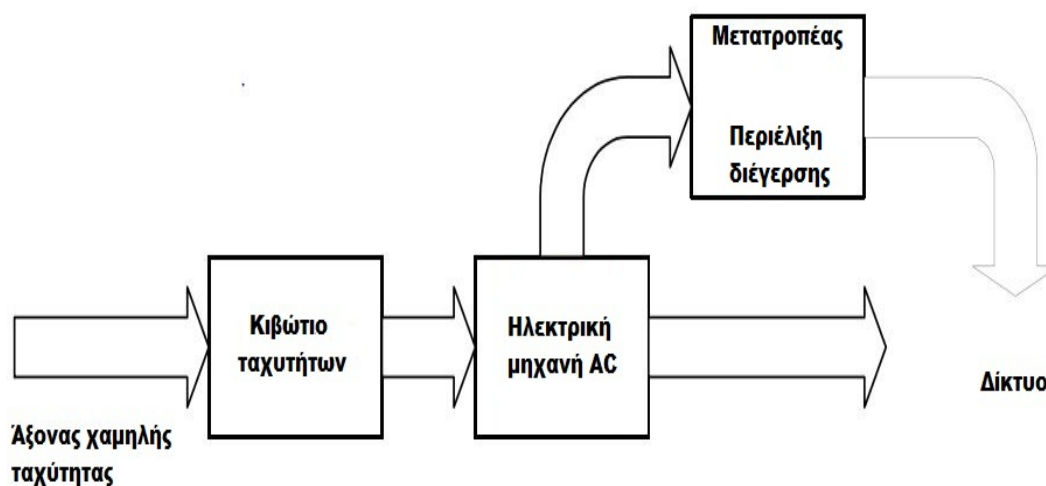
Το σχήμα 3-1 επεξηγεί τη διάταξη άμεσης-οδήγησης. Σε αυτή τη περίπτωση η ηλεκτρική μηχανή είναι μια σύγχρονη γεννήτρια απευθείας συνδεδεμένη στον μηχανικό άξονα. Η ηλεκτρική έξοδος της γεννήτριας είναι συνδεδεμένη σε ένα μετατροπέα ισχύος που συνδέεται στο δίκτυο.



Σχήμα 3-1 Διάταξη άμεσης-οδήγησης.

Η δεύτερη διάταξη όπως φαίνεται στο σχήμα 3-2, χρησιμοποιεί μια επαγωγική γεννήτρια με περιέλιξη στον ρότορα και δακτυλίους ολίσθησης. Το κύκλωμα του ρότορα (τύλιγμα διέγερσης) είναι συνδεδεμένο με ένα μετατροπέα ισχύος AC/AC που ανταλλάζει ηλεκτρική ενέργεια μεταξύ του ρότορα και του δικτύου AC. Η επαγωγική γεννήτρια περιστρέφεται σε μία συμβατική ταχύτητα (1500 rpm για παράδειγμα) και ένα κιβώτιο ταχυτήτων χρειάζεται για να προσαρμόσει τον άξονα χαμηλής περιστροφής (25 rpm για παράδειγμα) στην γεννήτρια.

Το ενδιαφέρον σε αυτή τη διάταξη είναι ότι χρησιμοποιείται χαμηλής ροπής επαγωγική μηχανή και επίσης μετατροπέας ισχύος βαθμονομημένος μόνο κατά ένα κλάσμα της ονομαστικής ισχύος που εξάγεται από τον αέρα.



Σχήμα 3-2 Επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδότησης με κιβώτιο ταχυτήτων.

3.1.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μετατροπής άμεσης-οδήγησης.

Η μετατροπή άμεσης οδήγησης εξαλείφει την μηχανική μετατροπή (κιβώτιο ταχυτήτων) και χρησιμοποιεί μια ηλεκτρική μηχανή με χαμηλή περιστροφική ταχύτητα. Η επιλογή ανάμεσα στις δύο μετατροπές εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, ωστόσο ας δούμε τα μειονεκτήματα της γεννήτρια διπλής τροφοδότησης.

Πίνακας 3-1: Μειονεκτήματα γεννήτριας διπλής τροφοδότησης

1.	Θερμική απώλεια λόγο τριβής μεταξύ των ταχυτήτων
2.	Φθορά λόγο τριβής μεταξύ των ταχυτήτων
3.	Απαιτείται η χρήση λαδιού που πρέπει να αντικαθιστάτε συχνά
4.	Αισθητός θόρυβος από την περιστροφική κίνηση των ταχυτήτων
5.	Υψηλές αιχμές ροπής στη μηχανή και μεγάλες αιχμές στο ρεύμα του στάτη
6.	Απαιτείται εξωτερικό κύκλωμα συγχρονισμού μεταξύ του στάτη και του δικτύου για να περιοριστεί το ρεύμα εκκίνησης

Όλα τα παραπάνω ωφελούν την εφαρμογή άμεσης-οδήγησης. Ωστόσο, τα πιο σημαντικά μειονέκτημα αυτής είναι το κόστος παραγωγής και η υψηλή μηχανική ονομαστική ροπή, καθώς είναι γνωστό ότι η μάζα μίας ηλεκτρικής μηχανής είναι αντιστρόφως ανάλογη με την ονομαστική ροπή. Παρόλο που η εφαρμογή μιας άμεσης-οδήγησης γεννήτριας είναι πιο ελκυστική, η τελική απόφαση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες (οικονομικοί παράγοντες, απαιτούμενος χώρος, αξιοπιστία, αποδοτικότητα, θόρυβος κ.α.).

3.2 Τύποι σύγχρονων μηχανών και οι διαφορές τους

Η έρευνα των σύγχρονων μηχανών μόνιμου μαγνητικού πεδίου (ΜΜΠ) με μικρότερη μάζα και κόστος απαιτεί μια επισκόπηση των διαφόρων εφαρμογών που υπάρχουν. Στη συνέχεια προσδιορίζοντας την μηχανή ΜΜΠ ως μία σύγχρονη μηχανή με μόνιμους μαγνήτες τοποθετημένους στον ρότορα, όπως και η κατασκευή μας, θα προσδιορίσουμε τα κύρια πλεονεκτήματα της διέγερσης μέσω ΜΜΠ έναντι της ηλεκτρικής διέγερσης. Όπως επίσης και συγκρίσεις μεταξύ των πολλών τύπων που μπορούν να προκύψουν.

3.2.1 Πλεονεκτήματα σύγχρονων μηχανών και συγκρίσεις

➤ Σύγχρονες μηχανές με επαγωγικές μηχανές

Σήμερα συναντάμε πολλούς τύπους μηχανών άμεσης-οδήγησης. Οι επαγωγικές μηχανές απαιτούν περισσότερα ενεργά υλικά και είναι πιο ογκώδες από μια σύγχρονη μηχανή ΜΜΠ. Επίσης, οι επαγωγικές μηχανές τροφοδοτούν το πεδίο διέγερσης στον ρότορα μέσω των περιελίξεων του στάτη. Συνεπώς, οι περιελίξεις στον στάτη πρέπει να φέρουν και την ενεργό ισχύ που εξάγεται από τη μετατροπή και τη ενέργεια αντίδρασης που απαιτείται για την διέγερση του ρότορα. Αυτό αυξάνει τις απώλειες στον στάτη και απαιτεί μεγαλύτερη ενεργό διατομή του χαλκού και μεγαλύτερες εγκοπές στον στάτη.

➤ Σύγχρονες μηχανές με μηχανές switched reluctance (SR)

Όπως και οι επαγωγικές μηχανές, οι SR μηχανές επίσης απαιτούν ηλεκτρική διέγερση στον ρότορα. Για ίδιες αποδόσεις, οι SR μηχανές είναι πιο συμπαγής και λίγο ελαφρύτερες από τις επαγωγικές, όπως επίσης και ο βαθμός μετατροπής μεγαλύτερος. Για μικρές διατομές (>1m) το κόστος μιας SR μηχανής είναι συγκρίσιμο με αυτό μιας MM μηχανής, ενώ για μεγαλύτερες διαμέτρους το κόστος μιας SR μηχανής είναι αρκετά μεγαλύτερο.

3.2.2 Σύγχρονες μηχανές: Διέγερση ΜΜΠ με ηλεκτρική διέγερση

Μία σύγχρονη μηχανή έχει την ικανότητα να παρέχει την διέγερση στο ρότορα. Αυτή η διέγερση μπορεί να εξασφαλίζεται είτε από ένα επαγωγικό τύμπανο είτε από μόνιμους μαγνήτες. Μία σύγχρονη μηχανή με περιελιγμένο ρότορα έχει ένα πολύ ενδιαφέρον χαρακτηριστικό: ρυθμιζόμενο ρεύμα διέγερσης κα συνεπώς ρυθμιζόμενη τάση άνευ φορτίου. Αυτό εξηγεί το γιατί χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές (π.χ.υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις, τουρμπινοκινητήρες κ.α.), όμως σε μία ανεμογεννήτρια το πλεονέκτημα αυτό

δεν είναι τόσο χρήσιμο μίας και η σύγχρονη γεννήτρια είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο μέσω ενός μετατροπέα ισχύος. Μειονέκτημα μιας ηλεκτρικά διεγερμένης σύγχρονης μηχανής είναι οι υψηλές απώλειες στις περιελίξεις του ρότορα, που σε σύγκριση με τις απώλειες στους μαγνήτες λόγω των δινορευμάτων σε μια εφαρμογή με ΜΜΠ είναι πολύ υψηλότερη.

3.3 Περιγραφή τοπολογιών μηχανών με μόνιμο μαγνητικό πεδίο

Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό των μηχανών με ΜΜΠ είναι η ευελιξία τους. Υπάρχουν πολλές παράμετροι τις οποίες αν αλλάξουμε μπορούμε να έχουμε ένα μεγάλο αριθμό από τοπολογίες και παραλλαγές.

Παρακάτω θα δώσουμε μια περιγραφή για τις πιο αξιοσημείωτες τοπολογίες.

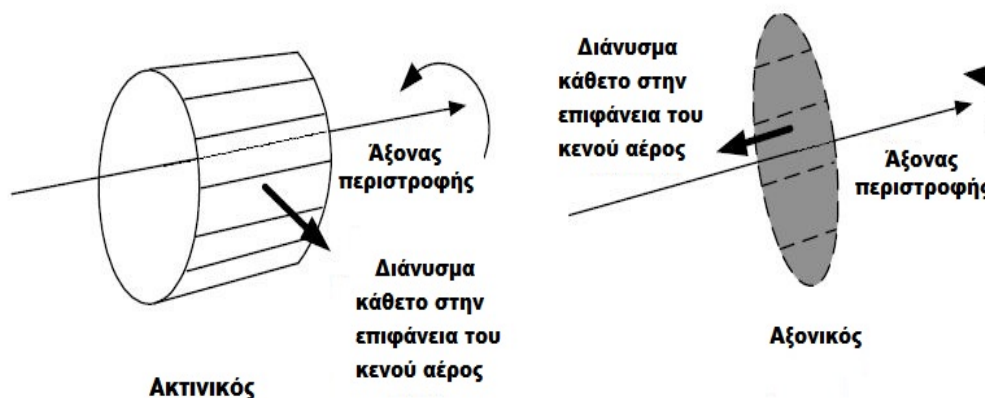
Για να εξετάσουμε τις διάφορες τοπολογικές μεταβλητές μια μηχανής ΜΜΠ, τέσσερα κύρια χαρακτηριστικά θα μελετηθούν:

1. Προσανατολισμός του κενού αέρος ως προς την περιστροφή του άξονα: **ακτινικός (radial(R))** ή **αξονικός (axial(A))**
2. Προσανατολισμός του πυρήνα του στάτη ως προς τη κατεύθυνση της κίνησης: **διαμήκης ροής (longitudinal(L))** ή **εγκάρσιας ροής transverse(T)**
3. Προσανατολισμός μόνιμων μαγνητών ως προς το κενό αέρος: **επιφανειακά τοποθετημένοι (surface mounted(SF))** ή **συγκεντρωτικής ροής (flux concentrating(FC))**
4. Ως προς το σχήμα του στάτη: **με εγκοπές (slotted(S))** ή **χωρίς εγκοπές (slottles(SL))**

3.3.1 Προσανατολισμός κενού αέρος: ακτινικός(R) ή αξονικός(A)

Το κενό αέρος είναι απαραίτητο για το διαχωρισμό του ρότορα από το στάτη και σχηματίζει μια επιφάνεια ανάμεσα τους. Το κάθετο διάνυσμα στο

κενό αέρος μπορεί να είναι είτε ακτινικά προσανατολισμένο είτε αξονικά. Στην πρώτη περίπτωση, το διάνυσμα είναι κάθετο στον άξονα περιστροφής, ενώ στη δεύτερη περίπτωση, το διάνυσμα είναι παράλληλο στον άξονα περιστροφής. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3-3.



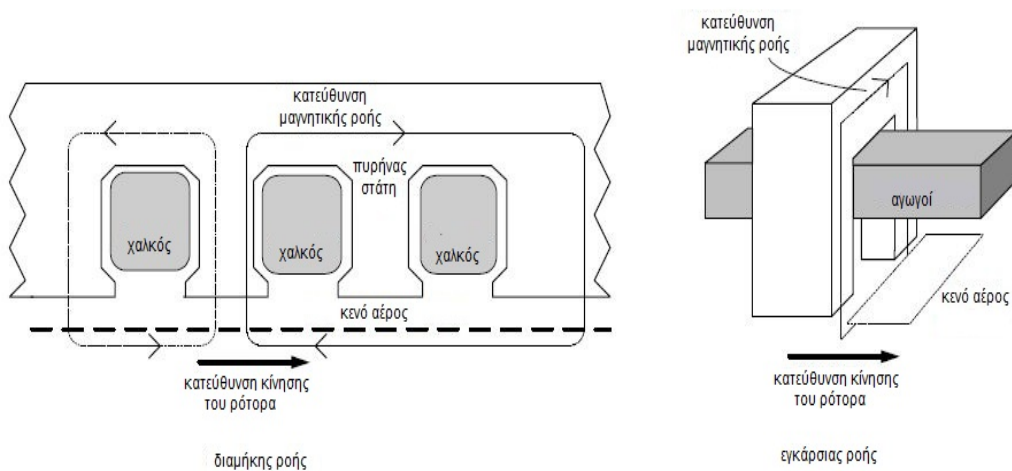
Σχήμα 3-3: Προσανατολισμός κενού αέρος: ακτινικός ή αξονικός

Στις μηχανές αξονικής ροής έχουμε δύο κατηγορίες ανάλογα με το που είναι τοποθετημένοι οι μαγνήτες μας. Η μία ονομάζεται **εξωτερικών πόλων** και όπως υποδηλώνει η ονομασία της οι μαγνητικοί πόλοι περιστρέφονται έξω από την περιφέρεια του σπλισμού του στάτη. Η δεύτερη ονομάζεται **εσωτερικών πόλων** και στην οποία οι μαγνητικοί πόλοι περιστρέφονται μέσα στον σπλισμό του στάτη.

3.3.2 Προσανατολισμός πυρήνα στάτη: διαμήκης ροής(L) ή εγκάρσιας ροής(T)

Ο πυρήνας του στάτη φέρει τη ροή γύρω από τις περιελίξεις του στάτη προκειμένου να δημιουργήσει μία ηλεκτρεγερτική δύναμη στις περιελίξεις. Η ροή αυτή μπορεί να μεταφερθεί με κατεύθυνση παράλληλη ή κάθετη στη κατεύθυνση της κίνησης. Στην πρώτη περίπτωση, η μηχανή ονομάζεται διαμήκης ροής και στη δεύτερη περίπτωση εγκάρσιας ροής. Στους στάτες διαμήκης ροής βλέπουμε το διαθέσιμο χώρο για τους αγωγούς να μειώνεται καθώς μειώνεται το

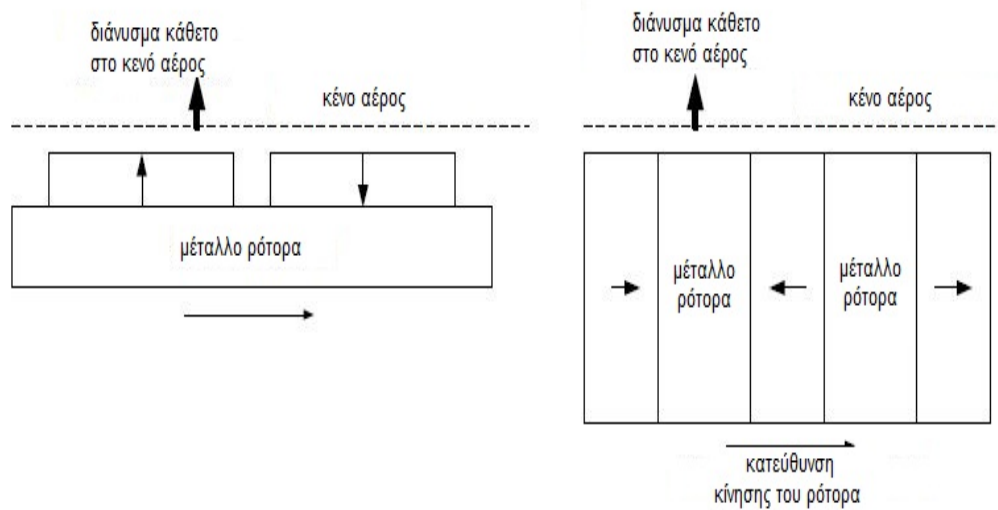
βήμα των πόλων.



Σχήμα 3-4: Προσανατολισμός πυρήνα στάτη: διαμήκης ροής ή εγκάρσια ροής

3.3.3 Προσανατολισμός MM ως προς το κενό αέρος: επιφανειακά τοποθετημένοι(SF) ή συγκεντρωτικής ροής(FC)

Οι μόνιμοι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι στον ρότορα. Ο μαγνητισμός των MM έχει μια κατεύθυνση η οποία μπορεί να είναι είτε κάθετη είτε παράλληλη σε ένα κάθετο διάνυσμα στο κενό αέρος, όπως φαίνεται στο σχήμα 3-5.



Σχήμα 3-5: Προσανατολισμός μαγνητών ως προς το κενό αέρος: επιφανειακά τοποθετημένοι(σχήμα αριστερά) ή συγκεντρωτικής ροής(σχήμα δεξιά)

Ο διαχωρισμός αφορά μόνο δύο πιθανές διατάξεις για τους MM πάνω στον ρότορα. Ωστόσο υπάρχουν και άλλοι πιθανοί σχηματισμοί όπως οι ένθετοι(Inset) και οι ενσωματωμένοι(buried) MM στον ρότορα με ακτινική μαγνήτιση. Σε όλες τις διατάξεις οι διπλανοί μαγνήτες έχουν αντίθετη πολικότητα, δηλαδή οι μάνητες εναλλάσσονται **N** και **S** διαδοχικά, και η κίνηση του ρότορα δημιουργεί ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο στα πηνία του στάτη.

3.3.4 Προσανατολισμός ως προς το σχήμα του στάτη: με εγκοπές(S) ή χωρίς εγκοπές(SL)

Τα ελάσματα του στάτη μπορούν να κατασκευαστούν είτε με δόντια (tooth) είτε χωρίς δόντια (toothless). Στον στάτη με δόντια αυτά χρησιμοποιούνται για να φέρουν τη μαγνητική ροή και να συγκρατούν τους αγωγούς στο στάτη. Στον στάτη χωρίς δόντια, οι αγωγοί του στάτη είναι τοποθετημένοι στο κενό αέρος και η μαγνητική ροή πρέπει να περνάει ένα πυκνότερο διάστημα ενός μη μαγνητικού μέσου. Αυτό οδηγεί σε χαμηλότερη μαγνητική ροή εκτός φορτίου που απαιτεί τη χρήση παχύτερων μαγνητών.

Ένας στάτης χωρίς εγκοπές φέρει πλεονεκτήματα σε εφαρμογές μηχανών αξονικής ροής, γιατί είναι δύσκολο να κατασκευαστούν ελάσματα με εγκοπή για τέτοιου είδους μηχανές. Ωστόσο η απουσία εγκοπών οδηγεί σε προβλήματα συνοχής των περιελίξεων.

Ένα άλλο πλεονεκτημάτων μηχανών χωρίς εγκοπές είναι οι λιγότερες απώλειες πυρήνος. Σε ένα στάτη με εγκοπές, μια μεγάλη ποσότητα της μαγνητικής ροής πάει μέσω των δοντιών που συμπεριφέρονται σαν συλλέκτες της ροής. Η μαγνητική πυκνότητα και οι απώλειες πυρήνος είναι σε αυτή την περίπτωση μεγαλύτερες στα δόντια. Συνεπώς, οι μηχανές χωρίς εγκοπές μπορεί να είναι πιο ελκυστικές για εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων. Όμως στη δική μας εφαρμογή όπου έχουμε γεννήτρια χαμηλών στροφών το πρόβλημα της απώλειας πυρήνος εκτός φορτίου είναι ένα σημαντικό μειονέκτημα. Άλλο ένα μειονέκτημα των μηχανών χωρίς δόντια, είναι η αύξηση των απωλειών χαλκού λόγω της μαγνητικής ροής που διαχέει τις περιελίξεις ακόμα και εκτός φορτίου.

3.4 Κυριότεροι συνδυασμοί μηχανών μονίμων μαγνητών

Τα τέσσερα χαρακτηρίστηκα που περιγράφονται παραπάνω είναι λίγο πολύ ανεξάρτητα μεταξύ τους. Μπορούν να συνδυαστούν δίνοντας διαφορετικές διατάξεις μηχανών MM. Στον πίνακα 3-2 περιγράφονται οι τέσσερις πιο σημαντικές από αυτές. Είναι αυτές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν μηχανές MM άμεσης-οδήγησης.

