



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

**Σχεδίαση και βελτιστοποίηση γεννητριών αξονικής ροής με χρήση
συνθετικών σιδηρομαγνητικών υλικών σκόνης σιδήρου για τοπικά
κατασκευασμένες υδρογεννήτριες.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αλέξανδρος Κωνσταντινίδης

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2016



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

Σχεδίαση και βελτιστοποίηση γεννητριών αξονικής ροής με χρήση συνθετικών σιδηρομαγνητικών υλικών σκόνης σιδήρου για τοπικά κατασκευασμένες υδρογεννήτριες.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αλέξανδρος Κωνσταντινίδης

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 18^η Ιουλίου 2016.

.....

Νικόλαος Χατζηαργυρίου

.....

Σταύρος Σ. Παπαθανασίου

.....

Πάυλος Γεωργιλιάκης

Αθήνα, Μάρτιος 2016

.....

Αλέξανδρος Κωνσταντινίδης

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

Copyright © Αλέξανδρος Κωνσταντινίδης 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Σε αυτή την εργασία μελετώνται γεννήτριες αξονικής ροής μονίμων μαγνητών ως μέρη μικρών υδρογεννητριών σε αυτόνομα συστήματα. Η πλειοψηφία των γεννητριών αυτών κατασκευάζονται χωρίς πυρήνα σιδήρου. Παρά τα μειονεκτήματα της ύπαρξης πυρήνα σιδήρου διερευνάται η κατασκευή γεννήτριας με μείγμα ρινισμάτων σιδήρου στον πυρήνα του στάτη.

Στην αρχή της εργασίας γίνεται μία εισαγωγή στις έννοιες της ενδιαμέσης τεχνολογίας, των μικρών αυτόνομων συστημάτων και στο ρόλο που μπορούν να έχουν τα μικρά υδροηλεκτρικά συστήματα στην κάλυψη ανθρώπινων αναγκών με σεβασμό στο περιβάλλον.

Αναλύεται η λειτουργία των γεννητριών αξονικής ροής μονίμων μαγνητών και διερευνάται το θέμα του μαγνητικού υλικού του πυρήνα αυτών των γεννητριών. Στη συνέχεια, σχεδιάζονται και προσομοιώνονται γεννήτριες με πυρήνα διαφορετικών τοπολογιών και βελτιστοποιούνται οι διαστάσεις μαγνήτη για την κάθε περίπτωση.

Τέλος, κατασκευάζονται δύο γεννήτριες 350 W με πυρήνα σιδήρου με τοπολογίες διπλού δρομέα και μονού δρομέα αντίστοιχα. Οι επιδόσεις αυτών των γεννητριών συγκρίνονται πειραματικά με μίας ίδιας ισχύος γεννήτριας χωρίς πυρήνα σιδήρου.

Λέξεις κλειδιά:

Μικρές υδρογεννήτριες, χαμηλό κόστος,, μηχανές αξονικής ροής, μόνιμοι μαγνήτες, σύνδεση σε συσσωρευτές, πυρήνας στάτη, πυρήνας σκόνης σιδήρου.

Abstract

In this work axial flux permanent magnet generators are studied as parts of small hydro turbines in off-grid systems. The majority of these generators are manufactured today without an iron core. Despite the drawbacks of the iron core existence, a topology has been studied with iron filings in the stator core.

At the beginning of the work, an introduction to the concepts of intermediate technology and small autonomous energy systems is made, as well as to the role that small hydro systems can have in meeting human needs while preserving the environment.

The operation of axial flux permanent magnet generators is analyzed in theory and the subject of the core material of these generators is investigated. Subsequently, generators with stator core are designed and simulated for different topologies and the magnet dimensions for each of them are optimized according to efficiency and cost criteria.

Finally, two 350 W generators with stator core are manufactured in two different topologies, single rotor and double rotor respectively. Their performances are compared in the lab with the performance of an equivalent power typical generator without stator core.