Πίνακας 3-2: Πιθανές εφαρμογές από τα τέσσερα χαρακτηρίστηκα παραπάνω.

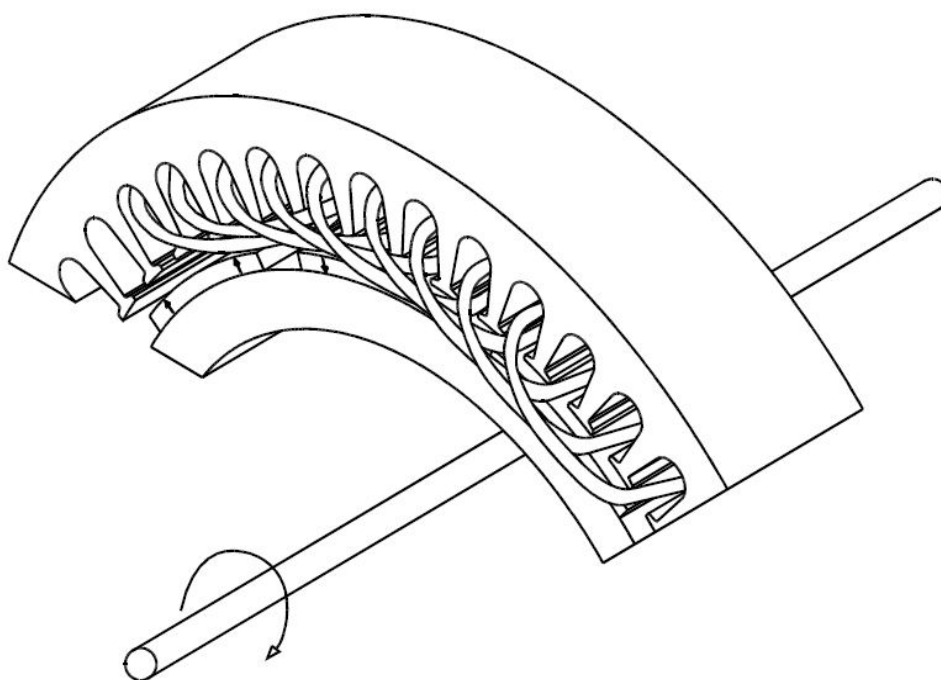
Ονομασία εφαρμογής	Ακτινικής (R)/ αξονικής (A) ροής	Διαμήκης (L)/ εγκάρσιας (T) ροής	Επιφανειακά τοποθετημένοι (SM)/ συγκεντρωτικής ροής(FC)	Με σχισμή (S)/χωρίς σχισμή (SL)
Συμβατική σύγχρονη μηχανή MM	R	L	SM	S
Συμβατική σύγχρονη μηχανή MM με συγκεντρωτική ροή	R	L	FC	S
Αξονικής ροής μηχανή MM με σχισμές	A	L	SM	S
TORUS	A	L	SM	SL
Μηχανή MM εγκάρσιας ροής με επιφανειακή τοποθέτηση	R	T	SM	S
Μηχανή MM εγκάρσιας ροής συγκεντρωτικής ροής	R	T	FC	S

Παρακάτω θα δούμε μόνο τους δύο πρώτους συνδυασμούς που μας ενδιαφέρουν

3.4.1 Συμβατική σύγχρονη μηχανή μόνιμων μαγνητών

Αυτή τη μηχανή, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3-6, τη συναντάμε στη βιβλιογραφία με διάφορα ονόματα όπως, μηχανή επιφανειακά τοποθετημένων MM ή , μηχανή επιφανειακά τοποθετημένων MM ακτινικής ροής πιο περιγραφικά. Επιλέξαμε την ονομασία “συμβατική σύγχρονη μηχανή MM” μιας και είναι λίγο πολύ ο πιο κοινός τύπος μηχανής.

Η “συμβατική” λοιπόν αυτή μηχανή είναι μια μηχανή ακτινικός (R), διαμήκης ροής (L), στάτη με εγκοπές και μόνιμους μαγνήτες επιφανειακά τοποθετημένους στον ρότορα. Το παράδειγμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 3-6, είναι μια μηχανή με τριφασικές περιελίξεις στον στάτη, με αναλογία μια σχισμή ανά φάση ανά πόλο. Η περιέλιξη είναι διπλής στρώσης, με δύο αγωγούς ανά εγκοπή. Η γεννήτρια που κατασκευάσαμε ανήκει σε αυτήν την οικογένεια μηχανών, για αυτό το λόγω θα αναφερθούμε σε αυτό παρακάτω εκτενέστερα.



Σχήμα 3-6: Συμβατική σύγχρονη μηχανή MM

3.4.2 Συμβατική σύγχρονη μηχανή MM με συγκεντρωτική ροή

Είναι μια ακτινική μηχανή, με διαμήκη ροή, στο στάτη έχει σχισμές, και οι μόνιμοι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι σε διάταξη συγκεντρωτικής ροής. Ο στάτης είναι όμοιος με τη μηχανή που περιγράφεται παραπάνω για αυτό χαρακτηρίζουμε κ αυτή ως συμβατική. Η διάταξη αυτή, επειδή είναι συγκεντρωτικής ροής, επιτρέπει μια μεγαλύτερη πυκνότητα μαγνητικής ροής στο κενό αέρος από ότι η παραμένων αυτή των μόνιμων μαγνητών. Αυτό προσφέρει σημαντικές πιθανότητες να χρησιμοποιηθούν μαγνήτες φερρίτη αντί για του περισσότερο δαπανηρούς μαγνήτες σπάνιας γης (π.χ. μαγνήτες νεοδυμίου).

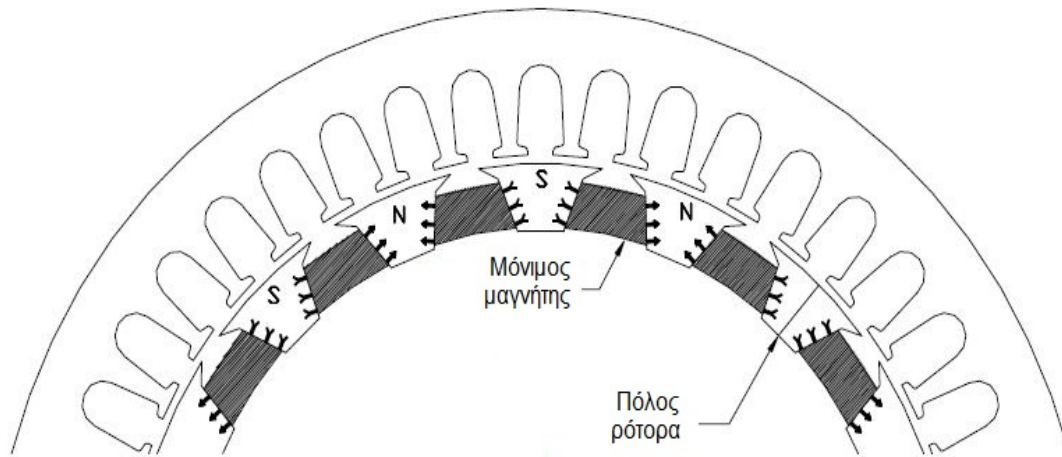
Αν χρησιμοποιηθούν μαγνήτες φερρίτη, θα πρέπει να περιμένουμε και μια αύξηση της μάζας για δεδομένη τιμή της ροπής, οπότε αφού δεν έχουμε κάποιο λειτουργικό πλεονέκτημα η επιλογή αυτή γίνεται λιγότερο ελκυστική.

Άλλο ένα πλεονέκτημα αυτής της γεωμετρίας είναι η ύπαρξη προεξοχών, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παράγουν επιπλέον ροπή μαγνητικής αντίστασης και να αυξήσει το εύρος ταχύτητας της μηχανής. Ωστόσο είναι αμφιλεγόμενο το κατά πόσο αυτό είναι χρήσιμο σε μια γεννήτρια ανεμογεννήτριας.

Ένας άλλος παράγοντας που πρέπει να πάρουμε υπόψη μας είναι η ευκολία κατασκευής. Από αυτήν την οπτική γωνία η συγκεκριμένη τοπολογία δεν υπερτερεί της συμβατικής σύγχρονης μηχανής MM παραπάνω. Ένας ρότορας συγκεντρωτικής ροής όπως φαίνεται στο σχήμα 3-7 σίγουρα θα αυξήσει την πολυπλοκότητα της κατασκευής.

Οπότε για εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων, η τοπολογία αυτή μπορεί να προσφέρει καλύτερη διατήρηση μαγνητικής ροής. Στη περίπτωση όμως μίας γεννήτριας άμεσης-οδήγησης για ανεμογεννήτρια

που μας αφορά, η ταχύτητα περιστροφής είναι χαμηλή και η διατήρηση της μαγνητικής ροής δεν μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα.



Σχήμα 3-7: Συμβατική σύγχρονη μηχανή MM συγκεντρωτικής ροής

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΙΑΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξεταστούν όλες τις παραμέτρους που πρέπει να ληφθούν υπόψη όταν κατασκευάζετε μια γεννήτρια **μόνιμων μαγνητών** τριών φάσεων. Θα επικεντρωθούμε στη διάταξη της συμβατικής σύγχρονης γεννήτριας μόνιμων μαγνητών με **εσωτερικούς πόλους**, θα αναλυθούν οι κατασκευαστικές επιλογές που υπάρχουν για τις περιελίξεις και για τον ρότορα. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα που ωθούν στο να χρησιμοποιηθεί ρότορας εσωτερικών πόλων είναι η σχετικά υψηλή επαγωγή των πηνίων που βελτιώνει την εξασθένιση της ροής και η εύκολη διατήρηση της μαγνήτισης στον ρότορα.

Στις εφαρμογές χαμηλών στροφών χρειάζεται μεγάλος αριθμός μαγνητικών πόλων και αντίστοιχα μεγάλο αριθμό πηνίων για να μπορέσουν να λειτουργήσουν σε κατάλληλη συχνότητα (π.χ. 50Hz) όπως θα δούμε παρακάτω.

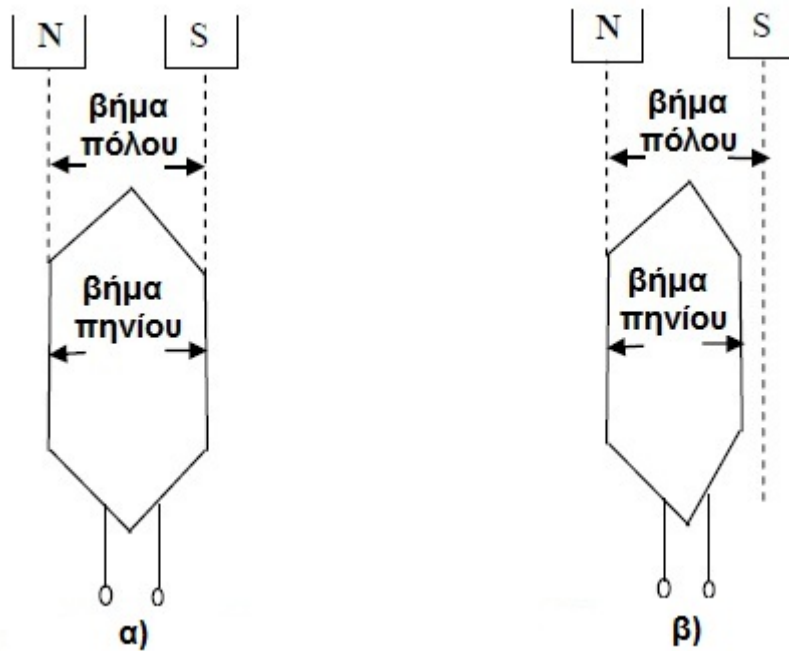
Μερικοί όροι που χρησιμοποιούνται συχνά σχετικά με τις περιελίξεις του οπλισμού περιγράφονται παρακάτω:

- 1. Αγωγός:** Το μήκος του χάλκινου σύρματος που έχει ενεργό ρόλο στη διαδικασία της μετατροπής ενέργειας.
- 2. Σπείρα:** Μία σπείρα αποτελείται από δύο αγωγούς.
- 3. Πηνίο:** Ένα πηνίο αποτελείται από ένα πλήθος σπειρών.
- 4. Πλευρά πηνίου:** Ένα πηνίο ανεξαρτήτως σπειρών έχει δύο πλευρές.
- 5. Βήμα πηνίου:** η απόσταση, σε αυλακώσεις, μεταξύ των δύο πλευρών του πηνίου. Συνήθως μετριέται ανά οδόντώσεις του στάτη, αυλακώσεις ή ηλεκτρικές μοίρες.
- 6. Βήμα πόλου:** Ορίζεται ως η περιφερειακή απόσταση μεταξύ δύο αντίστοιχων σημείων δύο διαδοχικών πόλων. Το βήμα πόλου είναι πάντα

ίσο με 180 ηλεκτρικές μοίρες.

7. Πηνίο πλήρους βήματος και πηνίο κλασματικού βήματος:

- ❖ Αν το βήμα πηνίου είναι **ίσο** με το βήμα πόλου, τότε το πηνίο ονομάζεται **πλήρους βήματος**.
- ❖ Στην περίπτωση όπου το βήμα πηνίου είναι **μικρότερο** από το βήμα πόλου, το πηνίο τότε ονομάζεται **κλασματικού βήματος**.
 - ✓ Αν ο αριθμός των αυλακώσεων στο στάτη **S** και ο αριθμός των μαγνητικών πόλων **P**, τότε $Q=S/P$ αυλακώσεις ανά πόλο
 - ✓ Αν το βήμα πηνίου $y=Q=s/p$, τότε έχουμε περιέλιξη πλήρους βήματος
 - ✓ Στην περίπτωση όπου το βήμα πηνίου $y < s/p=Q$, το αποτέλεσμα είναι περιέλιξη κλασματικού βήματος



Σχήμα 4-1: α) πηνίο πλήρους βήματος β) πηνίο κλασματικού βήματος

8. Αριθμός αυλακώσεων ανά πόλο ανά φάση: ο αριθμός αυτός καθορίζει τη διάταξη της περιέλιξης. Επίσης αποκαλύπτει πληροφορίες για τον συντελεστή τυλίγματος και τις αρμονικές του.

- Αν ο αριθμός των αυλακώσεων/πόλο/φάση είναι ακέραιος, η περιέλιξη ονομάζεται **ακέραια περιέλιξη**.
- Αν ο αριθμός των αυλακώσεων/πόλο/φάση είναι κλασματικός και μεγαλύτερος του 1, η περιέλιξη ονομάζεται **κλασματική περιέλιξη**.

- Αν ο αριθμός των αυλακώσεων/πόλο/φάση είναι κλασματικός και μικρότερος του 1, η περιέλιξη είναι **συγκεντρωτική περιέλιξη ή κατανεμημένη περιέλιξη**.

9. Συντελεστής τυλίγματος: ο συντελεστής αυτός εκφράζει για μία συγκεκριμένη περιέλιξη το λόγο της ροής που διασυνδέεται με την περιέλιξη αυτή συγκρινόμενο με τη ροή που διασυνδέεται από μία μονής στρώσης, ολόκληρου βήματος, ακεραίας αυλακώσεως περιέλιξη με τον ίδιο αριθμό σπειρών και μία μόνο αυλάκωση/πόλο/φάση. Η ροπή μίας ηλεκτρικής μηχανής είναι ανάλογη με το θεμελιώδη συντελεστή τυλίγματος. Ο συντελεστής τυλίγματος k_w μπορεί γενικά να εκφραστεί ως το γινόμενο τριών παραγόντων, του συντελεστή βήματος k_p , του παράγοντα κατανομής k_d , και του παράγοντα λοξότητας k_s :

$$K_w = k_p k_d k_s$$

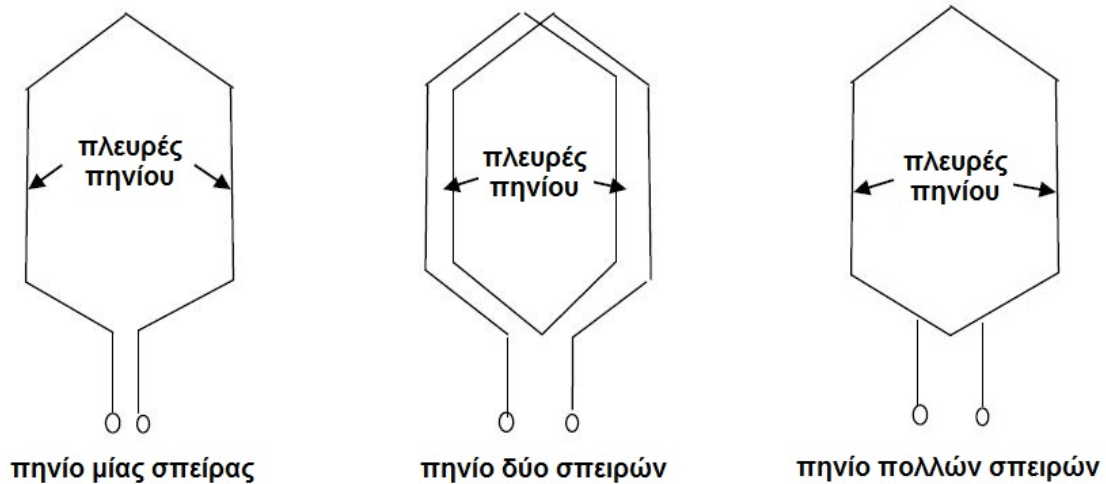
10. Αριθμός συμμετριών τυλίγματος: Ο αριθμός αυτός υποδηλώνει τον αριθμό των περιστροφικών συμμετριών σε μία περιελικτική διάταξη. Υποδηλώνει επίσης και την περιοδικότητα της μηχανής. Ο αριθμός των συμμετριών υπολογίζεται από τον μέγιστο κοινό διαιρέτη (GCD) μεταξύ του αριθμού των αυλακώσεων και του αριθμού των ζευγαριών των μαγνητικών πόλων. Είναι απαραίτητο ο αριθμός αυτός να είναι μεγαλύτερος από 1 για να αποφύγουμε τη δημιουργία ανισόροπων μαγνητικών δυνάμεων.

$$\text{GCD}(Q_s, p/2)$$

4.2 Κατασκευή περιελίξεων εναλλασσόμενου ρεύματος

Οι περιελίξεις που χρησιμοποιούνται στους εναλλακτήρες και γενικότερα στις ηλεκτρικές μηχανές μπορούν να ταξινομηθούν σε αρκετές κατηγορίες. Παρακάτω θα δούμε πιο αναλυτικά αυτές που χρησιμοποιούνται ευρέως και θα μας απασχολήσουν στην κατασκευή μας.

Ο αριθμός των αγωγών σε κάθε πλευρά του πηνίου είναι **ίσος** με τον αριθμό των σπειρών στο πηνίο αυτό.



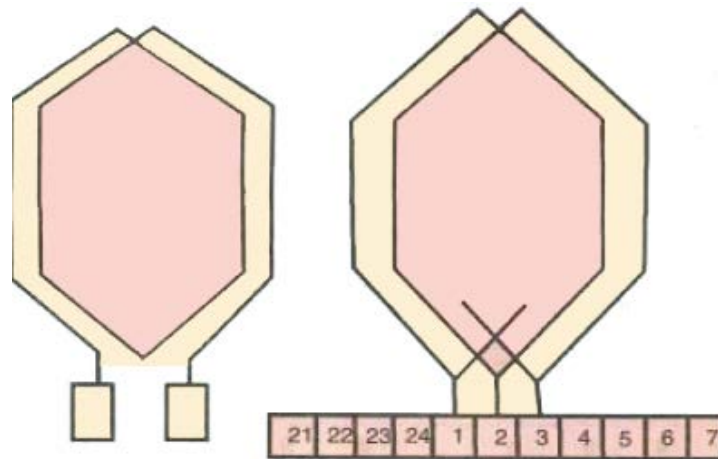
Σχήμα 4-2: Πλευρές πηνίου για διαφορετικό αριθμό σπειρών

4.2.1 Τύποι περιελίξεων οπλισμού: Βροχοειδής και κυματοειδής περιελίξεις

Στις περιελίξεις του οπλισμού μίας τριφασικής γεννήτριας, τα πηνία μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους με διάφορους τρόπους, οι οποίοι διαδομένοι τρόποι είναι είτε η **βροχοειδής** είτε η **κυματοειδής** περιέλιξη.

❖ Βροχοειδής περιελίξεις

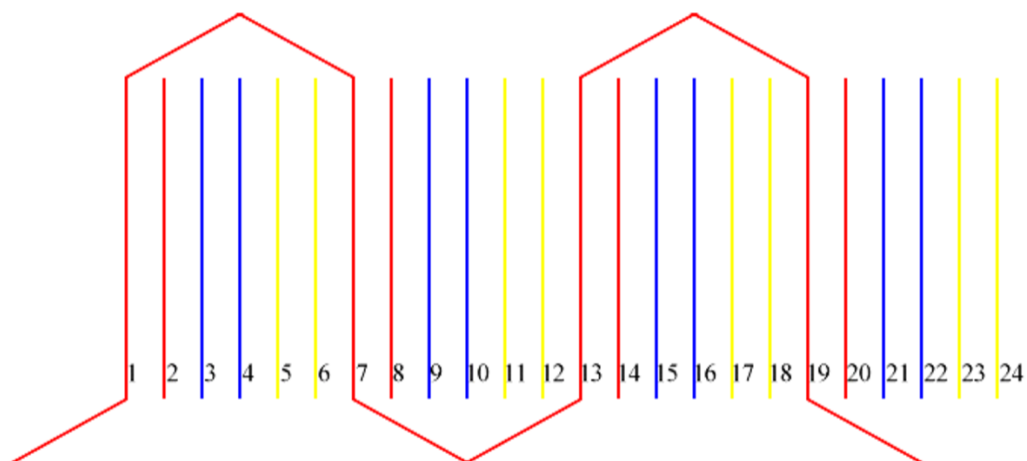
Μία βροχοειδής περιέλιξη είναι μία κλειστή τοπολογία της οποίας οι αγωγοί περιελίσσονται ο ένας πάνω από τον άλλο με την αρχή της μίας σπείρας να αποτελεί συνέχεια του τέλους της προηγούμενης σπείρας. Είναι ένας συνεχόμενος βρόχος στην εσωτερική περίμετρο του οπλισμού του στάτη και αντικρίζει τους μαγνητικούς πόλους στον ρότορα. Πολλές σπείρες αποτελούν ένα πηνίο του οποίου το τέλος είναι η κατ' επέκταση αρχή του επομένου πηνίου. Είναι ο τύπος των περιελίξεων που θα εξεταστεί παρακάτω.



Σχήμα 4-3: Βροχοειδής περιέλιξη

❖ **Κυματοειδής περιέλιξη**

Σε αντίθεση, η κυματοειδής, είναι μία εκτεταμένη περιέλιξη η οποία κάνει εναλλασσόμενη πορεία στον άξονα του σπλισμού που τοποθετείται. Τα άκρα αυτής της πορείας αυτής είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους με συνεχόμενο τρόπο έτσι ώστε η κυματοειδής περιέλιξη να κάνει άλλο ένα ή και περισσότερα περάσματα από τον σπλισμό του στάτη.

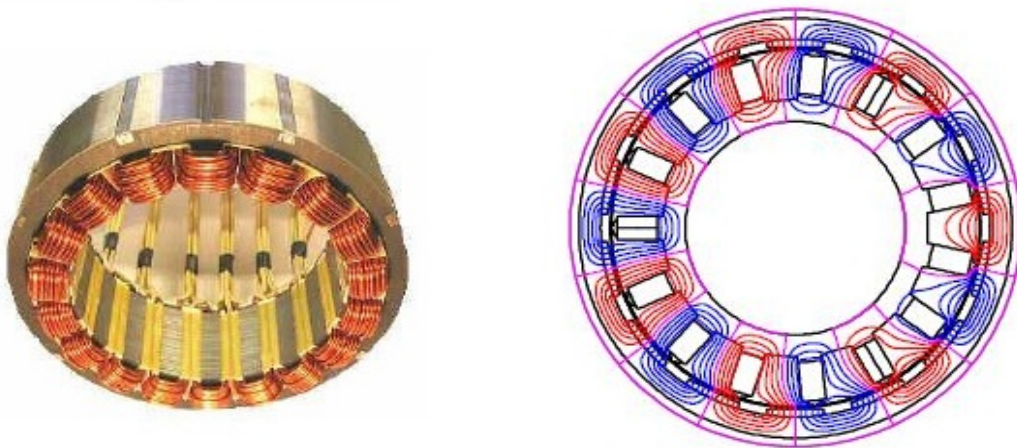


Σχήμα 4-4: Κυματοειδής περιέλιξη με βήμα πηνίου=6

- **Τύποι βροχοειδούς περιέλιξης: Συγκεντρωμένες και κατανεμημένες περιελίξεις**

❖ Συγκεντρωμένες περιελίξεις

Ο όρος συγκεντρωμένες περιελίξεις έχει επιστρατευτεί για να αναφέρει τις περιελίξεις στις οποίες οι σπείρες κάθε πηνίου είναι συγκεντρωμένες γύρω από το δόντι του στάτη κάτω από κάθε μαγνητικό πόλο. Το κάθε πηνίο κάθε φάσης αντιστοιχεί σε μία μόνο αυλάκωση στο στάτη, αυτό είναι εφικτό μόνο όταν έχουμε αριθμό αυλακώσεων ίσο ή μεγαλύτερο με τον αριθμό των πόλων ($N_s=N_p$ ή $N_s>N_p$).



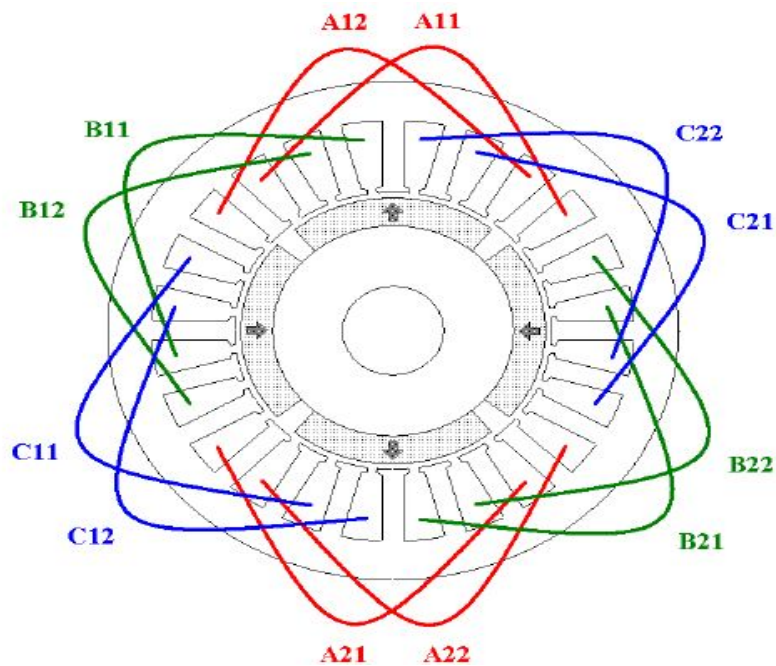
Σχήμα 4-5: Παράδειγμα στάτη με συγκεντρωμένες περιελίξεις.

- Όλες οι σπείρες της περιελίσσονται μαζί σε σειρά έτσι ώστε να δημιουργήσουν ένα πηνίο με πολλές σπείρες.
- Όλες οι σπείρες έχουν τον ίδιο μαγνητικό άξονα.
- Οι περιελίξεις αυτού του τύπου είναι μη-υπερθετικές.
- Παραδείγματα συγκεντρωμένων περιελίξεων είναι:
 - Περιελίξεις πεδίου για σύγχρονες μηχανές προεξεχόντων πόλων.
 - Μηχανές DC.
 - Πρωτεύον και δευτερεύον περιελίξεις ενός μετασχηματιστή.
 - Σε γεννήτριες με μόνιμο μαγνητικό πεδίο (για υψηλές περιστροφές).

❖ Κατανεμημένες περιελίξεις

Εάν ο αριθμός των αυλακώσεων είναι κατά πολύ μεγαλύτερος από τον αριθμό των πόλων ($N_s \gg N_p$) οι περιελίξεις είναι κατανεμημένες με πολλές

οδοντώσεις του στάτη κάτω από ένα πόλο. Ο αριθμός των στρώσεων μπορεί να είναι είτε μονός είτε διπλός (κεφ 4.2.2).



Σχήμα 4-6: Παράδειγμα κατανεμημένων περιελίξεων, διπλής στρώσης.

- Όλες οι σπείρες είναι κατανεμημένες σε διαφορετικά πλήρους βήματος ή κλασματικά πηνία
- Αυτά τα πηνία είναι φωλεμένα στις σχισμές γύρω από το κενό αέρος στο στάτη σχηματίζοντας φασικές περιελίξεις ή της περιέλιξης του συλλέκτη.
- Οι περιελίξεις μπορεί να είναι είτε υπερθετικές είτε μη-υπερθετικές.
- Παραδείγματα κατανεμημένων περιελίξεων είναι:
 - Στο στάτη και στο ρότορα επαγωγικών μηχανών.
 - Στο επαγωγικό τύμπανο των σύγχρονων μηχανών και των μηχανών DC.
 - Σε γεννήτριες με μόνιμο μαγνητικό πεδίο χαμηλών περιστροφών.
- **Σημαντικές διαφορές ανάμεσα σε κατανεμημένες και συγκεντρωμένες περιελίξεις:**
 - i. Η παραγόμενη ηλεκτροπαραγωγική δύναμη στις συγκεντρωμένες

περιελίξεις είναι μεγαλύτερη από ότι στις κατανεμημένες.

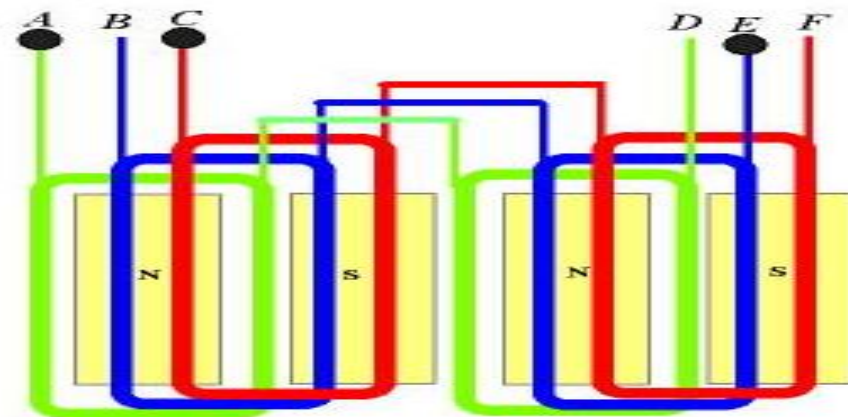
- ii.* Οι αρμονική παραμόρφωση και ο θόρυβος στις κατανεμημένες περιελίξεις είναι λιγότερος από ότι στις συγκεντρωμένες, οπότε και βελτιωμένη κυματομορφή. (Αυτός είναι ο κυριότερος λόγος για τον οποίο οι κατανεμημένες περιελίξεις έχουν ευρεία χρήση)
- iii.* Οι παρεμβολές του σπλισμού (π.χ. απώλειες σιδήρου στο στάτη) είναι λιγότερες για τις κατανεμημένες περιελίξεις.
- iv.* Στις συγκεντρωμένες περιελίξεις έχουμε την ανάπτυξη χαμηλότερης ηλεκτρομαγνητικής ροπής εξαιτίας του χαμηλότερου συντελεστή τυλίγματος.

4.2.2 Επίπεδα στρώσεων περιελίξεων

Στην περίπτωση περιελίξεων όπου ο στάτης της μηχανής είναι με αυλακώσεις μπορούμε να έχουμε μονής στρώσης και διπλής στρώσης. Υπάρχουν και περιελίξεις πολλαπλών στρώσεων όμως δεν έχουν συνήθως εφαρμογή σε γεννήτριες και δε θα μας απασχολήσουν παρακάτω.

➤ Μονής στρώσης περιέλιξη

Είναι αυτή η περιέλιξη όπου κάθε αγωγός ή πλευρά πηνίου αντιστοιχεί σε μία αυλάκωση στο στάτη. Επειδή λοιπόν μια πλευρά πηνίου καταλαμβάνει μία ολόκληρη αυλάκωση, ο αριθμός των πηνίων (**C**) είναι ίσος με το μισό αριθμό των αυλακώσεων (**S**), $C=1/2*S$. Οι περιελίξεις αυτού του είδους δεν χρησιμοποιούνται συχνά σε γεννήτριες χαμηλών στροφών.

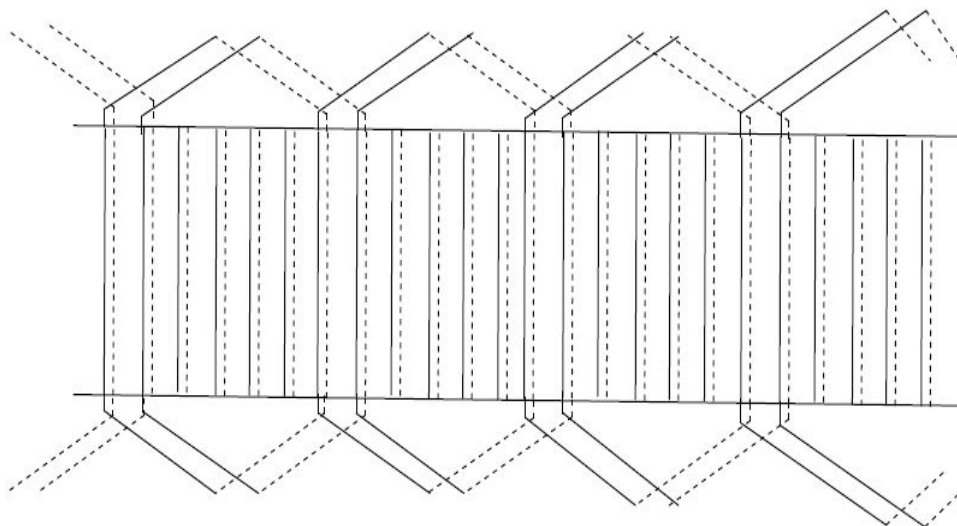


Σχήμα 4-7: Μονής στρώσης περιέλιξη τριών φάσεων.

➤ Διπλής στρώσης περιέλιξη

Σε αυτή τη περίπτωση, υπάρχουν δύο αγωγοί ή πλευρές πηνίου ανά αυλάκωση στο στάτη. Συνήθως, η μία πλευρά κάθε πηνίου είναι στο πάνω μισό μέρος μίας αυλάκωσης και η άλλη του πλευρά στο κάτω μισό μέρος μίας άλλης αυλάκωσης σε απόσταση πάντα του ανάλογου βήματος πηνίου. Αυτές οι περιελίξεις έχουν μεγάλη εφαρμογή σε μεσαίου μεγέθους μηχανές. Οι πλευρές των πηνίων που στο πάνω μέρος του αυλακώματος απαριθμούνται με μονούς αριθμούς (π.χ. 1,3,5,7,9 κλπ), ενώ αυτές που βρίσκονται στο κάτω μέρος με ζυγούς αριθμούς (π.χ. 2,4,6,8 κλπ).

- Οι σπλισμοί στο στάτη σύγχρονων και επαγωγικών μηχανών μεσαίου η μεγαλύτερου μεγέθους είναι περιελιγμένες με διπλής στρώσης περιελίξεις.
- Αν ο αριθμός των αυλακώσεων ανά πόλο ανά φάση ($q=s/m \cdot p$) είναι ακέραιος, τότε η περιέλιξη ονομάζεται **ακέραιο τύλιγμα αύλακος**.
- Στην περίπτωση όπου ο αριθμός των αυλακώσεων ανά πόλο ανά φάση, q δεν είναι ακέραιος, η περιέλιξη ονομάζεται **κλασματικό τύλιγμα αύλακος**.
- Ο αριθμός των πηνίων C είναι πάντα ίσος με τον αριθμό των αυλακώσεων, $S \cdot C = S$



Σχήμα 4-8: Παράδειγμα διαγράμματος για περιέλιξη διπλής στρώσης με ακέραιο τύλιγμα αύλακος μόνο για τη μια φάση

❖ Πλεονεκτήματα της περιέλιξης διπλής στρώσης έναντι της μονής στρώσης

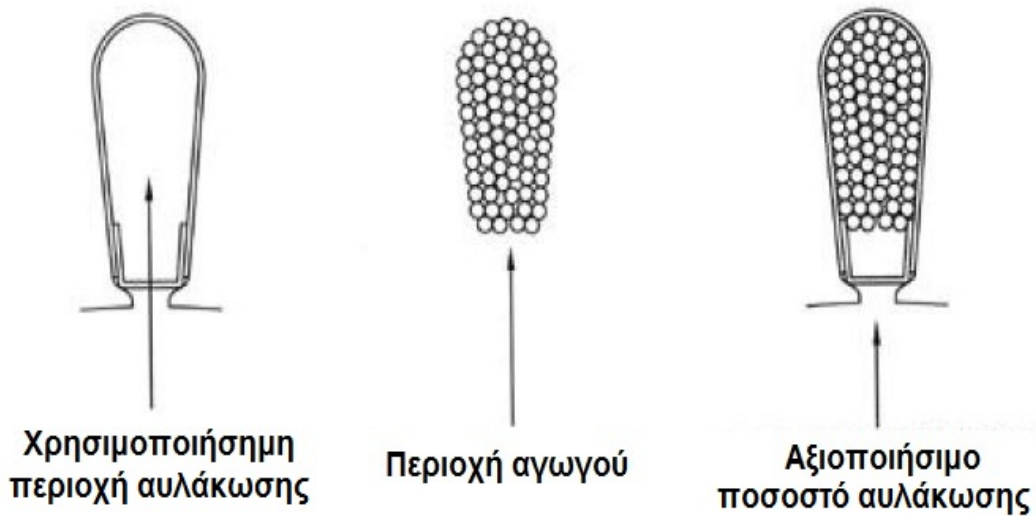
1. Είναι ευκολότερη στην κατασκευή και έχει λιγότερο κόστος
2. Περιέλιξη κλασματικού βήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί
3. Δημιουργείται χαμηλότερη διαρροή στην επαγωγική αντίσταση, οπότε καλύτερη απόδοση
4. Υπάρχει μείωση ή ακόμα και εξάλειψη σε κάποιες υποαρμονικές στο κενό αέρος που συνεπάγεται σε λιγότερες απώλειες δινορευμάτων στον πυρήνα σιδήρου του στάτη
5. Έχουμε καλύτερη κυματομορφή της Η.Ε.Δ. στις γεννήτριες ρεύματος

4.2.3 Γέμισμα αυλάκωσης (Slot Fill)

Ο παράγοντας αυτός δίνεται συνήθως και σαν ποσοστό που εκφράζει την ποσότητα του αγωγού σε μία αυλάκωση σε σχέση με το συνολικό εμβαδόν της αυλάκωσης αυτής. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι υπολογισμού του παράγοντα αυτού, ωστόσο οι περισσότεροι δεν λαμβάνουν υπόψη τους το μέγεθος και το πάχος της μόνωσης ή ακόμα και τα κενά αέρος μεταξύ των αγωγών. Η εξίσωση που ακολουθεί στη συνέχεια, είναι μία μέθοδος υπολογισμού του γεμίματος αυλάκωσης που συμπεριλαμβάνει όλα τα παραπάνω.

$$S.F.= \frac{(Αριθμός Σπειρών) \times (Διάμετρος Αγωγού)^2}{Διαθέσιμη περιοχή Αυλάκωσης}$$

- Η Διάμετρος του Αγωγού πρέπει να περιέχει και το μέγεθος της μόνωσης.
- Η Διαθέσιμη περιοχή αυλάκωσης περιλαμβάνει την ελασματοποίηση χωρίς όμως την μόνωση και είναι η περιοχή που καθορίζεται από την σφήνα που προστατεύει και κρατάει στη θέση τους τις περιελίξεις, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4-9: Γέμισμα αυλάκωσης

➤ Κατασκευή περιελίξεων στο χέρι

Όταν οι περιελίξεις στο στάτη είναι κατασκευασμένες στο χέρι, το μεγαλύτερο μέγεθος αγωγού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι το 18AWG (1.00mm^2). Έχουμε αυτόν τον περιορισμό γιατί μέχρι και ένα τέτοιου μεγέθους αγωγό είναι εύκολο να τον επεξεργαστούμε στο χέρι, να περιελίξουμε δηλαδή τα πηνία σε μία χειροκίνητη περιελικτική μηχανή και να τα εισάγουμε ένα προς ένα στον στάτη. Είναι δυσκολότερο χειροποίητα να καταφέρουμε τον ίδιο βαθμό γέμισματος αυλάκωσης με μία αυτόματη μηχανή. Οι χειροποίητες περιελίξεις δεν μπορεί να είναι τόσο συμπαγείς όταν περιελίσσουμε μία γεννήτρια με μεταλλικό πυρήνα στον στάτη, λόγω της ύπαρξης οδοντώσεων και του στενού διακένου μεταξύ τους, οι αγωγοί των πηνίων πρέπει να περνάνε σε μικρό αριθμό κάθε φορά από το διάκενο των οδοντώσεων.

Με κοινές αυτοματοποιημένες μηχανές περιέλιξης μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μέχρι και 16AWG (1.25mm^2) σύρματος και με σύγχρονες μονάδες περιέλιξης το μέγεθος του σύρματος μπορεί να πάει μέχρι και 13AWG (1.8mm^2), όμως η ευελιξία σε αυτές τις μηχανές είναι περιορισμένη από τον αριθμό των αγωγών που μπορούν να περιελιχθούν παράλληλα.

4.2.4 Συνδεσμολογία φάσεων: Αστέρα (Υ) και Τριγώνου (Δ)

Οι τρόποι με τους οποίους είναι δυνατόν να συνδεθούν τα άκρα των τυλιγμάτων στο εσωτερικό μιας τριφασικής γεννήτριας εναλλασσόμενου ρεύματος είναι: η σύνδεση του αστέρα (Υ) και η σύνδεση του τριγώνου (Δ).

Συνδεσμολογία αστέρα (Υ):

Τα τυλίγματα του στάτη έχουν ένα κοινό σημείο σύνδεσης (σχήμα 5-10) και χρησιμοποιούνται σε εναλλακτικές όπου χρειάζεται μεγάλη τάση εξόδου με μικρή ταχύτητα περιστροφής. Σε μερικές περιπτώσεις, το κοινό αυτό σημείο συνδέεται σαν ουδέτερος για να βελτιώσουμε το πρόβλημα εάν μία από τις φάσεις αποτύχει να εκκινήσει.