Key words:

Small hydro turbine, low cost, axial flux generatos, permanent magnets, direct battery connection, stator core, iron powder core.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου για την επίβλεψη της διπλωματικής. Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω θερμά τον Κώστα Λατούφη για τις υποδείξεις και την καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας. Ακόμα θέλω να ευχαριστήσω τον Πέτρο, το Μάριο, τον Παναγιώτη και την Κατερίνα για τη βοήθειά τους στην κατασκευή της γεννήτριας. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω το Μιχάλη Πίσσα για τη βοήθειά του στη μέτρηση των υλικών.



Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	14
1.1. Α.Π.Ε.....	14
1.2. Υδροηλεκτρικό Σύστημα Παραγωγής Ενέργειας.....	14
1.2.1 Micro - υδροηλεκτρικό και ενδιάμεση τεχνολογία.....	16
1.3. Η ηλεκτροδότηση αγροτικών περιοχών σε αναπτυσσόμενες χώρες μέσω micro – υδροηλεκτρικών.....	17
1.3.1. Δίκτυο ενίσχυσης micro-υδροηλεκτρικών έργων στη Νότια και Νοτιανατολική Ασία.....	18
1.3.2. Η δράση της τεχνολογίας των micro-υδροηλεκτρικών στην περιοχή.....	18
1.4. Διαμόρφωση micro-υδροηλεκτρικού σταθμού παραγωγής.....	20
1.5. Σχεδιασμός και μελέτη micro-υδροηλεκτρικού σταθμού παραγωγής.....	22
2. ΚΥΡΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΙΑΣ MICRO/PICO-ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	27
2.1. Σύστημα εισόδου του νερού.....	27
2.2. Διώρυγα προσαγωγής.....	30
2.2.1 Σχεδίαση της διώρυγας προσαγωγής.....	30
2.3. Λεκάνη καθίζησης ιζημάτων και δεξαμενή φόρτισης.....	33
2.3.1. Λεκάνη καθίζησης ιζημάτων.....	33
2.3.2. Δεξαμενή φόρτισης.....	35
2.4. Αγωγός πτώσεως.....	36
2.4.1. Διαστασιολόγηση του αγωγού πτώσεως.....	36
2.5. Σταθμός Παραγωγής.....	41

3.ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ.....	42
3.1. Γενικά στοιχεία – Τύποι υδροστροβίλων.....	42
3.2. Υδροστρόβιλοι Δράσεως.....	45
3.2.1. Υδροστρόβιλος Pelton.....	46
3.2.2. Υδροστρόβιλος Turgo.....	47
3.2.3. Υδροστρόβιλος Εγκάρσιας Ροής.....	49
3.3. Υδροστρόβιλοι Αντιδράσεως.....	51
4. ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ..	53
4.1. Σύγχρονες γεννήτριες μονίμων μαγνητών.....	53
4.2. Σύγκριση γεννητριών αξονικής και ακτινικής ροής.....	53
4.3. Οι γεννήτριες αξονικής ροής.....	56
4.3.1. Βασικά χαρακτηριστικά και τοπολογίες.....	56
4.3.2. Η επιλεγμένη τοπολογία: διπλός δρομέας – μονός στάτης με πυρήνα σιδήρου.....	57
4.4. Τα τυλίγματα.....	58
4.5. Θεωρητική Ανάλυση.....	61
4.5.1. Μαγνητική ροή – ΗΕΔ – Ηλεκτρομαγνητική ροπή.....	61
4.5.2. Ανάλυση του τυλίγματος.....	63
4.5.2.1. Πυκνότητα ρεύματος.....	63
4.5.2.2. Αντίσταση και αυτεπαγωγή τυλίγματος.....	64
4.5.3. Το μαγνητικό κύκλωμα.....	66
4.5.4. Μελέτη απωλειών και ισοδύναμο κύκλωμα.....	68
4.5.4.1. Μελέτη απωλειών.....	68
4.5.4.2. Ισοζύγιο ενέργειας - Ισοδύναμο κύκλωμα.....	70
5. ΤΡΟΠΟΙ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΕΝΟΣ MICRO – ΥΔΡΟΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ.....	71
5.1. Λειτουργία μεταβλητών στροφών ενός micro – υδροηλεκτρικού.....	71
5.2. Εισαγωγή στους δυνατούς τρόπους σύνδεσης ενός micro – υδροηλεκτρικού συστήματος.....	72
5.3. DC σύνδεση – Σύστημα βασισμένο σε μπαταρίες.....	73
5.4. AC σύνδεση.....	76