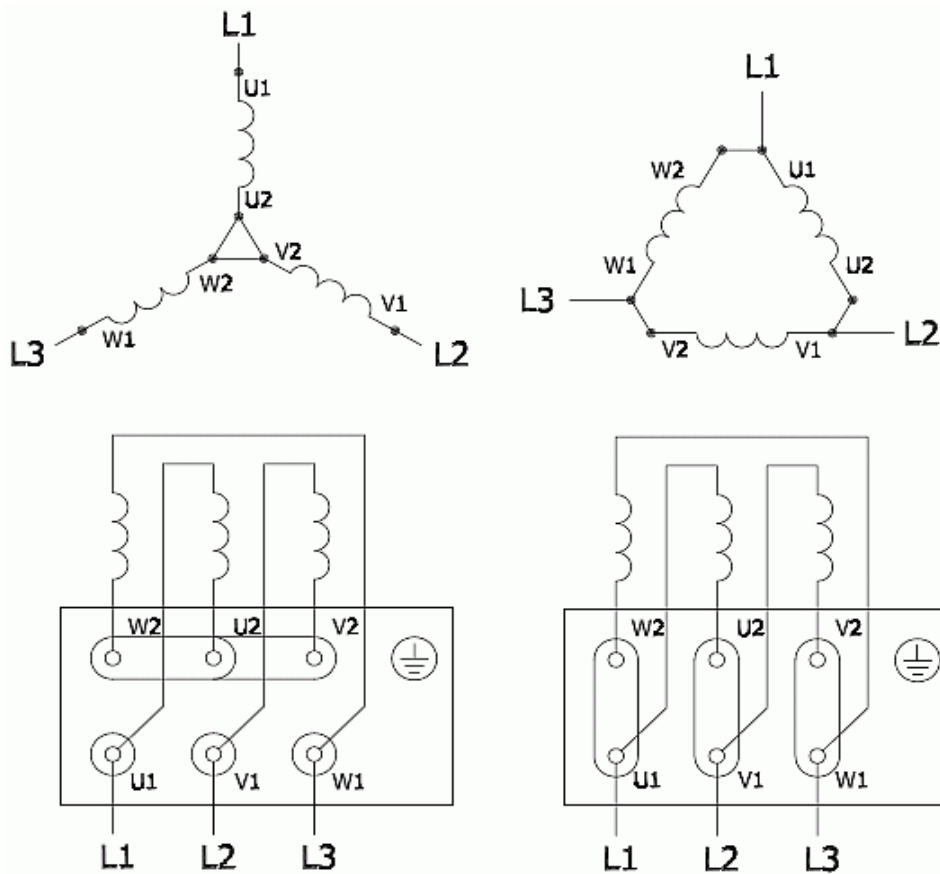
Συνδεσμολογία τριγώνου (Δ):

Τα τυλίγματα του στάτη είναι συνδεδεμένα σε σειρά (σχήμα 5-10) και χρησιμοποιούνται όταν χρειάζεται έξοδος με μεγάλο ρεύμα (Α). Επειδή δεν υπάρχει κοινό σημείο δεν χρειάζεται η χρήση ουδετέρου, αν μία πηγή αποτύχει να εκκινήσει δεν θα επηρεάζει την τάση ή το ρεύμα στο σύστημα.

Τα πλεονεκτήματα της μίας συνδεσμολογίας έναντι της άλλης:

Ενώ η συνδεσμολογία αστέρα είναι πιο ευαίσθητη στην αποτυχία εκκίνησης, ο σχηματισμός επιτρέπει μικρότερο ρεύμα να διαρρέει τον αγωγό. Οπότε απαιτείται αγωγός μικρότερης διατομής, γεγονός αρκετά σημαντικό όταν έχουμε μεγάλο αριθμό περιελίξεων όπου θα έχουμε λιγότερο όγκο και βάρος του αγωγού.

Από την άλλη, το κύριο πλεονέκτημα της συνδεσμολογίας τριγώνου είναι να μην επηρεάζεται το σύστημα από τυχόν αποτυχία εκκίνησης μίας φάσης. Για το λόγο αυτό η συνδεσμολογία αυτή θεωρείται πιο αξιόπιστη έστω κι αν δημιουργείται μεγαλύτερο ρεύμα στην γραμμή



Σχήμα 4-10: Αριστερά: Συνδεσμολογία αστέρα, Δεξιά: Συνδεσμολογία τριγώνου

4.3 Κατασκευή του στάτη

Με την έλευση προϊόντων σπάνιας γης έχει αναθεωρηθεί η χρήση μόνιμων μαγνητών για την διέγερση του μαγνητικού πεδίου στις σύγχρονες μηχανές. Οι μόνιμοι μαγνήτες σπάνιας γης μας επιτρέπουν να κατασκευάσουμε υψηλής αποδοτικότητας και ενεργειακής συχνότητας μηχανές. Εκτός αυτού μειώνει το μέγεθος, το βάρος και την πολυπλοκότητα μίας γεννήτριας και αποφεύγεται η χρήση των δακτυλίων ολίσθησης και του κυκλώματος διέγερσης στο στάτη.

Για την κατασκευή του πυρήνα του στάτη το μέταλλο που χρησιμοποιείται είναι συνήθως είτε μαλακός σίδηρος είτε κάποιο μαλακό κράμα χάλυβα. Χρησιμοποιούνται μαγνητικά υλικά διότι ενισχύουν τη μαγνητική ροή των γραμμών όπως επίσης με τον παραμένον μαγνητισμό προστατεύουν τους μαγνήτες από τυχόν απομαγνήτιση. Ο πυρήνας του στάτη μπορεί να είναι κατασκευασμένος είτε συμπαγής είτε με μεταλλικά ελάσματα.

Στην πρώτη περίπτωση έχουμε το μειονέκτημα της μεγαλύτερης μάζας, αλλά το πλεονέκτημα της πιο στιβαρής κατασκευής και της μεγαλύτερης ενίσχυσης της μαγνητικής ροής, ενώ στη δεύτερη το ακριβός αντίθετο.

Ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα στη κατασκευή του ρότορα με μόνιμο μαγνητικό πεδίο είναι ποιά μέθοδο θα χρησιμοποιηθεί για να κρατηθούν οι μαγνήτες πάνω στον πυρήνα του ρότορα και να μη φύγουν κατά τη λειτουργία της γεννήτριας. Κολλώντας ή προσδένοντας τους μαγνήτες αυξάνει την πολυπλοκότητα και το χρόνο κατασκευής, ενώ ενσωματώνοντας τους στον πυρήνα του ρότορα αυξάνει τις διαρροές και την πολυπλοκότητα της μαγνητικής σχεδίασης. Σημαντικό ζήτημα επίσης αποτελεί ο περιορισμός του φαινομένου της οδοντωτής ροπής (cogging torque) κατά την εκκίνηση της γεννήτριας.

4.3.1 Αριθμός των πόλων και το βέλτιστο πάχος τους

- ❖ Η θεμελιώδης συχνότητα f του μετατροπέα ισχύος δίδεται από την απαιτούμενη ταχύτητα της σύγχρονης μηχανής (n σε rpm) και τον αριθμό των πόλων της p :

$$n = \frac{120f}{p}$$

Ο αριθμός των πόλων είναι πάντα πολλαπλάσιο του τέσσερα. Μηχανές με μικρό αριθμό πόλων είναι σχεδιασμένες για λειτουργούν σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής. Μπορούν να αποδώσουν και σε χαμηλές στροφές αν τις τροφοδοτήσουμε με χαμηλή συχνότητα, πρέπει όμως να είναι σχεδιασμένες για να αντέχουν στην υψηλή μηχανική ροπή που δημιουργείται λόγω αυτού, γεγονός που αυξάνει τη δυσκολία της σχεδίασής της. Ωστόσο αυτή η λύση δεν είναι αποτελεσματική επειδή επιπλέον η τροφοδοτούμενη συχνότητα είναι πολύ πιο χαμηλή από την ονομαστική συχνότητα του μετατροπέα. Με χαμηλή συχνότητα, τα τρανζίστορ θα πρέπει να είναι πολύ μεγάλα σε μέγεθος για να αντέξουν τις μεγάλες θερμικές μεταβολές. Οπότε, για να πετύχουμε αποδόσεις σε χαμηλές περιστροφές με συχνότητα 50 Hz επιλέγουμε μεγάλο αριθμό πόλων διότι ο υψηλός αριθμός πόλων αυξάνει την συχνότητα στην

έξοδο μίας γεννήτριας.

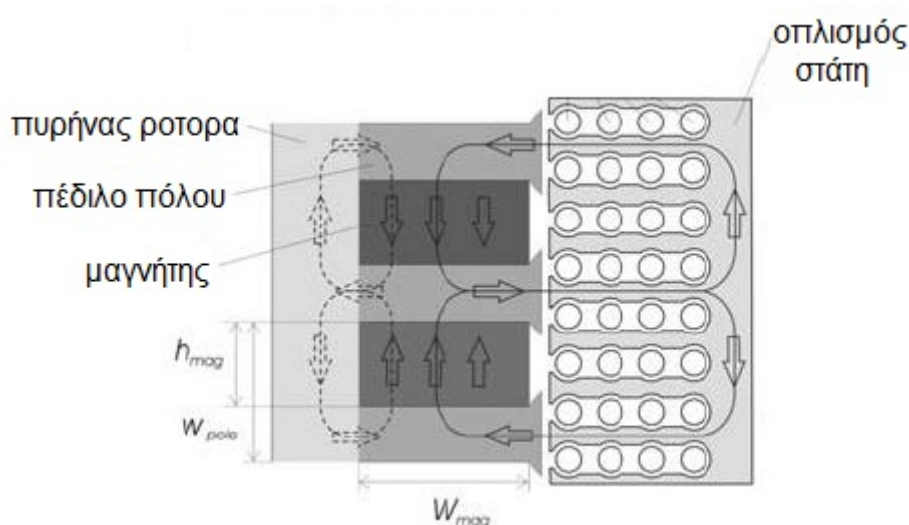
- ❖ Το πάχος των μαγνητών σε μία γεννήτρια ακτινικής ροής ορίζεται ως το κλάσμα εσωτερικής διαμέτρου των μαγνητών του ρότορα, προς την εξωτερική διάμετρο τους:

$$T_m = R_{in}/R_{out}$$

Ως ιδανικό πάχος μαγνητών ορίζεται: $T_{m,opt} = R_{in}/R_{out} = 0.9$, όσο η τιμή του πάχους απομακρύνεται από την ιδανική και προς τα πάνω, έχουμε μείωση της έντασης της μαγνητικής ροής που συνεπάγεται σε χαμηλή αποδοτικότητα της μηχανής. Ενώ όσο η τιμή του πάχους απομακρύνεται από την ιδανική και προς τα κάτω, έχουμε ιδιαίτερη αύξηση της μαγνητικής ροής, φαινόμενο που αυξάνει διάφορα μη επιθυμητά φαινόμενα (βλ. 4.4) και μπορεί να οδηγήσει σε μη εκκίνηση της μηχανής.

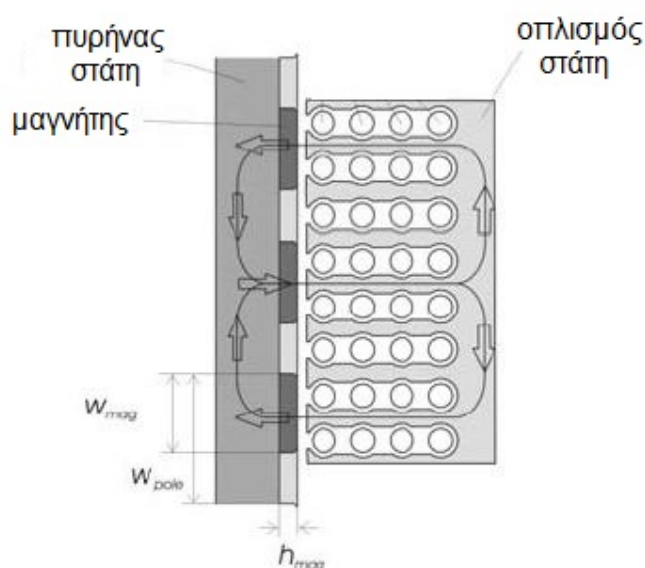
4.3.2 Τοποθέτηση μαγνητών στον πυρήνα του ρότορα

Στο σημείο αυτό θα εξετάσουμε τις δύο πιο διαδεδομένες μεθόδους τοποθέτησης των μονίμων μαγνητών στον ρότορα, της επιφανειακής τοποθέτησης και της ενσωμάτωσης των μαγνητών στον ρότορα. Σε όλες τις εφαρμογές οι διπλανοί μαγνήτες έχουν αντίθετη πολικότητα ως συνέπεια η κίνηση του ρότορα δημιουργεί ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο στα πηνία του στάτη.



Σχήμα 4-11: Μαγνητικό κύκλωμα για ρότορα με ενσωματωμένους μαγνήτες

Στο παραπάνω σχήμα (4-11), η μαγνητική ροή οδηγείται από τους μαγνήτες στις ασάλινες μαγνητικές μπάρες που ονομάζονται πέδιλα του πόλου. Τα πέδιλα αυτά καθιστούν δυνατή τη κατανομή της μαγνητικής ροής στην περιφέρεια του κενού αέρος, επίσης προστατεύει τους μαγνήτες από τα μεταβατικά μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται από βραχυκυκλώματα στο εξωτερικό κύκλωμα. Στο πίσω μέρος ο πυρήνας του ρότορα είναι κατασκευασμένος από αλουμίνιο, αυτό χρησιμεύει σαν φράγμα για να μην περάσει η μαγνητική ροή στο πίσω μέρος του ρότορα. Ωστόσο μια ποσότητα της ροής θα περάσει αναπόφευκτα, αυτή η ροή θεωρείται “χαμένη”.



Σχήμα 4-12: Μαγνητικό κύκλωμα για ρότορα με επιφανειακά τοποθετημένους μαγνήτες

Όταν έχουμε ρότορα με επιφανειακά τοποθετημένους μαγνήτες, όπως βλέπουμε στο σχήμα 4-12, οι μαγνήτες είναι περισσότερο εκτεθειμένοι στο μεταβατικό μαγνητικό πεδίο και υπάρχει και μεγαλύτερο ρίσκο απομαγνήτισης τους. Από την άλλη πλευρά όμως ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι το μαγνητικό κύκλωμα δεν έχει διαρροές όπως στους ενσωματωμένους μαγνήτες, οπότε δεν έχουμε χαμένη μαγνητική ροή.

Άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα της διάταξης αυτής αποτελούν, η απλότητα στην κατασκευή μίας και οι μαγνήτες συγκολλούνται στον πυρήνα του ρότορα χωρίς να χρειάζονται επιπλέον υλικά και σχεδίαση, οπότε αν έχουμε μαγνήτες στο μέγεθος και το σχήμα που χρειαζόμαστε η κατασκευή

του ρότορα έχει την πιο απλουστευμένη μορφή με χαμηλότερο κόστος κατασκευής. Το άλλο επίσης σημαντικό πλεονέκτημα είναι η μικρότερη μάζα του ρότορα με επιφανειακά τοποθετημένους μαγνήτες, γεγονός που αυξάνει την απόδοση και τη λειτουργικότητα της μηχανής μειώνοντας φαινόμενα όπως η μηχανική ροπή εκκίνησης.

Όποια μέθοδο και να χρησιμοποιηθεί πρέπει να υπάρχει συμμετρία στη μαγνητική ροή, οπότε και μαγνητικοί πόλοι πρέπει να τοποθετηθούν συμμετρικά στην περίμετρο του πυρήνα του ρότορα για να αποφευχθεί η δημιουργία ανισόρροπων μαγνητικών δυνάμεων.

4.4 Παρασιτικά φαινόμενα

- **Απώλειες πυρήνος**

Εξαιτίας της μόνιμης διέγερσης των μαγνητών, οι άνευ-φορτίου απώλειες πυρήνος αυξάνονται καθώς αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής, ενώ οι πλήρους φορτίου απώλειες πυρήνος στην περιοχή λειτουργίας της μηχανής είναι συνήθως 20-50% μεγαλύτερες. Ωστόσο, οι απώλειες πυρήνος που απορρέουν από το φορτίο εξαρτώνται από την τοπολογία της μηχανής, π.χ. σε μία γεννήτρια εσωτερικού ρότορα με επιφανειακά τοποθετημένους μαγνήτες θα έχουμε χαμηλές απώλειες πυρήνος σε πλήρες-φορτίο που μπορεί να είναι χαμηλότερες ακόμα και από τις άνευ-φορτίου απώλειες.

- **Απώλειες δινορευμάτων στις περιελίξεις του στάτη**

Οι απώλειες του χαλκού του τυλίγματος χωρίζεται στις ωμικές απώλειες, και τις απώλειες δινορευμάτων οι οποίες δημιουργούνται από το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο που διέρχεται από τους αγωγούς των περιελίξεων. Οι απώλειες δινορευμάτων μπορούν να προκαλέσουν αύξηση της θερμότητας στους μαγνήτες του ρότορα καθώς ο διασκορπισμός θερμότητας στο ρότορα είναι χαμηλός. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να προκαλέσει μη αναστρέψιμη απομαγνήτιση, ειδικά σε μαγνήτες νεοδυμίου (NdFeB) οι οποίοι έχουν σχετικά υψηλό συντελεστή θερμότητας

παραμένουσας μαγνήτισης. Οι απώλειες δινορευμάτων επηρεάζονται σημαντικά από τη μέγιστη πυκνότητα ρεύματος ή την ηλεκτρική φόρτιση και κυμαίνονται περίπου στο τετράγωνο της πυκνότητας ρεύματος και της ταχύτητας περιστροφής του ρότορα.

Όταν έχουμε περιελίξεις περιελιγμένες ανά κάθε μία οδόντωση οι απώλειες δινορευμάτων είναι σχεδόν διπλάσιες από τις περιελίξεις που είναι περιελιγμένες ανά κάποιο αριθμό οδοντώσεων. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούμε περιελίξεις διπλής στρώσης για να μειώσουμε τις απώλειες αυτές. Ένας άλλος τρόπος είναι να αυξήσουμε τον αριθμό των μαγνητικών πόλων, με αυτό τον τρόπο οι απώλειες δινορευμάτων μειώνονται αντιστρόφως ανάλογα με περίπου το τετράγωνο των μαγνητικών πόλων.

- **Οδοντωτή ροπή εκκίνησης (cogging torque) και θόρυβος**

Τα φαινόμενα της οδοντωτής ροπής και του θορύβου δημιουργούνται λόγω της αλληλεπίδρασης των μαγνητών στο ρότορα με τις οδοντώσεις στον στάτη, είναι ενυπάρχων χαρακτηριστικό των γεννητριών μονίμων μαγνητών λόγω της αυλακόμορφης κατασκευής του πυρήνα του στάτη. Κατά την είσοδο ενός μαγνητικού πόλου κάτω από την περιοχή της οδόντωσης, ο μαγνήτης σπρώχνει την οδόντωση προς μία κατεύθυνση, και ενώ φεύγει από την περιοχή της οδόντωσης την σπρώχνει προς την άλλη κατεύθυνση. Η επανάληψη της διαδικασίας αυτής δημιουργεί ανεπιθύμητες δονήσεις και θόρυβο.

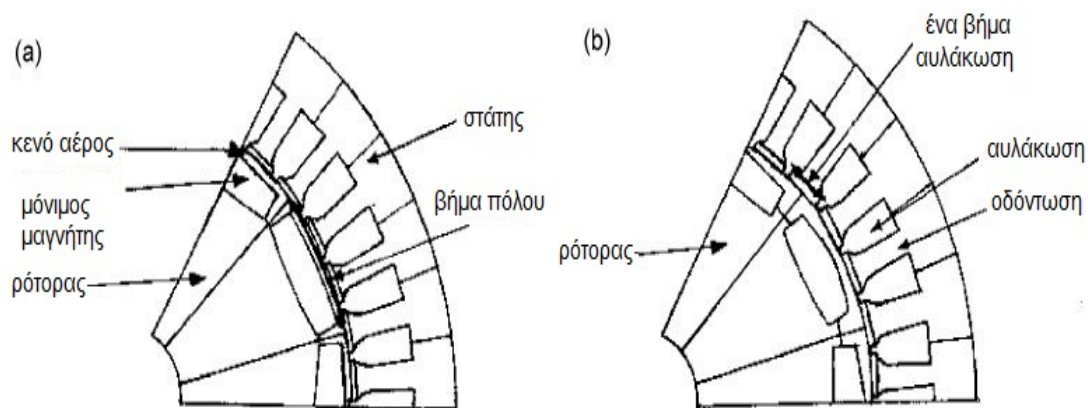
Είναι σημαντικό να μειώσουμε αυτά τα φαινόμενα στις γεννήτριες MM γιατί επηρεάζουν την εκκίνηση της γεννήτριας σε πολύ χαμηλές στροφές, όπως για παράδειγμα σε μία ανεμογεννήτρια. Όταν λοιπόν ο άξονας του ρότορα ξεκινάει να περιστρέφεται με πολύ χαμηλή ταχύτητα, η ροπή εκκίνησης πρέπει να είναι αρκετά χαμηλή ώστε η δύναμη περιστροφής του άξονα στο ρότορα να μπορεί να την υπερνικήσει. Διαφορετικά, με μεγάλη ροπή εκκίνησης, η γεννήτρια μπορεί να μη βγει ποτέ από την ακινησία και να μην ξεκινήσει.

- **Μέθοδοι μείωσης των φαινομένων Οδοντωτής ροπής και Θορύβου**

Παρακάτω θα εξετάσουμε κάποια χαρακτηριστικά στις γεννήτριες MM και τις επιπτώσεις που έχουν στα φαινόμενα που μας απασχολούν.

1. Ομοιόμορφο με ανομοιόμορφο κενό αέρος

Όπως αναφέρεται προηγουμένως, για να επιτευχθεί η λειτουργία της γεννήτριας σε χαμηλές περιστροφές χρειάζεται μεγάλο αριθμό πόλων για να έχουμε απόδοση. Με μεγάλο αριθμό πόλων όμως, το πλάτος της ενεργούς επιφάνειας του κάθε πόλου είναι μικρό, με αποτέλεσμα όταν η επιφάνεια αυτή του μαγνήτη να είναι επίπεδη, με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένα σχεδόν ομοιόμορφο κενό αέρος μεταξύ ρότορα και στάτη. Για να μειώσουμε όμως το φαινόμενο της οδοντωτής ροπής χρειαζόμαστε ανομοιόμορφο κενό αέρος. Για να επιτύχουμε αυτήν την ανομοιομορφία μπορούμε να επιλέξουμε μαγνήτες με τοξοειδής επιφάνεια, με αυτόν τον τρόπο, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4-12, δε υπάρχουν γωνίες στους μαγνήτες οι οποίες δημιουργούν μαγνητικές αιχμές κατά την αλληλεπίδρασή τους με τις οδοντώσεις του στάτη.

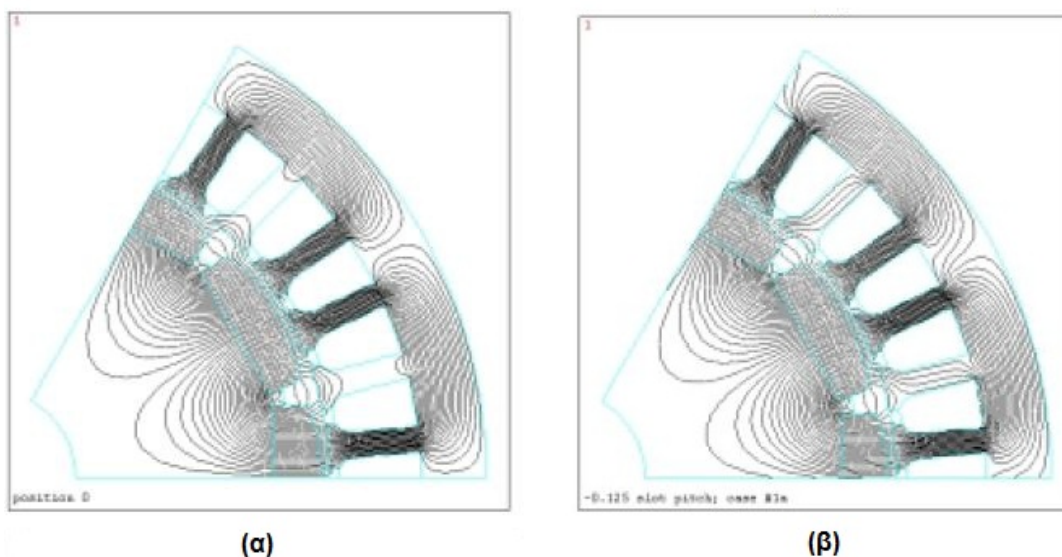


Σχήμα 4-13: (α) Μόνιμοι μαγνήτες (επίπεδοι) με ομοιόμορφο κενό αέρος (β) Μόνιμοι μαγνήτες (τοξοειδής μορφής) με ανομοιόμορφο κενό αέρος

2. Πλάτος πόλου με λόγο πολικού βήματος

Το φαινόμενο της οδοντωτής ροπής στις γεννήτριες MM διαφέρει όταν το πλάτος πόλου αλλάζει. Για ένα συγκεκριμένο όμως πλάτος η οδοντωτή ροπή κατά την εκκίνηση ελαχιστοποιείται, το πλάτος αυτό ονομάζεται βέλτιστο πλάτος και η συχνότητα της οδοντωτής ροπής διπλασιάζεται. Το βέλτιστο

πλάτος ορίζεται ότι πρέπει να ισούται με μιάμιση φορά το βήμα οδόντωσης ($W_{opt}=1.5 \times T_{pitch}$), όπου βήμα οδόντωσης είναι η απόσταση μεταξύ δύο συμμετρικών σημείων από δύο συνεχόμενες οδοντώσεις του στάτη. Όσο η τιμή του πλάτους απομακρύνεται από την βέλτιστη είτε προς τα πάνω είτε προς τα κάτω, η οδοντωτή ροπή αρχίζει να αυξάνεται αισθητά, με τη συχνότητά της να μικραίνει ανάλογα. Παρακάτω στο σχήμα 4-13 βλέπουμε τις μαγνητικές γραμμές για δύο διαφορετικές θέσεις του ρότορα, στη μία φαίνονται οι μαγνητικές γραμμές για την ελάχιστη οδοντωτή ροπή με συμμετρική κατανομή της μαγνητικής ροής, ενώ στη δεύτερη για μέγιστη οδοντωτή ροπή.



Σχήμα 4-14: Μαγνητικές γραμμές (α)ελάχιστη, και (β) μέγιστη οδοντωτή ροπή

3. Συνέπειες λοξότητας στον στάτη ή στον ρότορα

Λοξεύοντας τα ελάσματα στον στάτη ή τους μαγνητικούς πόλους του ρότορα σε μία γεννήτρια MM, επίσης επιτυγχάνεται η μείωση των φαινομένων της οδοντωτής ροπής και του θορύβου. Με τη κατάλληλη λόξευση είναι εφικτό ακόμα και να εξαλειφθούν τα φαινόμενα αυτά. Ωστόσο, η λόξευση αυξάνει την πολυπλοκότητα στην κατασκευαστική διαδικασία όπως και στο κόστος παραγωγής της μηχανής. Λοξεύοντας τον στάτη μπορεί να κάνει την τοποθέτηση των περιελίξεων περισσότερο πολύπλοκη, να μειώσει την ενεργό περιοχή της αυλακώσεως, δηλαδή τον χώρο που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για να τοποθετήσουμε τους αγωγούς, και να αυξήσει το

μήκος του αγωγού οπότε και την αντίσταση του στάτη. Από την άλλη, η λόξευση των μαγνητικών πόλων απαιτεί τον κατάλληλο σχεδιασμό και την μορφοποίηση τους γεγονός που αυξάνει το κατασκευαστικό κόστος τους. Συνήθως υλοποιείται η λόξευση κατά ένα βήμα αυλακώσεως για να επιτευχθεί ικανοποιητική μείωση της ροπής εκκινήσεως. Στην κατασκευή μας δεν χρησιμοποιούμε τη μέθοδο αυτή λόγω των σημαντικών μειονεκτημάτων, του κόστους και της πολυπλοκότητας κατασκευής.

4. Ελάχιστο κοινό πολλαπλάσιο (LCM) αριθμού μαγνητικών πόλων και αριθμού αυλακώσεων

Η τιμή αυτή είναι ο μικρότερος αριθμός πολλαπλάσιος του αριθμού των μαγνητικών πόλων και του αριθμού των αυλακώσεων. Αποτελεί μία ένδειξη για τον βαθμό της έντασης της ροπής εκκίνησης που αναμένεται. Επίσης αποτελεί κριτήριο για την επιλογή του συνδυασμού του αριθμού πόλων και αυλακώσεων. Επιλέγοντας έναν συνδυασμό με μεγάλο ελάχιστο κοινό πολλαπλάσιο σε γενικές γραμμές οδηγεί σε χαμηλή τιμή της ροπής εκκίνησης.

$$\text{LCM}(N_p, N_s)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

5.1 Εισαγωγή

Για την κατασκευή της γεννήτριας χρησιμοποιήσαμε τον κινητήρα από ένα παλιό πλυντήριο ρούχων. Από τον κινητήρα αυτό παραμένει μόνο ότι είναι απαραίτητο και εξυπηρετεί τον σκοπό της κατασκευής, οπότε οι περιελίξεις αφαιρέθηκαν από τον στάτη και από τον ρότορα αφαιρέθηκε το μεταλλικό τύμπανο με τους μαγνητικούς πόλους. Σαν πρώτη ύλη λοιπόν για να την κατασκευή μένει: ένας στάτης με πυρήνα μεταλλικών ελασμάτων και 48 αυλακώσεων στο σύνολο, ο άξονας περιστροφής πάνω στο οποίο θα προσαρμοστεί το μεταλλικό τύμπανο του ρότορα με τους μόνιμους μαγνήτες. Επίσης μένουν τα δύο ρουλεμάν τα οποία είναι σε καλή κατάσταση αλλά και τα καπάκια της μηχανής.

Η επεξεργασία των επιμέρους εξαρτημάτων της γεννήτριας πραγματοποιήθηκε χωρίς να χρησιμοποιηθούν εξειδικευμένα εργαλεία, εκτός δηλαδή από την περίπτωση του πυρήνα του στάτη όπου χρειάστηκε η κατεργασία να γίνει στον τόρνο, τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κυρίως: σέγα, λίμες, επιτραπέζιο δράπανο, ηλεκτρικός τροχός, ηλεκτροσυγκόλληση, βιδολόγος κ.α.

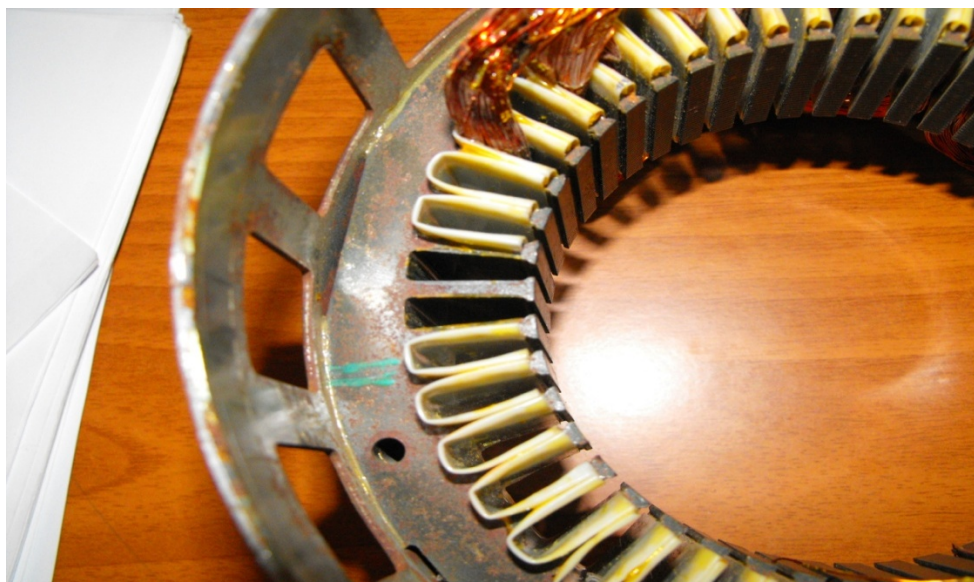
Λεπτομέρειες για τις διαστάσεις και την διαδικασία επεξεργασίας θα δούμε σε επιμέρους κεφάλαια παρακάτω.



Εικόνα 5-1: Στάτης και ρότορας από κινητήρα πλυντηρίου

5.2 Επεξεργασία του στάτη

Όπως αναφέραμε προηγουμένως οι ήδη υπάρχον περιελίξεις στον στάτη της μηχανής που χρησιμοποιήθηκε έπρεπε να αφαιρεθούν, χρειάζεται όμως προσοχή έτσι ώστε να μην πληγωθούν τα ελάσματα του στάτη και το μονωτικό υλικό που υπάρχει στις αυλακώσεις το οποίο και θα χρησιμοποιηθεί για να τοποθετηθούν οι περιελίξεις. Επειδή οι περιελίξεις της μηχανής ήταν περιελιγμένες και τοποθετημένες μέσα στο στάτη με τη χρήση αυτόματης περιελικτικής μηχανής ήταν αρκετά συμπαγής πράγμα που έκανε την διαδικασία αφαίρεσης περισσότερο δύσκολη. Ο αγωγός όμως σε αυτές τις περιπτώσεις είναι μη επαναχρησιμοποιήσιμος οπότε μπορεί να καταστραφεί.



Εικόνα 5-2: Ο στάτης της μηχανής με μερικούς αφαιρεμένες τις περιελίξεις

Στην εικόνα 5.2 φαίνεται ο στάτης από όπου έχει αφαιρεθεί ο μεγαλύτερος αριθμός των αρχικών περιελίξεων. Μπορούμε να δούμε πλέον καθαρά τις οδοντώσεις, το σχήμα τους και τις διαστάσεις τους. Από δύο αυλακώσεις έχει αφαιρεθεί και το άσπρο πλαστικό μονωτικό. Αυτό χρησιμοποιείται για να μην έρχονται σε επαφή οι αγωγοί των περιελίξεων με το μέταλλο του στάτη και να δημιουργηθεί βραχυκύκλωμα, όπως επίσης και για να κρατάει τα πηνία των περιελίξεων στη θέση τους. Έτσι μπορούμε να μετρήσουμε τις ακριβείς διαστάσεις των αυλακώσεων και την χρησιμοποιήσιμη περιοχή τους.

Πίνακας 5-1: Χαρακτηριστικά του στάτη

<u>Παράμετρος του στάτη</u>	<u>Μονάδες σε mm</u>
Αριθμός αυλακώσεων	48
Εξωτερική διάμετρος στάτη	166
Εσωτερική διάμετρος στάτη	100
Ύψος αυλακώσεως	33
Άνοιγμα αυλακώσεως	2
Βάθος αυλακώσεως	12
Εσωτερικό πλάτος αυλακώσεως	3,5
Εξωτερικό πλάτος αυλακώσεως	5
Αξονικό μήκος	50



Σχήμα 5-1: Αναπαράσταση μηχανής 48 αυλακώσεων, 20 πόλων

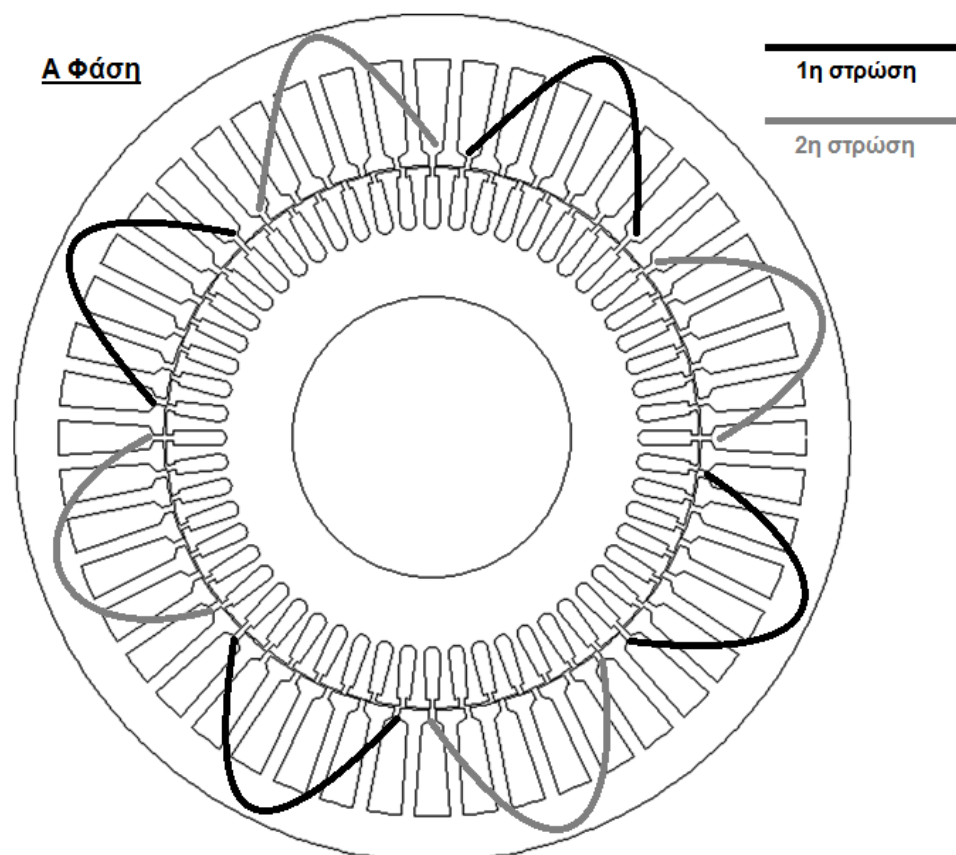
5.2.1 Το είδος και η τοπολογία των περιελίξεων

Η γεννήτρια είναι τριών φάσεων με βροχοειδής περιελίξεις. Η βροχοειδής περιελίξη είναι η πρώτη επιλογή καθώς προσφέρει περισσότερη ευελιξία στις επιλογές για να παραμετροποιηθεί η γεννήτριά. Επίσης άλλο ένα γεγονός που καθορίζει την επιλογή αυτή είναι η απλότητα κατασκευής καθώς

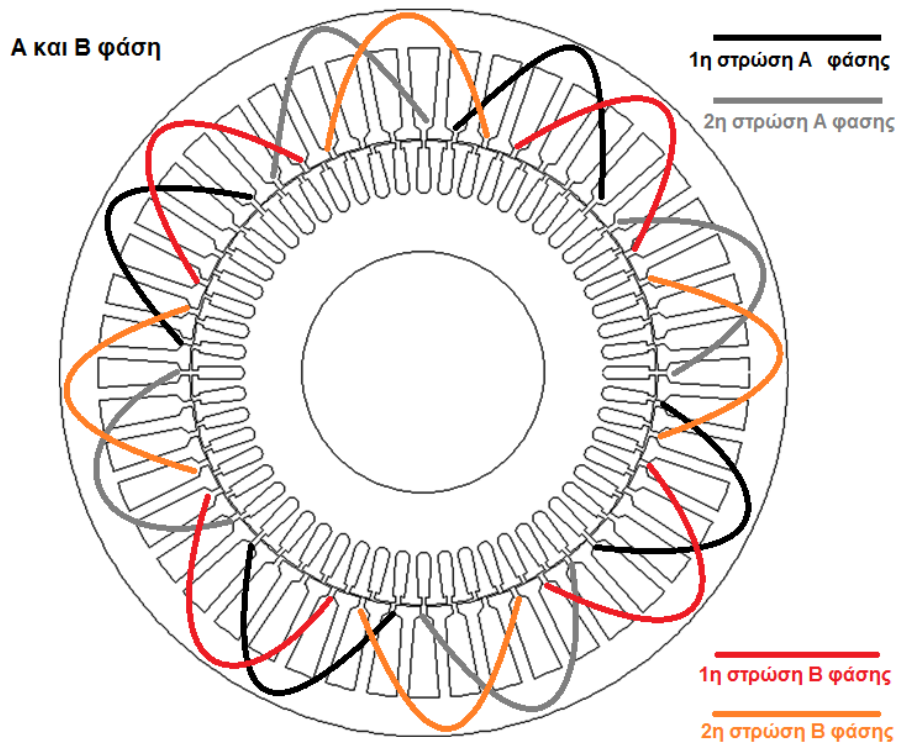
η περιέλιξη των πηνίων γίνεται στο χέρι με μία απλή αυτοσχέδια περιελικτική μηχανή.

Λόγω της κατασκευής του στάτη και του αναλογικά με το μέγεθος, μεγάλου αριθμού αυλακώσεων (48), οι περιελίξεις είναι κατανεμημένες, διπλής στρώσης. Στο κεφάλαιο 4 αναφέρονται αναλυτικά τα πλεονεκτήματα της τοπολογίας αυτής η οποία έχει πλέον σήμερα μεγάλη εφαρμογή σε τέτοιου είδους κατασκευές.

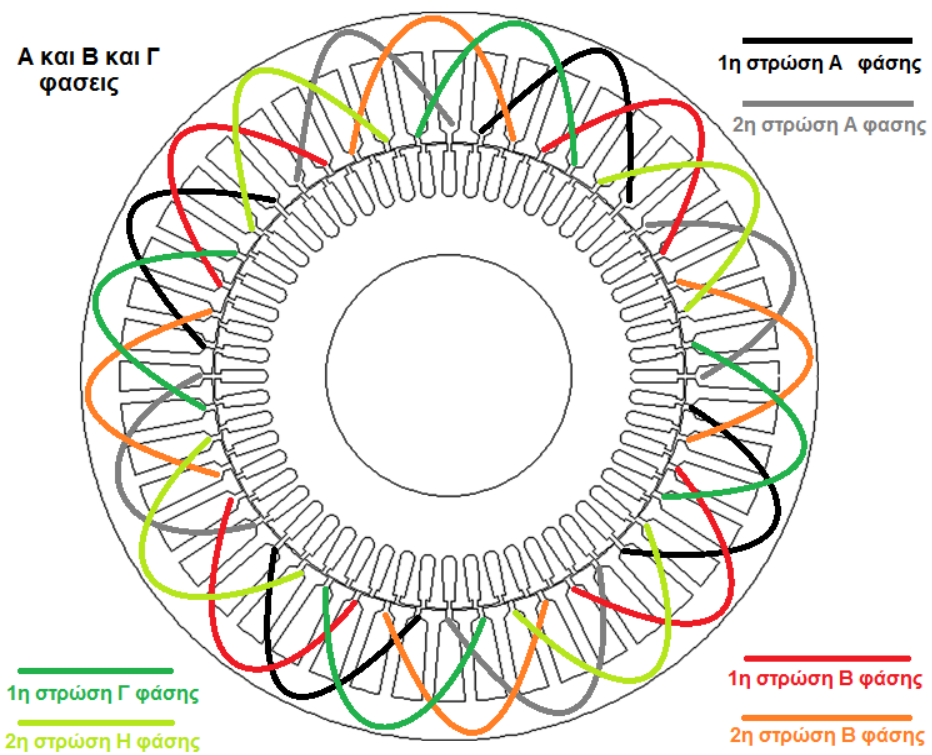
Για να προσαρμοστεί λοιπόν την παραπάνω τοπολογία στον στάτη χρειάζεται το κάθε πηνίο να περιελίσσεται ανά 6 αυλακώσεις. Οπότε για την κάθε φάση θα έχουμε: $48/6=8$ πηνία ανά φάση και για τις 2 στρώσεις, δηλαδή **24 πηνία** στο σύνολο για τρεις φάσεις διπλής στρώσης. Στο σχήμα 5-2 αναπαρίσταται η διάταξη των πηνίων στο στάτη, έτσι μπορεί να γίνει καλύτερα κατανοητή η κατανομή των πηνίων στο στάτη.