5.4.1. Διασυνδεδεμένο σύστημα.....	77
5.5. Επιλογή καταλληλότερης σύνδεσης για ένα υδροηλεκτρικό σύστημα.....	77
6. ΤΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΣΚΟΝΗΣ ΣΙΔΗΡΟΥ.....	79
6.1. Μαλακά μαγνητικά συνθετικά σκόνης σιδήρου.....	79
6.1.2. Η διαδικασία κατασκευής πυρήνων στάτη με μείγμα σκόνης σιδήρου.....	79
6.2. Ιστορικό εφαρμογών με σκόνη σιδήρου.....	80
6.2.1. Σκόνη σιδήρου με μονωτικό.....	82
6.2.2. Συνθετικά σκόνης σιδήρου με πολυμερή και με κράμα σιλικόνης.....	85
6.2.3. Συμπεράσματα για τις ιδιότητες των υλικών.....	86
6.2.4. Η διαδικασία της ανόπτησης.....	87
6.2.5. Τρόποι παραγωγής και επεξεργασίας μειγμάτων σκόνης σιδήρου.....	91
6.2.5.1. Οι τρεις κατηγορίες υλικών μονωμένης σκόνης σιδήρου.....	91
6.3. Η σκόνη σιδήρου σε απλές εφαρμογές.....	95
6.3.1. Το μαγνητόμετρο SQUID.....	95
7. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΜΑΓΝΗΤΗ.....	100
7.1. Το λογισμικό προσομοίωσης.....	100
7.1.1. Η διαστασιολόγηση σε Matlab(-Octave).....	100
7.1.2. Το λογισμικό FEMM.....	101
7.1.3. Προσομοίωση της γεννήτριας με συνδυασμό Matlab-FEMM.....	101
7.2. Βελτιστοποίηση διαστάσεων μαγνήτη.....	102
7.2.1. Κριτήρια και μεταβλητές βελτιστοποίησης.....	102
7.2.2. Απόρριψη διατάξεων κατά τη διαδικασία Βελτιστοποίησης.....	103

7.2.2.1. Κατασκευαστικοί περιορισμοί.....	103	
7.2.2.2. Έλεγχος μεταβλητών.....	104	
7.2.3. Εύρεση βέλτιστου μαγνήτη.....	105	
8. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	106	
8.1. Σχεδιασμός υδροηλεκτρικού συστήματος.....	106	
8.1.1. Διαστασιολόγηση αγωγού πτώσης.....	106	
8.1.2. Διαστασιολόγηση υδροστροβίλου Turgo.....	108	
8.1.3. Σχεδίαση σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών ροής.....	110	αξονικής
8.1.3.1. Σύνδεση της υδρογεννήτριας και ονομαστική λειτουργία.....	111	
8.1.3.2. Αριθμός πόλων – πηνίων, συχνότητα λειτουργίας.....	112	
8.1.3.3. Ο στάτης και τα πηνία.....	112	
8.1.3.3.1. Το πάχος του στάτη.....	112	
8.1.3.3.2. Σπείρες και πάχος πηνίου.....	113	
8.1.3.3.3. Ο συντελεστής πλήρωσης του πηνίου.....	115	
8.1.3.3.4. Κατασκευαστικές διαστάσεις πηνίου.....	116	
8.1.3.4. Οι μαγνήτες.....	117	
8.1.3.4.1. Το σχήμα του μαγνήτη.....	117	
8.1.3.4.2. Το πάχος του μαγνήτη.....	117	
8.1.3.4.3. Το πλάτος και το μήκος του μαγνήτη.....	118	
8.1.3.5. Εσωτερική και εξωτερική ακτίνα.....	119	
8.1.3.6. Οι λόγοι a_i και k_d	120	
8.1.3.7. Το πάχος του σιδήρου του μεταλλικού δίσκου.....	120	
8.1.3.8. Κόστος, βάρος και όγκος γεννήτριας.....	121	
8.1.3.8.1. Οι μαγνήτες.....	122	
8.1.3.8.2. Ο σίδηρος.....	123	
8.1.3.8.3. Ο χαλκός.....	124	

8.1.3.8.4. Η ρητίνη.....	124
8.1.3.8.5. Τα κόντρα πλακέ.....	125
8.1.4. Σχεδίαση του περιβλήματος.....	126
8.2. Κατασκευή υδρογεννήτριας.....	129
8.2.1. Κατασκευή του στάτη.....	129
8.2.2. Κατασκευή του δρομέα.....	132
9. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΡΙΩΝ	
ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	134
9.1. Πειραματική διάταξη.....	134
9.2. Μέτρηση των γεννητριών μονίμων μαγνητών.....	138
9.2.1. Μέτρηση της γεννήτριας χωρίς πυρήνα μονού δρομέα.....	138
9.2.1.1. Μέτρηση υπό κενό φορτίο.....	138
9.2.1.2. Μέτρηση υπό μεταβαλλόμενο ωμικό φορτίο.....	140
9.2.1.3. Μετρηση με απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές.....	143
9.2.2. Μέτρηση της γεννήτριας διπλού δρομέα με πυρήνα.....	147
9.2.2.1. Μέτρηση υπό κενό φορτίο.....	147
9.2.2.2. Μέτρηση υπό μεταβαλλόμενο ωμικό φορτίο για τη γεννήτρια διπλού δρομέα με πυρήνα.....	148
9.2.2.3. Μετρηση με απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές.....	152
9.2.2.4. Μέτρηση της αντίστασης του τυλίγματος του στάτη για τη γεννήτρια διπλού δρομέα.....	156
9.2.3. Μέτρηση της γεννήτριας μονού δρομέα με πυρήνα	156
9.2.3.1. Μέτρηση υπό κενό φορτίο.....	157
9.2.3.2. Μέτρηση υπό μεταβαλλόμενο ωμικό φορτίο.....	158
9.2.3.3. Μετρηση με απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές.....	161

9.3. Μέτρηση της συνολικής απόδοσης του υδροηλεκτρικού συστήματος.....	164
9.3.1. Μέτρηση της απόδοσης του υδροηλεκτρικού Συστήματος.....	167
9.3.2. Μέτρηση της απόδοσης του υδροηλεκτρικού συστήματος για τη γεννήτρια χωρίς πυρήνα.....	167
9.3.2.1. Μέτρηση με μεταβαλλόμενο φορτίο για τη γεννήτρια χωρίς πυρήνα.....	167
9.3.2.2. Μέτρηση σε σύνδεση με συσσωρευτές για τη γεννήτρια χωρίς πυρήνα.....	170
9.3.3. Μέτρηση της απόδοσης του υδροηλεκτρικού συστήματος για τη γεννήτρια διπλού δρομέα με πυρήνα.....	170
9.3.3.1. Μέτρηση με μεταβαλλόμενο φορτίο για τη γεννήτρια διπλού δρομέα με πυρήνα.....	171
9.3.3.2. Μέτρηση σε σύνδεση με συσσωρευτές για τη γεννήτρια διπλού δρομέα με πυρήνα.....	172
9.3.4. Μέτρηση της απόδοσης του υδροηλεκτρικού συστήματος για τη γεννήτρια μονού δρομέα με πυρήνα.....	173
9.3.4.1. Μέτρηση σε σύνδεση με συσσωρευτές για τη γεννήτρια μονού δρομέα με πυρήνα.....	173
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	174

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Α.Π.Ε.

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.) ονομάζονται οι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από φυσικές διαδικασίες και φαινόμενα που δεν υπόκεινται σε κάποιο είδος εξάντλησης ή απομείωσης. Στην κατηγορία των ΑΠΕ ανήκουν η αιολική, η ηλιακή και η γεωθερμική ενέργεια, η ενέργεια από υδατοπτώσεις και θαλάσσια κύματα, καθώς και οι κυψέλες καυσίμου με υδρογόνο.