Σχήμα 5-2α: Φάση Α, διπλή στρώση



Σχήμα 5-2β: Φάσεις Α και Β, διπλή στρώση



Σχήμα 5-2γ: Φάσεις Α,Β και Γ, διπλής στρώσης

5.2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά περιελίξεων

1. Ο υπολογισμός του αριθμού των σπειρών

Το πόσο μεγάλο θα είναι το πηνίο, δηλαδή από πόσες σπείρες θα αποτελείται για να παράγει μια x ποσότητα ισχύος στην έξοδό του είναι η πιο συνηθισμένη ερώτηση στην κατασκευή μίας οποιασδήποτε μηχανής. Αυτό εξαρτάται από την σχεδίαση, το πόσο κοντά είναι τα πηνία στους μαγνήτες, πόσο δυνατοί είναι οι μαγνήτες, τι διατομής αγωγό χρησιμοποιούμε και πόσο γρήγορα τα πηνία κόβουν τις μαγνητικές γραμμές. Μία ερώτηση που είναι δύσκολο να απαντηθεί. Στην πραγματικότητα χρειάζεται και πειραματισμός για να καταλήξουμε στο καλύτερο αποτέλεσμα.

Για την θεωρητική προσέγγιση, αν και υπάρχουν διάφορα προγράμματα στο διαδίκτυο τα οποία επί πληρωμή και στέλνοντας τα απαραίτητα δεδομένα αναλαμβάνουν να δώσουν απαντήσεις. Ωστόσο επιλέχθηκε να επιστρατευτεί ο **νόμος του Faraday** για να γίνουν οι υπολογισμοί (ο τρόπος με τον οποίο θα το έκανε ο Tesla). Ωστόσο είναι δύσκολο να βρεθούν τα δεδομένα που χρειάζονται και ακόμα πιο δύσκολο να έχουμε ακριβής τιμές, μπορεί όμως να κατορθωθεί μία καλή θεωρητική προσέγγιση για το τι θα χρειαστεί.

Ο νόμος του Faraday:

$$V_p = -N(\Delta(BA)/\Delta t)$$

Αν μετατρέπει ο παραπάνω τύπο ώστε να χρησιμοποιηθεί για να προσδιοριστεί ο αριθμός των σπειρών που χρειάζονται. Το σύστημα που κατασκευάζεται πρέπει να φορτίζει μια μπαταρία 24V, οπότε υπολογίζεται ότι θα χρειαστεί περίπου 25V για τη δουλειά αυτή. Μετατρέπουμε αυτά τα 25V σε -25V (αρνητική τάση) για να συμβαδίσουμε με τον νόμο του Lenz.

Η παραπάνω εξίσωση γίνεται ως εξής:

$$N = -1(-V_p/\Delta(BA)/\Delta t) = V_p/((BxA)/t) \quad (1)$$

- Από τα παραπάνω γνωρίζουμε ότι η επιθυμητή τάση εξόδου είναι: **$V_p = 25$ Volts.**
- **B** είναι η πυκνότητα της μαγνητικής ροής των μαγνητών μας. Λόγω του

ότι κάθε στρώση πηνίων απέχει και διαφορετική απόσταση από τους μαγνητικούς πόλους είναι δύσκολο να υπάρξει κάποια συγκεκριμένη τιμή. Δίδεται όμως από τον κατασκευαστή μία μέση τιμή της μαγνητικής ροής σε θερμοκρασία περιβάλλοντος:

- **$B = 1.38 \text{ Tesla}$.**
- **A** είναι το εμβαδό του μαγνητικού πόλου για το οποίο είναι γνωστό ότι:
- **$A = 2,86 \times 10^{-3} \text{ m}^2$**
- **t** είναι ο χρόνος μίας πλήρους περιστροφής του άξονα του ρότορα. Υπολογίζεται ότι 6 στροφές ανά δευτερόλεπτο που δίνουν 360 στροφές ανά λεπτό (rpm), είναι μια αρκετά ικανοποιητική τιμή για να δημιουργηθεί η επιθυμητή έξοδο (24V) τότε, **$t = 1/6 = 0.166 \text{ sec}$.**

Αντικαθιστώντας λοιπόν τα δεδομένα στη εξίσωση (1):

$$N = 25 / ((1.38 \times 2,86 \times 10^{-3} \text{ m}^2) / 0.166) = 25 / (0.0039468 / 0.166) = 25 / 0.023776 \Rightarrow$$

$$\underline{N = 1051 \text{ σπείρες}}$$

Από την μαθηματική προσέγγιση έχουμε ότι χρειάζονται 1051 σπείρες στο σύνολο των πηνίων. Για το κάθε πηνίο έχουμε: $1051/24 = 43$ **σπείρες ανά πηνίο** περίπου.

2. Διατομή του αγωγού

Για να καθοριστεί το μέγεθος του αγωγού που θα χρησιμοποιηθεί συμβουλευτήκαμε εμπειρικούς πίνακες από άλλες παρόμοιες έρευνες και έγιναν δοκιμές πάνω στο σάτιη. Από τους εμπειρικούς πίνακες τους οποίους ανατρέξαμε, όπως αυτός του Hugh Piggot (How to build a wind turbine – Μάιος 2003), αναφέρονται σε αγωγό διατομής 1 mm^2 (#18 gauge wire) για περιελίξεις 24V. Έναν αγωγό τέτοιας διατομής είναι και ο μεγαλύτερος σε μέγεθος ο οποίος μπορεί χρησιμοποιηθεί για να κατασκευαστούν οι περιελίξεις με μία σχετική άνεση στο χέρι.

Πίνακας 5-2: Χαρακτηριστικά αγωγού

AWG Gauge	Διατομή σε mm ²	Ohms ανά km	Μέγιστο ρεύμα για μετάδοση ενέργειας (A)	Βάρος Kg/Km
18	1.023	20.9428	8.3	7.32

3. Αριθμός αυλακώσεων/πόλο/φάση, συντελεστής τυλίγματος, αριθμός συμμετριών τυλίγματος, ΕΚΠ αριθμού πόλων με αριθμό αυλακώσεων

Για να προσδιοριστούν τα παραπάνω μεγέθη στο συνδυασμό πόλων-αυλακώσεων, δηλαδή 48 αυλακώσεις με 20 πόλους, χρησιμοποιήθηκε ένα εργαλείο που υπάρχει στο διαδίκτυο. Το emetor.com είναι ένα πρόγραμμα του οποίου η βασική χρήση υπάρχει ελεύθερη στο διαδίκτυο. Είναι ένα εργαλείο με διάφορες επιλογές που μπορεί να βοηθήσει στην σχεδίαση και την προσομοίωση της κατασκευής μίας σύγχρονης μηχανής.

Χρησιμοποιήθηκε ως αναφορά για τις παρακάτω παραμέτρους:



Εικόνα 5-3α: Αριθμός αυλακώσεων/πόλο/φάση

Μέγιστος θεμελιώδης συντελεστής τυλίγματος

Αριθμός μαγνητικών πόλων

	14	16	18	20	22	24	26
39	0.511	0.574	■	0.689	0.740	■	0.866
42	1.000	0.538	■	0.650	0.701	■	0.790
45	0.950	0.506	■	0.617	0.663	0.711	0.753
48	0.937	1.000	■	0.588	0.631	■	0.720
51	0.944	0.951	■	0.552	0.599	■	0.686
54	0.954	0.941	1.000	0.525	0.571	0.617	0.656
57	0.955	0.937	■	0.500	0.544	■	0.627

Αριθμός Αυλακώσεων

Εικόνα 5-3β: Μέγιστος θεμελιώδης συντελεστής τυλίγματος

- Στην εικόνα 5-3α παρατηρείται ότι ο αριθμός **αυλακώσεων/πόλο/φάση** για το συνδυασμό 48 αυλακώσεων-20πόλων είναι **0.8**. Ο αριθμός αυτός προσδιορίζει την τοπολογία των περιελίξεων. Οπότε, όπως είδαμε προηγουμένως, ο συνδυασμός αυτός είναι κατάλληλος για κατανομημένες περιελίξεις που θα κατασκευαστούν στο παρόν πείραμά. Όπως φαίνεται στην εικόνα 5-3(α και β), με κόκκινο απεικονίζεται ο συνδυασμός για ακέραια περιέλιξη, με πορτοκαλί ο συνδυασμός για κλασματική περιέλιξη, με πράσινο ο συνδυασμός για συγκεντρωτική ή κατανομημένη περιέλιξη, ενώ με μαύρο η ασύμμετρη περιέλιξη.
- Στην εικόνα 5-3β φαίνεται τον **συντελεστή τυλίγματος** για τον συνδυασμό 48 αυλακώσεων, 20 πόλοι, ότι ισούται με **0.588**. Αυτό δείχνει μια αναλογία της ροπής της γεννήτριας, η οποία είναι σε αρκετά ικανοποιητικά επίπεδα για την χρησιμοποιούμενη τοπολογία περιέλιξης.
- Για τον **αριθμό συμμετριών του τυλίγματος** είναι γνωστό ότι ισούται με: $GCD(Q_s, p/2)$. Όπου $Q_s=48$ και $p=20$, οπότε:
 $GCD(48, 20/10) = 2$. Εφόσον λοιπόν ο αριθμός αυτός δεν ισούται με 1, δεν υπάρχει φόβος ανισόρροπων μαγνητικών δυνάμεων στη γεννήτρια.
- Το ελάχιστο κοινό πολλαπλάσιο του αριθμού των πόλων με τον αριθμό των αυλακώσεων είναι μία ένδειξη της ροπής εκκίνησης που αναμένεται.

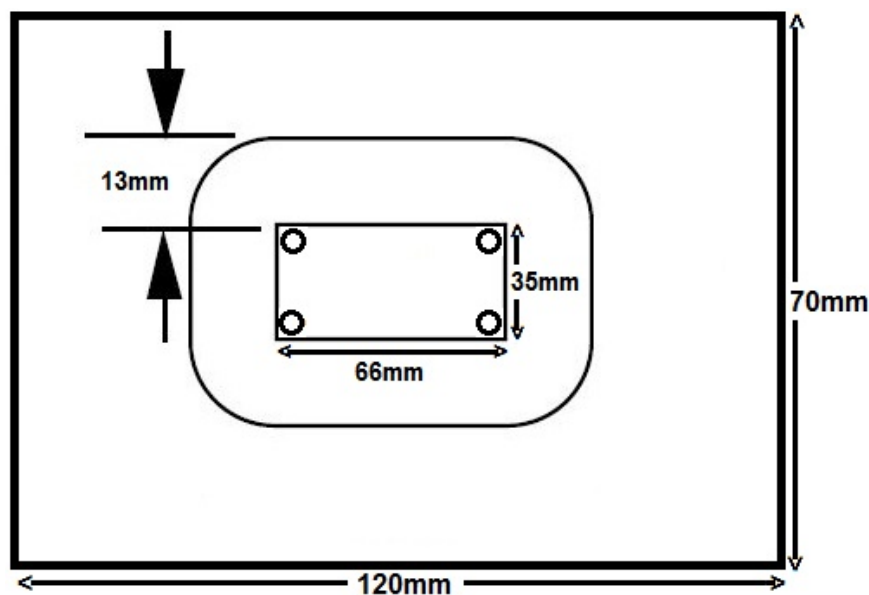
Στην περίπτωση αυτή είναι:

$LCM(Q_s,p) = LCM(48,20) = 240$. Το αποτέλεσμα είναι αρκετά μεγάλο, οπότε και αναμένονται μικρά επίπεδα ροπής εκκίνησης.

5.2.3 Κατασκευή των περιελίξεων

Η κατασκευή περιελίξεων στο χέρι αν και δεν είναι ιδιαίτερα δύσκολη διαδικασία απαιτεί πείρα για να γίνει σωστά. Για τον λόγο αυτό χρειάζεται πρώτα από όλα η κατάλληλη κατασκευή στην οποία πάνω θα γίνει η περιέλιξη. Λόγω του μικρού αριθμού των σπειρών ανά πηνίο δεν χρειάζεται κάτι το εξειδικευμένο, μία απλή κατασκευή στις σωστές διαστάσεις είναι αρκετή.

Τα πηνία, για διευκόλυνση στην κατασκευή τους, αλλά και στην τοποθέτησή τους στον στάτη έχουν σχήμα περίπου ορθογωνίου παραλληλογράμμου, έτσι χρησιμοποιώντας 2 λεπτά φύλλα αλουμινίου και τέσσερις βίδες διαμέτρου 7mm φτιάχτηκε μία απλή κατασκευή για να περιελιχτούν τα πηνία. Οι διαστάσεις της περιελικτικής αυτής κατασκευής, όπως φαίνονται και στο σχήμα 5-3, είναι επιλεγμένες ώστε να ταιριάζουν στις διαστάσεις του στάτη με μία επιπρόσθετη ανοχή για να μπορούν να επεξεργαστούν ευκολότερα.



Σχήμα 5-3: Μεταλλική κατασκευή περιέλιξης

Για να είναι βέβαιο ότι θα μπορέσουν να χωρέσουν 24 πηνία, με 40 σπείρες ανά πηνίο και με αγωγό διατομής 1mm^2 μέσα στις αυλακώσεις του στάτη, χρειάστηκε να κατασκευαστούν μερικά πρόχειρα δοκιμαστικά πηνία για το λόγω αυτό. Οι αρκετές δοκιμές που έγιναν βοήθησαν στο να περιελιχθούν τα πηνία σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο. Μετά από τις δοκιμές και τις επαληθεύσεις είναι πλέον δυνατόν να κατασκευαστούν οι τελικές περιελίξεις.

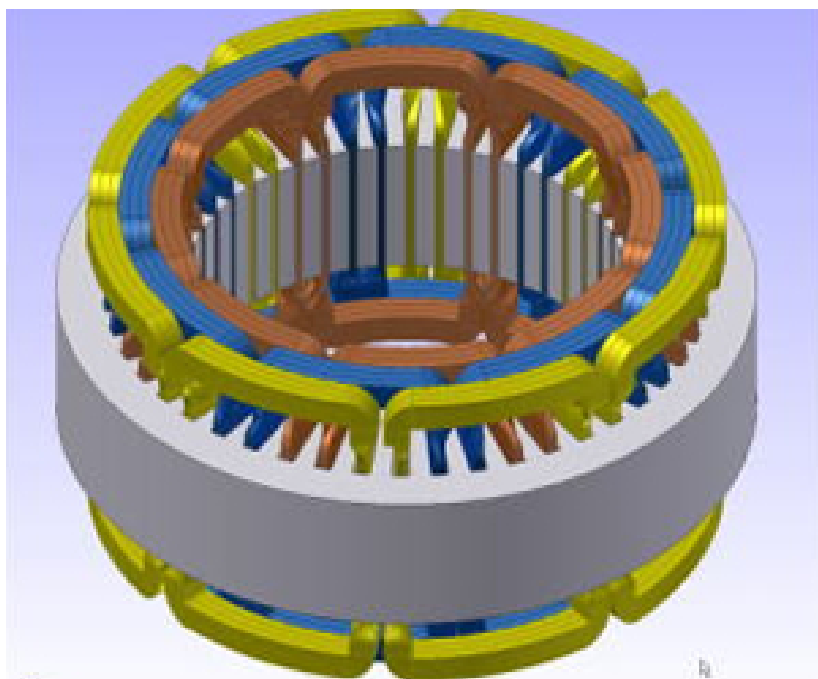
Οι αγωγοί κάθε πηνίου περιελίχθηκαν ανά στρώσεις, η πρώτη στρώση από αριστερά προς τα δεξιά, η επόμενη πάνω από την προηγούμενη και από δεξιά προς τα αριστερά και ούτω καθεξής. Όλα τα πηνία είναι απαραίτητο να περιελιχθούν με την ίδια φορά για να υπάρχει συνέχεια της ηλεκτρικής ροής, διαφορετικά θα παρουσιαστούν βραχυκυκλώματα και η γεννήτρια μπορεί να μη λειτουργήσει. Η δομημένη αυτή περιέλιξη έγινε χειροποίητα στα πλαίσια του εφικτού.

Όταν τελειώνει η περιέλιξη ενός πηνίου τοποθετήθηκε ταινία στα άκρα του για να κρατάει τις περιελίξεις στη θέση τους και μετά έγινε η εισαγωγή μέσα στον στάτη. Στο σημείο αυτό ήταν αρκετά δύσκολο να κρατηθεί η δομημένη περιέλιξη καθώς το άνοιγμα των οδοντώσεων είναι μόλις 2mm. Η δομημένη περιέλιξη είναι αρκετά δύσκολο αν όχι αδύνατο να κατασκευαστεί χειροποίητα σε ένα τέτοιο στάτη, όμως αυτό μπορεί να μη ληφθεί ιδιαίτερα υπόψη καθώς έχει ελάχιστη επίδραση στη απόδοση της γεννήτριας. Επίσης απαιτείται μεγάλη προσοχή όταν εισάγονται οι αγωγοί μέσα από τα ανοίγματα των οδοντώσεων, και δεδομένου ότι οι οδοντώσεις είναι μεταλλικές, μπορούν να φθείρουν την μόνωση του αγωγού, ή ακόμη και να προκαλέσουν βραχυκύκλωμα μεταξύ σπειρών.

Περιλίχθηκαν λοιπόν πρώτα τα πηνία της πρώτης στρώσης της Α φάσης και εισήχθησαν στον στάτη και μετά τα πηνία της δεύτερης στρώσης της Α φάσης. Αφέθηκε αρκετός σε μήκος αγωγός στην αρχή και στο τέλος κάθε φάσης για να ενωθούν στο τέλος μεταξύ τους με τη κατάλληλη συνδεσμολογία. Το ξεκίνημα της πρώτης στρώσης της Β φάσης έγινε με 120 ηλεκτρικές μοίρες διαφορά σε σχέση με αυτό της πρώτης για να δημιουργηθεί η τριφασική τάση. Αυτό σημαίνει πρακτικά το πρώτο πηνίο της πρώτης στρώσης της Β φάσης ξεκινάει από την επόμενη αυλάκωση από ότι το αντίστοιχο πηνίο της Α φάσης. Με άλλα λόγια η Β φάση είναι μετατοπισμένη κατά ένα βήμα αυλάκωσης σε σχέση με την Α, άρα παρομοίως και η Γ φάση

σε σχέση με τη Β. Στο σημείο αυτό, αφού δηλαδή έχουν περιελιχθεί όλα τα πηνία και τα έχουν εισαχθεί στον στάτη, τοποθετείται στη θέση του και το μονωτικό της κάθε αυλάκωσης που καλύπτει της περιελίξεις. Τα μακρόστενα αυτά κομμάτια πλαστικού, προστατεύουν τις περιελίξεις από τυχόν βραχυκυκλώματα με τις οδοντώσεις του στάτη, όπως επίσης και τις συγκρατούν στην θέση τους, δηλαδή δεν αφήνουν τους αγωγούς να φύγουν από την περιοχή της αυλάκωσης.

Το μήκος του αγωγού που χρησιμοποιήθηκε για τις περιελίξεις είναι κατά μέσο όρο 24cm αγωγού ανά σπείρα, αυτό μας κάνει 9.6m για κάθε πηνίο και περίπου 240m αγωγού για το σύνολο των περιελίξεων. Στην εικόνα 5-4, απεικονίζεται ένας περιελιγμένος στάτης με 48 αυλακώσεις, τριφασικές περιελίξεις διπλής στρώσης με 8 πηνία ανά φάση, 4 ανά στρώση, όπως ακριβώς είναι περιελιγμένος ο στάτης του πειράματος. Κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε μία φάση, κίτρινο για την Α, μπλε για την Β και χάλκινο για την Γ.



Εικόνα 5-4: Στάτης με τριφασικές περιελίξεις διπλής στρώσης

Η συνδεσμολογία που επιλέχθηκε ήταν αυτή του αστέρα (Υ) επειδή ευνοεί την ανάπτυξη μεγαλύτερης τάσης σε χαμηλές περιστροφές και μπορεί χρησιμοποιηθεί και ο ουδέτερος αν χρειαστεί. Είναι σημαντικό να ξεπεραστεί η τάση των 24V σε όσο πιο χαμηλές περιστροφές του άξονα του στάτη

γίνεται.

5.3 Επεξεργασία του ρότορα

Από τον αρχικό ρότορα αφαιρέθηκαν πρώτα με τη χρήση εξολκέα τα ρουλεμάν που υπάρχουν στις 2 άκρες και χρησιμεύουν για την περιστροφή του άξονα του ρότορα. Στην συνέχεια με τη χρήση πρέσας αφαιρέθηκε και το τύμπανο του ρότορα με τους μαγνητικούς πόλους. Αυτό που έμεινε δηλαδή είναι μοναχά ο άξονας περιστροφής στον οποίο θα τοποθετήθηκαν πρώτα το τύμπανο και μετά οι μαγνήτες .



Εικόνα 5-5: Ο άξονας περιστροφής του ρότορα

5.3.1 Επιλογή των μονίμων μαγνητών

Οι μαγνήτες σπάνιας γης όπως ονομάζονται είναι το πιο δαπανηρό τμήμα της κατασκευής. Για το λόγο αυτό χρειάζεται αρκετή προσοχή και ακριβής μελέτη πριν την αγορά τους. Είναι γνωστό ότι χρειάζεται μεγάλος Αριθμός μαγνητικών πόλων για να επιτευχθεί η λειτουργία της γεννήτριας σε χαμηλές στροφές. Χρειάζεται όμως επίσης να υπάρχουν και οι ιδανικές διαστάσεις, το κατάλληλο πλάτος, ύψος και πάχος των μαγνητών για να υπάρχει αρκετή ένταση της μαγνητικής ροής και να επιτευχθεί η επιθυμητή απόδοση.

Σε μία σύγχρονη γεννήτρια είναι γνωστό ότι ισχύει:

$$n=120f/p$$

όπου p είναι ο αριθμός των πόλων της γεννήτριας και f η συχνότητα του στάτη. Για να είναι η συχνότητα της τάξης των **50Hz** για $n_{nom}=330$ rpm έχουμε:

$$p=120f/n_{nom} \Rightarrow p=18.18$$

Όμως ο αριθμός των πόλων πρέπει να είναι πολλαπλάσιο του τέσσερα, οπότε επιλέγεται αριθμός των πόλων: **$p=20$**

Άρα, 20 μαγνητικοί πόλοι σε σχήμα κυρτό ώστε να σχηματίζουν ένα δακτυλίδι (κυκλική διάταξη) όπως φαίνεται στην εικόνα 5-4. Η πολικότητά τους είναι **10 S** (νότιος πόλος) και **10 N** (βόρειος πόλος) έτσι ώστε να τοποθετηθούν πάνω στον ρότορα διαδοχικά νότιος με βόρειο πόλο και να σχηματίσουν ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Η εξωτερική επιφάνεια των μαγνητών έχει κυρτό σχήμα για να αποφευχθούν οι αιχμές που δημιουργούνται κατά την είσοδο και έξοδο ενός μαγνήτη στην περιοχή μίας οδόντωσης. Εδώ να σημειώσουμε ότι λόγω του ότι οι μαγνήτες νεοδυμίου είναι αρκετά εύθραυστοι, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά την επεξεργασία τους, ένα ατύχημα μπορεί να προκαλέσει την καταστροφή τους. Για να αποφευχθούν λοιπόν οι ελλείψεις σε περίπτωση απώλειας είναι σωστή η προμήθεια 2 περισσοτέρων εφεδρικών πόλων, ενός N και ενός S.



Εικόνα 5-6: 18 Κυρτοί μαγνήτες που δημιουργούν ένα δακτυλίδι

Πίνακας 5-3: Ιδιότητες και διαστάσεις μαγνητικών πόλων:

Υλικό πόλων	NdFeb
Βαθμονόμηση	N48
Αριθμός πόλων	20
Σχήμα διάταξης πόλων	Κυκλική
Εξωτερική διάμετρος	86mm
Εσωτερική διάμετρος	76mm
Σχήμα πόλου (1 τεμ.)	Κυρτό
Ύψος πόλου	30mm
Πλάτος πόλου	16mm
Πάχος πόλου	10mm

Πίνακας 5-4: Χαρακτηριστικά N48 μαγνητικής βαθμονόμησης

Βαθμονόμηση	Br		Hcb (Hc)		Hcj (Hci)		BH(max)	
	mT	G	kA/m	Oe	kA/m	mT	G	kA/m
N48	1,380	13.800	923	11.600	955	12,00	366	46

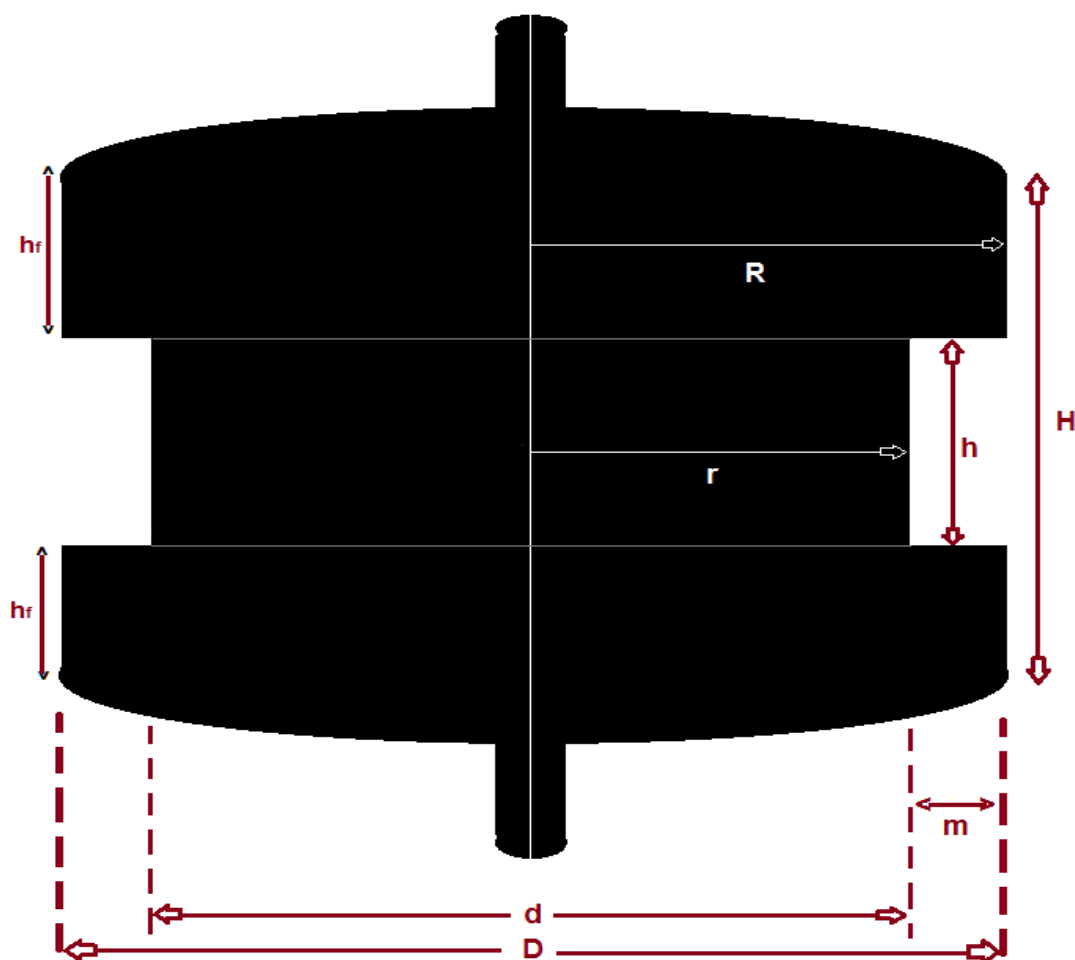
5.3.2 Σχεδίαση και κατασκευή του ρότορα

Το μεταλλικό τύμπανο του ρότορα κατασκευάστηκε από ένα κράμα μαλακού χάλυβα. Βασικό χαρακτηριστικό του μαλακού χάλυβα είναι η αυξημένη αντοχή του και ταυτόχρονα η ολκιμότητά του, δηλαδή η ιδιότητά του να είναι μαλακός και εύπλαστος ώστε να είναι εύκολη η μηχανική του κατεργασία. Έχει πολύ μικρό συντελεστή διαστολής και μεγάλη αντοχή στις εναλλαγές της θερμοκρασίας χωρίς να επηρεάζονται τα χαρακτηριστικά του. Επίσης λόγω της χαμηλής του περιεκτικότητας σε άνθρακα και πυρίτιο οι μαγνητικές του ιδιότητες παραμένουν σε αρκετά ικανοποιητικά επίπεδα. Η μαγνητική ροή διαρρέει το χάλυβα καλύτερα, έτσι ενισχύεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου. Επίσης προστατεύονται οι μαγνήτες από την πιθανότητα απομαγνήτισης καθώς ο παραμένων μαγνητισμός στον χάλυβα, στην

περίπτωση που η γεννήτρια βρεθεί εκτός φορτίου, μειώνει σημαντικά την πιθανότητα αυτή.

Σαν πρώτη ύλη χρησιμοποιήθηκε ένα κυλινδρικό κομμάτι χάλυβα με διάμετρο 100mm και ύψος 50mm. Η επεξεργασία του έγινε με τη χρήση τόννου και σύμφωνα με το σχέδιο που απεικονίζεται στο σχήμα 5-4. Μειώθηκε η διάμετρό του και χαραχτήκε ένα αυλάκι στη μέση όπου αργότερα θα τοποθετηθούν οι μαγνήτες μας. Ο χώρος που καταλαμβάνει η κόλλα θεωρήθηκε αμελητέος μίας και είναι πολύ μικρότερος από 1mm, κατασκευαστικά υπάρχει η ανοχή να μην τον υπολογιστεί στη σχεδίαση του μεταλλικού τυμπάνου. Αφού διαμορφώθηκε η διάμετρος και το αυλάκι, για να τοποθετηθούν ο άξονας περιστροφής του ρότορα, κεντραρίστηκε ο μεταλλικός πυρήνας και δημιουργήθηκε μία τρύπα διαμέτρου 20mm.

Παρακάτω το σχέδιο σύμφωνα με το οποίο μορφοποιήθηκε ο πυρήνας του ρότορα:



Σχήμα 5-4: Σχέδιο διαμόρφωσης πυρήνα του ρότορα

Πίνακας 5-5: Διαστάσεις μεταλλικού πυρήνα του ρότορα:

<u>Μέγεθος</u>	<u>Τιμή σε mm</u>
Ακτίνα πυρήνα - R	47
Ακτίνα αυλακώσεως - r	43
Ύψος πυρήνα - H	50
Ύψος αυλακώσεως - h	32
Διάμετρος πυρήνα - D	94
Διάμετρος αυλακώσεως - d	86
Περιοχή εκτός αυλάκωσης - h_f	9
Βάθος αυλάκωσης - m	4



Εικόνα 5-7: Ο μεταλλικό πυρήνας του στάτη μετά την κατεργασία και πριν τον τελευταίο καθαρισμό του

Μετά την κατεργασία και την μορφοποίηση του πυρήνα σειρά έχει η εισαγωγή του άξονα περιστροφής. Χρησιμοποιήθηκε ξανά μια πρέσα για να περαστεί ο άξονα; από το άνοιγμα του πυρήνα, αφού προσαρμόστηκε στην επιθυμητή θέση, με τη βοήθεια ηλεκτρικής συγκόλλησης τον ασφαλίστηκε στη

θέση αυτή. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν και τα ρουλεμάν στη θέση τους και το μόνο που απόμεινε πλέον για τον ρότορα είναι οι μαγνήτες.

Όπως είναι προφανές, οι μαγνητικοί πόλοι είναι επιφανειακά στηριγμένοι στον πυρήνα του ρότορα. Χρειάζεται να τοποθετηθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι σίγουρο ότι κατά τη διάρκεια της περιστροφής, και ιδιαίτερα σε υψηλές στροφές, δε θα φύγουν από θέση τους. Τον σκοπό αυτό εξυπηρετεί και το αυλάκι που δημιουργήθηκε στον μεταλλικό πυρήνα, οι μαγνήτες θα φωλιάσουν στο αυλάκι αυτό και θα υπάρχει περισσότερη επιφάνεια για να συγκολληθούν απάνω.

Για την συγκόλληση χρησιμοποιήθηκε μια πολύ ισχυρή εποξική κόλλα δύο συστατικών, ειδική για συγκολλήσεις μετάλλων. Η κόλλα αυτή αποτελεί την εναλλακτική λύση στα σημεία που δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί οξυγονοκόλληση. Αντέχει σε θερμοκρασίες λειτουργίας μέχρι 150° C και συγκολλά ή σφραγίζει σχεδόν όλα τα μέταλλα και τα κράματα μετάλλων μεταξύ τους. Στεγνώνει πλήρως μετά από 10 λεπτά ενώ μετά από 16 ώρες έχει αντοχή μεγαλύτερη από 4000 PSI και μπορεί να τρυπηθεί, κτυπηθεί, γυαλοχαρτιστεί ή ακόμα και να συγκολληθεί περαιτέρω.

Η διαδικασία της συγκόλλησης έγινε αργά και προσεκτικά αφενός γιατί έπρεπε με σιγουριά οι μαγνητικοί πόλοι να τοποθετηθούν αλληλοδιαδοχικά S με N, και αφετέρου γιατί η κόλλα έχει πολύ μικρό χρόνο κατεργασίας. Στην πραγματικότητα ο χρόνος αυτός είναι 6-7 λεπτά, οπότε χρειάζεται να παρασκευάζεται μικρή ποσότητα μείγματος τακτικά για να μπορεί να γίνει η κατεργασία με μια σχετική ευχέρεια. Οι μαγνητικοί πόλοι συγκολλήθηκαν ένας προς έναν πάνω στον πυρήνα, για να κατανεμηθούν με ομοιογένεια γύρω από τον πυρήνα του ρότορα και για να αποφευχθεί η δημιουργία ανισόροπων μαγνητικών δυνάμεων, προστέθηκε ανάμεσα από του πόλους ένα λεπτό φύλλο αλουμινίου πάχους 1mm, ύψους 32mm και πλάτους 10mm. Το λεπτό αυτό φύλλο αλουμινίου είναι αρκετά μαλακό και εύκαμπτο για να αποφευχθούν τυχόν τραυματισμοί των μαγνητών, αλλά και ιδιαίτερα ανθεκτικό στη διάβρωση.

Αφού τελείωσε και η διαδικασία της συγκόλλησης, ο ρότορας αφέθηκε για 24 ώρες ώστε να ομογενοποιηθεί τελείως το μείγμα. Στη φάση αυτή η διάμετρος της μαγνητικής διάταξης έχει διαμορφωθεί ως εξής:

- **Εξωτερική διάμετρος μαγνητών ρότορα : 96mm**

➤ **Εσωτερική διάμετρος μαγνητών ρότορα: 86mm**

Ο ρότορα έχει σχεδιαστεί με τις διαστάσεις αυτές πρώτον, για να δημιουργηθεί το επιθυμητό κενό αέρος **2mm**, και δεύτερον για να δημιουργηθεί το πάχος των μαγνητών ως εξής:

$$T_m = R_{in}/R_{out} = 86\text{mm}/96\text{mm} = \mathbf{0.896}$$

Οπότε το πάχος των μαγνητών είναι πάρα πολύ κοντά στο ιδανικό πάχος των μαγνητων, $T_{m,opt} = \mathbf{0.9}$.

• **Συναρμολόγηση της γεννήτριας**

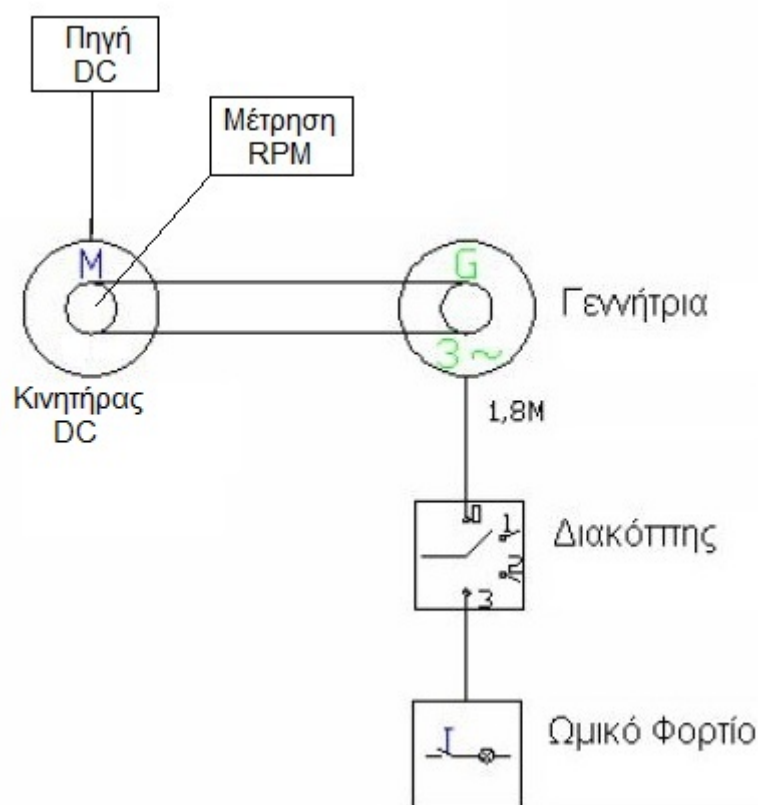
Στο τελικό στάδιο συναρμολογήθηκε η γεννήτρια του πειράματος. Η διαδικασία είναι απλή, τοποθετήθηκε ο ρότορας μέσα στο στάτη, στη συνέχεια τοποθετήθηκαν τα καπάκια της μηχανής και βιδώθηκαν οι βίδες. Σε πρώτο στάδιο για να κρατηθεί ο στάτης σε σταθερή θέση τον δέθηκε σε μία μέγγενη, επειδή οι ελκτικές δυνάμεις μεταξύ ρότορα και στάτη είναι αρκετά μεγάλες, ρότορας τοποθετήθηκε μέσα στον στάτη με ιδιαίτερη προσοχή και αργές κινήσεις για να μην προκληθούν φθορές στους μαγνήτες με τις οδοντώσεις του στάτη. Έπειτα προστέθηκαν τα καπάκια και αφού θηλύκωσαν μέσα τους τα ρουλεμάν, βιδώθηκαν οι βίδες που σταθεροποιούν την γεννήτρια. Ελέγχτηκε το κενό αέρος περιμετρικά ότι έχει 2mm πλάτος. Περιστράφηκε ο άξονα του ρότορα χειροκίνητα και αφού έγινε σίγουρο ότι δεν υπάρχει κάποιο κατασκευαστικό πρόβλημα, όπως τζόγος ή τριβή μεταξύ εξαρτημάτων, η γεννήτρια είναι έτοιμη προς δοκιμή.

5.4 Πειραματικές μετρήσεις

Μετά την κατασκευή της γεννήτριας, κρίθηκε σκόπιμη η μέτρηση της εργαστηριακά. Η γεννήτρια ακτινικής ροής συνδέθηκε με έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος τοποθετώντας μία ένωση στους άξονες των δύο μηχανών, σχήμα 5-5. Η έξοδος της γεννήτριας οδηγείται μέσω ενός διακόπτη στο ωμικό φορτίο. Επιλέχθηκε ο DC κινητήρας χάρη στην ευκολία μεταβολής

της ταχύτητας περιστροφής του μέσω της τάσης του τυμπάνου του. Ο DC κινητήρας είναι ξένης διέγερσης και ονομαστικής ισχύος 1.8kW.

Η ταχύτητα περιστροφής μετρήθηκε με στροφόμετρο στον άξονα περιστροφής. Αναλογικά βολτόμετρα και αμπερόμετρα χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση των τάσεων και των ρευμάτων του τυμπάνου της γεννήτριας.



Σχήμα 5-5: Μονογραμμικό σχέδιο μετρικής διάταξης

Το ωμικό φορτίο αποτελείται από δύο μεγάλες κεραμικές αντιστάσεις κλεισμένες σε τούβλα για να αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες. Η ονομαστική ισχύς τους είναι 1kW και η τάση λειτουργίας τους ως 24V. Οι αντιστάσεις συνδέθηκαν σε σειρά έτσι είναι δυνατή η μέτρηση ως 48 Volts.

5.4.1 Αποτελέσματα μετρήσεων και γραφήματα

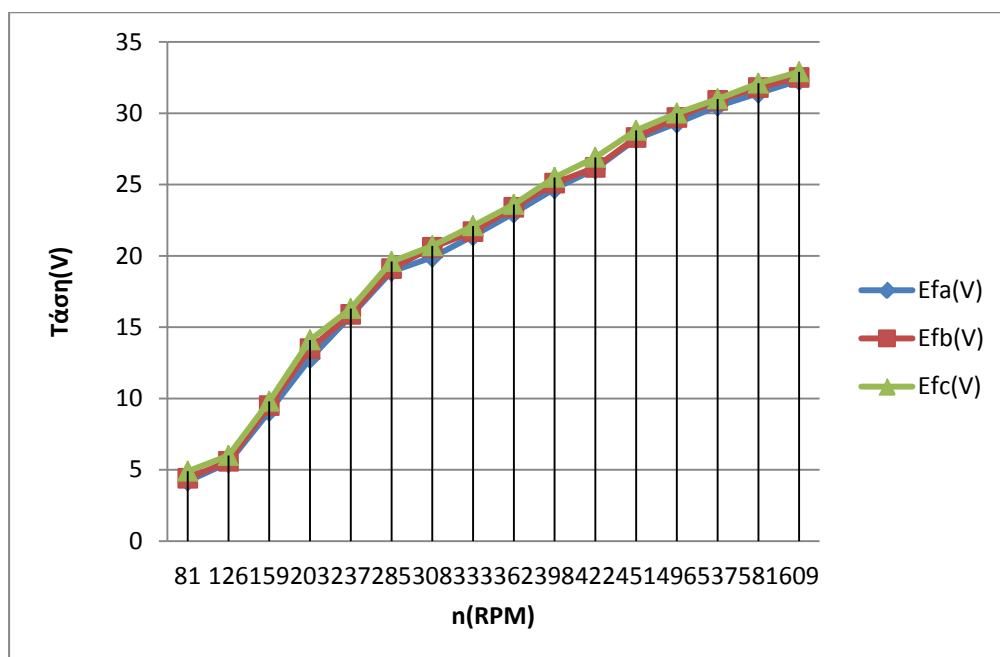
Μεταβάλλοντας την τάση του τυμπάνου του κινητήρα μεταβάλλονται οι στροφές του. Για διάφορες τιμές των στροφών μετρήθηκε αρχικά με ένα

βολτόμετρο η φασική τάση εκτός φορτίου και για τις τρεις φάσεις και καταγράφηκε στον Πίνακα 5-6.

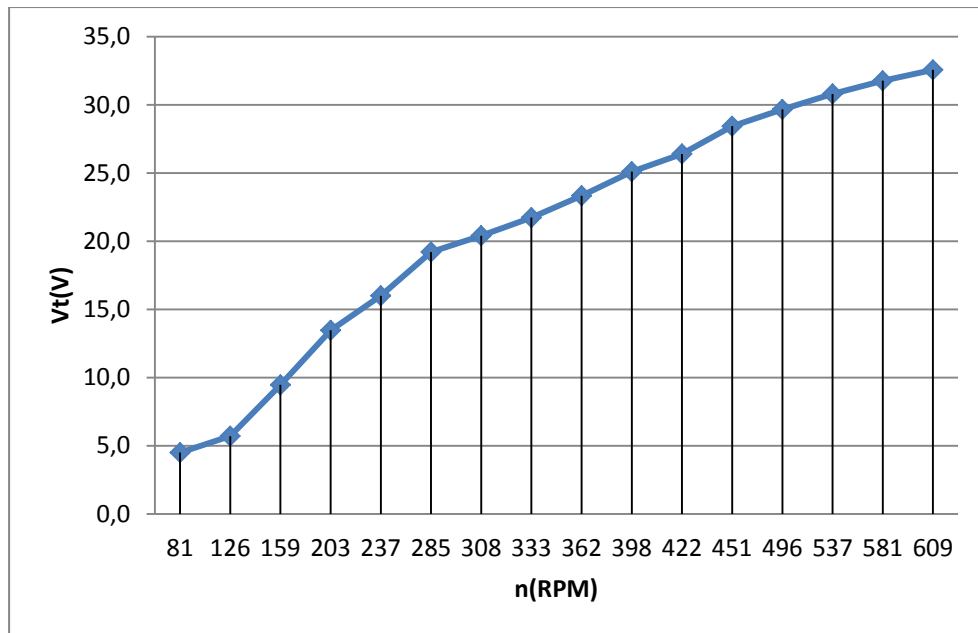
Πίνακας 5-6: Μετρήσεις φάσης ανοικτοκύκλωσης για διάφορες τιμές στροφών

n(RPM)	Efa(V)	Efb(V)	Efc(V)	Efavg(V)
81	4,2	4,4	4,9	4,5
126	5,5	5,6	6	5,7
159	9,1	9,5	9,8	9,5
203	12,8	13,5	14,1	13,5
237	15,8	15,9	16,3	16,0
285	18,9	19,1	19,6	19,2
308	19,9	20,6	20,7	20,4
333	21,4	21,7	22,1	21,7
362	23	23,4	23,6	23,3
398	24,7	25,1	25,5	25,1
422	26,1	26,2	26,9	26,4
451	28,2	28,3	28,8	28,4
496	29,3	29,7	30	29,7
537	30,5	30,9	31	30,8
581	31,4	31,8	32,1	31,8
609	32,3	32,5	32,9	32,6

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτουν τα παρακάτω γραφήματα:



Γράφημα 1: Σχέση της φασικής ΗΕΔ με τη ταχύτητα περιστροφής ανά φάση



Γράφημα 2: Σχέση μέσης τιμής φασικής ΗΕΔ με τη ταχύτητα περιστροφής

Η ενεργός τιμή της πεπλεγμένης ροής μπορεί να υπολογιστεί για ταχύτητα 398RPM με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα:

$$\text{fluxoc} = E_f / 2\pi f = 25.5 / 2 * 3,14 * 50 = \mathbf{0,081Wb}$$

Στη συνέχεια η γεννήτρια συνδέθηκε με ωμικό μεταβλητό φορτίο. Μεταβάλλοντας την αντίσταση του φορτίου μεταβάλλεται το ρεύμα που το διαρρέει άρα και η ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας. Κάθε φορά που αυξάνεται το ρεύμα του φορτίου, οι στροφές της γεννήτριας μειώνονται και για να κρατηθούν στην επιθυμητή τιμή χρειάζεται να δώσουμε παραπάνω ισχύ στον κινητήρα. Η μέτρηση της μεταβολής της τάσης με το φορτίο πραγματοποιήθηκε για n=398RPM και για ρεύμα μέχρι I=7,9A. Πέρα από αυτά τα επίπεδα ο κινητήρας δεν μπορούσε να δώσει περισσότερη ισχύ χωρίς να υπερθερμανθεί.

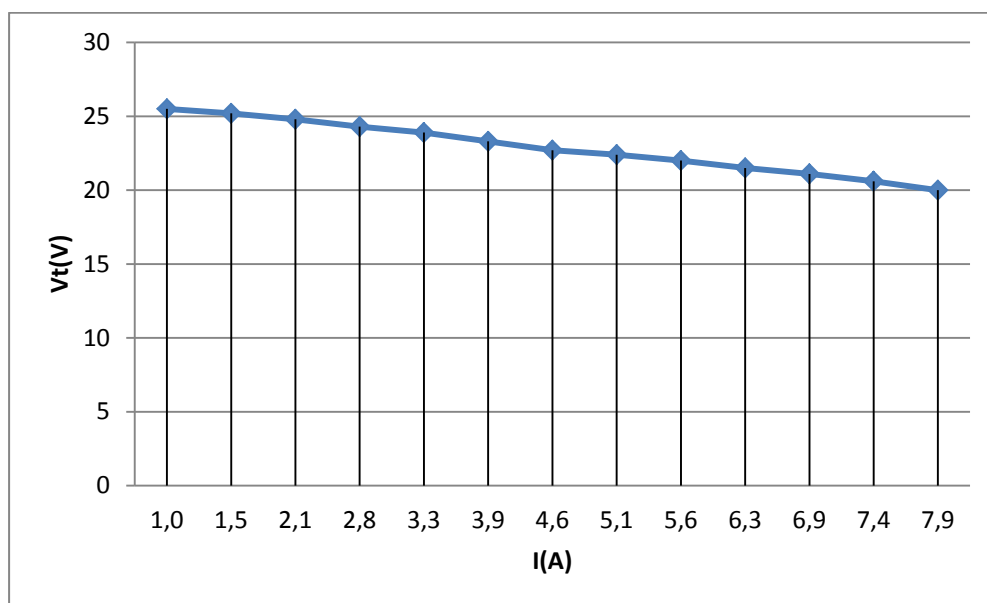
Στον πίνακα 5-7 καταγράφηκαν οι μετρούμενες τιμές της φασικής τάσης για ρεύμα γραμμής από I=1A μέχρι I=7,9A. Η ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας για καθαρά ωμικό φορτίο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{el} = 3 * V_t * I * \cos\theta$$

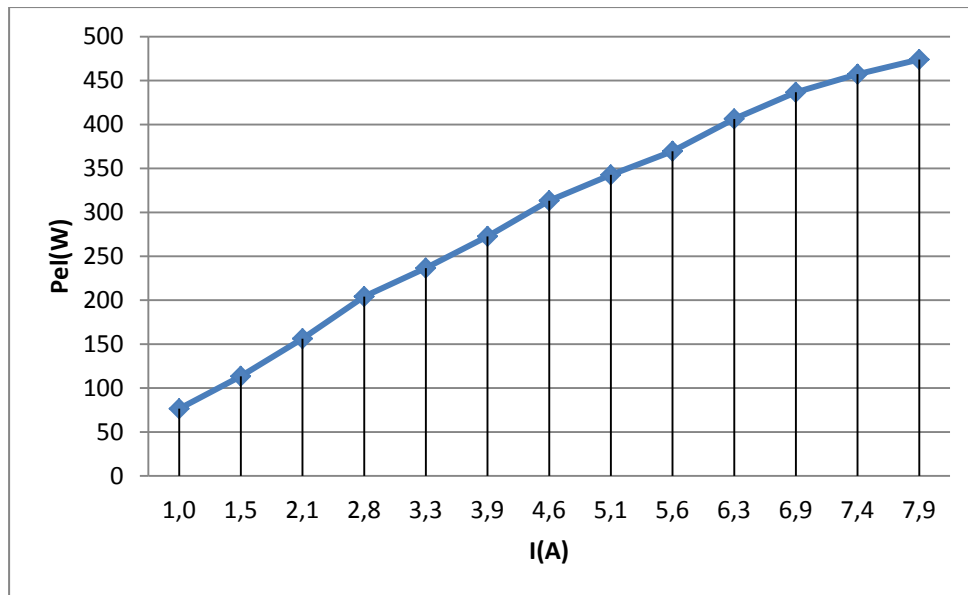
Πίνακας 5-7: Φασική τάση και ηλεκτρική ισχύς για διάφορα ρεύματα γραμμής

$I(A)$	$V_t(V)$	$PeI(W)$
1,0	25,5	77
1,5	25,2	113
2,1	24,8	156
2,8	24,3	204
3,3	23,9	237
3,9	23,3	273
4,6	22,7	313
5,1	22,4	343
5,6	22	370
6,3	21,5	406
6,9	21,1	437
7,4	20,6	457
7,9	20	474

Με βάση τις μετρήσεις στον πίνακα 5-7 αναπαριστώνται παρακάτω γραφικά: η σχέση φασικής τάσης με το ρεύμα γραμμής και τη σχέση ηλεκτρικής ισχύος της γεννήτριας με το ρεύμα γραμμής.



Γράφημα 3: Σχέση φασικής τάσης με το ρεύμα γραμμής



Γράφημα 4: Σχέση Ηλεκτρικής ισχύος με το ρεύμα γραμμής

Δυστυχώς λόγω μη ύπαρξης κάποιου αισθητήριου οργάνου ή άλλου οργάνου για την μέτρηση της ροπής της γεννήτριας, δεν ήταν δυνατό να μετρηθούν η μηχανική ροπή ή η μηχανική ισχύς της γεννήτριας κατά τη λειτουργία της και στις μεταβολές των στροφών και να υπολογιστεί η απόδοση της.

5.4.2 Παρατηρήσεις και Συμπεράσματα

1. Από τον πίνακα 5-6, παρατηρείται ότι οι τιμές της τάσης για κάθε φάση διαφέρουν. Το γεγονός αυτό συμβαίνει διότι οι περιελίξεις της κάθε φάσης έχουν διαφορετική απόσταση από τους μαγνητικούς πόλους του ρότορα. Πιο συγκεκριμένα, οι περιελίξεις της πρώτης (a) φάσης έχουν μεγαλύτερη απόσταση από αυτές της δεύτερης (b) και τρίτης (c), οπότε οι μαγνητικές γραμμές στο σημείο εκείνο είναι αραιότερες άρα και η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή ασθενέστερη. Επομένως προκύπτει ότι η τελική τιμή της τάσης για την πρώτη φάση είναι μικρότερη από ότι για τις άλλες φάσεις. Ομοίως ισχύει και για την ΗΕΔ της δεύτερης φάσης σε σχέση με την Τρίτη. Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει την τιμή της ΗΕΔ είναι το σφάλμα κατά την περιέλιξη και ο διαφορετικός αριθμός σπειρών κάθε φάσης.

2. Επίσης από τον πίνακα 5-6 αλλά και τα γραφήματα 1 και 2 παρατηρείται ότι η σχέση φασικής ΗΕΔ και αριθμού περιστροφών αυξάνεται. Αυτό συμβαίνει λόγω της αύξησης της ταχύτητας περιστροφής που οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού μεταβολής της πεπλεγμένης ροής στην περιέλιξη. Ωστόσο όμως αυτή η αύξηση δεν είναι ακριβώς γραμμική. Το φαινόμενο αυτό πιθανόν οφείλεται σε σφάλμα στις περιελίξεις το οποίο επηρεάζεται από τη συχνότητα της γεννήτριας. Ένα άλλο φαινόμενο που παρατηρείται είναι ότι στις υψηλές περιστροφές μέτρησης της ΗΕΔ (πάνω από 500RPM), η φασική τάση τείνει προς τον κορεσμό.
3. Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων της απόδοσης της γεννήτριας, πίνακας 5-7 και γραφήματα 3 και 4, παρατηρείται ότι η λειτουργία της γεννήτριας υπό φορτίο είναι γραμμική. Λόγω της ύπαρξης πυρήνα στον στάτη παρατηρείται μία απόκλιση στη γραμμικότητα της γεννήτριας. Η ύπαρξη πυρήνα σημαίνει μαγνητικός κορεσμός και μεγάλη τιμή της αυτεπαγωγής φαινόμενα που επηρεάζουν τη γραμμικότητα της γεννήτριας.
4. Από τα παραπάνω γραφήματα και μετρήσεις επίσης παρατηρείται ότι η γεννήτρια δε θα μπορέσει να παράγει ισχύς 1kW, λόγω του ότι φτάνει σε μαγνητικό κορεσμό πολύ πιο σύντομα. Αν είχαμε τη δυνατότητα κατά τις πειραματικές μετρήσεις να περιστρέψουμε τη γεννήτρια με μεγαλύτερο αριθμό περιστροφών θα διαπιστωνόταν και πειραματικά. Το γεγονός αυτό οφείλεται επίσης στο μεγάλο διάκενο μεταξύ στάτη και ρότορα (~2mm) που αποδυναμώνει την μαγνητική ροή των μαγνητών που κόβει τα πηνία. Η απόσταση αυτή επιλέχθηκε στη τιμή αυτή για λόγους μηχανικής ασφαλείας (τυχών τζόγος ή τριβές που θα επέφεραν ανεπανόρθωτες βλάβες), ωστόσο θα μπορούσε να είναι μικρότερη (1mm) με αισθητά αποτελέσματα στην απόδοση της γεννήτριας.
5. Άλλη παράμετρος που θα βοηθούσε στην αύξηση της απόδοσης είναι η μείωση της μάζας του πυρήνα του στάτη. Αν ο πυρήνας στον στάτη είχε κατασκευαστεί από μεταλλικά ελάσματα, έναντι συμπαγούς χάλυβα, η πολυπλοκότητας της κατασκευής θα αυξανόταν όμως η μάζα του ρότορα θα μειωνόταν αισθητά. Μια γεννήτρια με μικρότερη μάζα στο ρότορα θα επιτύγχανε μεγαλύτερη ροπή, άρα η μαγνητικές γραμμές θα έκοβαν με μεγαλύτερη ταχύτητα τα πηνία.

6. Για τον λόγο ότι δεν ήταν δυνατό να μετρηθεί η μηχανική ροπή της γεννήτριας δεν ήταν δυνατό να μετρηθεί και η ροπή εκκίνησης. Όμως κατά τη διάρκεια των μετρήσεων παρατηρήθηκε σε χαμηλό αριθμό περιστροφών (μέχρι 200RPM περίπου) περισσότερο έντονος θόρυβος και κραδασμοί στη γεννήτρια. Όσο ανέβαινε ο αριθμός των στροφών και πάνω από 200 RPM παρατηρήθηκε σταθεροποίηση στη λειτουργία της μηχανής ως προς τις δονήσεις και τους θορύβους. Αν οι μαγνήτες είχαν σχήμα λοξό, η ροπή εκκίνησης θα ήταν ακόμα λιγότερο αισθητή.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει χαρακτήρα ερευνητικό μιας και αποτελεί ένα ολοκληρωμένο τεχνικό εγχειρίδιο για την μελέτη και κατασκευή γεννητριών μονίμων μαγνητών αξονικής ροής αλλά περιέχει και τις βάσεις για την έρευνα σε άλλες τοπολογίες.

5.4.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Οι γεννήτριες ακτινικής ροής μόνιμων μαγνητών μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές μικρών ανεμογεννητριών και όχι μόνο. Είναι η πιο διαδεδομένη τοπολογία σήμερα για τέτοιες εφαρμογές. Στη συγκεκριμένη τοπολογία θα μπορούσε να γίνει μελέτη ως προς την κατασκευή του στάτη. Αν υπάρχουν τα απαραίτητα εργαλεία για την ελασματοποίηση ενός στάτη θα μπορούσαν να δημιουργηθούν προϋποθέσεις για την κατασκευή ενός στάτη με την επιθυμητή ακτίνα για μεγαλύτερες εφαρμογές. Επίσης θα οι διαστάσεις των αυλακώσεων θα μπορούσαν να προσαρμοστούν αναλόγως να τροποποιηθεί το σχήμα τους, ακόμα και να λοξευθούν για την μείωση της ροπής εκκίνησης.

Ωστόσο και οι γεννήτριες αξονικής ροής έχουν κερδίσει έδαφος και έχουν ένα σημαντικό κομμάτι σε ερευνητικό αλλά και βιομηχανικό επίπεδο. Παρουσιάζουν τα πλεονεκτήματα της υψηλής απόδοσης, της απλότητας στην κατασκευή και της χαμηλής ροπής εκκίνησης που επιτρέπει την εκκίνηση μίας ανεμογεννήτριας σε χαμηλούς ανέμους. Επίσης παρουσιάζουν απλότητα στην κατασκευή αλλά και αρκετές επιλογές σε επιμέρους τοπολογίες και παραμετροποιήσεις αυτών.

Έρευνα μπορεί να πραγματοποιηθεί για μία ολοκληρωμένη μετρητική διάταξη για γεννήτριες. Μία διάταξη που θα περιείχε ένα τριφασικό inverter συνδεδεμένο με τριφασικό ασύγχρονο κινητήρα μεγάλης ισχύος θα παρείχε δυνατότητα μέτρησης γεννητριών μεγαλύτερης ισχύος και σε μεγαλύτερες περιστροφές. Η ύπαρξη συστοιχιών από διάφορα φορτία (ωμικά, επαγωγικά και χωρητικά) θα έδιναν τη δυνατότητα για περισσότερα μεγέθη να μετρηθούν και υπό διαφορετικές συνθήκες. Ακόμα, η ύπαρξη αισθητηρίων για όλα τα μετρούμενα μεγέθη (τάση, ένταση ρεύματος, ισχύς, ροπής, κ.α.) θα έδινε τη δυνατότητα για ευκολότερη αλλά και με μεγαλύτερη ακρίβεια μέτρηση των παραμέτρων αυτών.

Βιβλιογραφία

Βιβλία

- [1.]“Ηλεκτρικές Μηχανές εναλλασσομένου Ρεύματος”, Β. Στεργίου, Σ. Τουλόγλου, εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα 1999
- [2.]“Ηλεκτρικές Μηχανές”, Ι. Τεγόπουλος, εκδόσεις Συμμετρία, 1991
- [3.]“Ηλεκτρισμός και μαγνητισμός”, Μ. Gussow, ΕΣΠΙ, Αθήνα 1994
- [4.]“Ηλεκτρικές Μηχανές” 1, Κ. Φωτιάδης, Ο.Ε.Δ.Β., Αθήνα 1987
- [5.]“Optimized Permanent Magnet Generator Topologies for Direct-Drive Wind Turbines”, Dr. J. T. Fokkema, Canada 2004

Άρθρα

- [1.]“Design of a Direct-Coupled Radial-Flux Permanent Magnet Generator for Wind Turbines”, Jang-Young Choi, Seok-Myeog, IEEE
- [2.]“A Rotor Lamination Design for Surface Permanent Magnet”, R. D. Lorenz, D. W. Novotny, IEEE
- [3.]“Permanent Magnet Brushless Machines and Drives for Electric and Hybrid Propulsion Systems”, Z. Q. Zhu, UK 2009
- [4.]“Classification of Symmetrical Non-Overlapping Three-Phase Windings”, J. Germishuizen, M. Kamper, Italy 2010
- [5.]“Comparison of Methods of Minimization of Cogging Torque in Wind Generators”, A. Kumar, S. Marwaha, India 2006
- [6.]“Closed Slot Topology for Reduction of Cogging Torque and Noise in PM Direct Drive Generator for Wind Turbines”, A. Jassal, H. Polinder, G. Shrestha, Netherlands 2008
- [7.]“Cogging Torque Reduction in a Permanent Magnet Wind Turbine Generator”, E. Muljadi J. Green, U.S. 2002

Άλλες πηγές

- [1.]Emetor.com, ιστότοπος που περιέχει βοηθητικά εργαλεία για τη μελέτη στη κατασκευή μηχανών.
- [2.]late.europa.eu, InterActive Terminology for Europe, ιστότοπος που παρέχει μεταφράσεις σε διάφορες ορολογίες για γλώσσες της Ευρώπης.