Στην αρχή οι ΑΠΕ ήταν πολυδάπανες και παρουσίαζαν τεχνικές αδυναμίες, γι' αυτό ξεκίνησαν ως πειραματικές εφαρμογές. Σήμερα όμως, το κόστος των εφαρμογών τους μειώνεται διαρκώς, ενώ παράλληλα βελτιώνεται η απόδοσή τους με αποτέλεσμα να ανταγωνίζονται τις παραδοσιακές πηγές ενέργειας, όπως τα ορυκτά καύσιμα. Η ανάγκη εξέλιξης και ορθολογικής επέκτασης της χρήσης των τεχνολογιών των ΑΠΕ είναι πλέον πιο άμεση και επιτακτική, αλλά και ευκολότερα υλοποιήσιμη από ποτέ για διάφορους λόγους. Ο πρώτος από αυτούς εντοπίζεται στην προσπάθεια αναστολής των κλιματικών αλλαγών και προστασίας του περιβάλλοντος, το οποίο υποβαθμίζεται όλο και περισσότερο με τη χρήση ορυκτών καυσίμων και πυρηνικής ενέργειας, καθώς οι ΑΠΕ μπορούν να εξασφαλίσουν την παραγωγή ενέργειας χωρίς επιβλαβή κατάλοιπα και απόβλητα. Ένας δεύτερος λόγος έγκειται στην ανάγκη κάθε χώρας για μείωση των εξαρτήσεων της οικονομίας της από εξωγενείς παράγοντες και για ενεργειακή αυτονομία, η οποία συνοδεύεται από ανάπτυξη, υλοποίηση έργων και απόκτηση τεχνογνωσίας. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό αυτών των μορφών ενέργειας, το οποίο τις καθιστά ελκυστικές λύσεις είναι το ότι οι φυσικοί τους πόροι δεν περιορίζονται σε συγκεκριμένους γεωγραφικούς χώρους, με αποτέλεσμα την αποκέντρωση και χωρική διασπορά της ενεργειακής παραγωγής. Αυτό συμβάλει αφενός στην ύπαρξη μεγαλύτερης σταθερότητας στη λειτουργία του συστήματος μεταφοράς και αφετέρου στη μείωση των απωλειών ενέργειας κατά τη μεταφορά, λόγω της καλύτερης κατανομής των σταθμών παραγωγής σε σχέση με τους πόλους κατανάλωσης. [1]
ΑΠΟ ΣΤΑΜΑΤΙΑ

1.2. Υδροηλεκτρικό Σύστημα Παραγωγής Ενέργειας

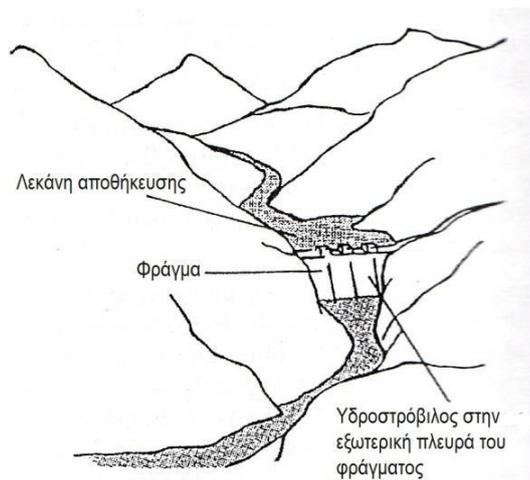
Η υδραυλική ενέργεια αποτελεί μία ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, όπως είναι και η ηλιακή ενέργεια, η οποία με την εξάτμιση του νερού κινεί τον υδρολογικό κύκλο. Η υδροηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από τη μετατροπή της δυναμικής ενέργειας του νερού σε κινητική μέσω του υδροστροβίλου και στη συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω της γεννήτριας. Αυτό γίνεται με την εκμετάλλευση της ροής του νερού σε υδάτινο αγωγό με φυσική κλίση, ενώ μπορεί για την αποθήκευση του νερού να δημιουργηθεί τεχνητή λίμνη ώστε να αυξηθεί το υδραυλικό ύψος. [2]

Ένας τρόπος κατηγοριοποίησης των υδροηλεκτρικών σταθμών είναι με βάση το μέγεθος της παραγόμενης ισχύος. Αν και τα όρια μεταξύ των κατηγοριών δεν είναι σαφώς καθορισμένα και ίδια για όλες τις χώρες, εδώ αναφέρονται αυτά που συναντώνται συχνότερα στη διεθνή βιβλιογραφία αλλά και αυτά που χρησιμοποιούνται για την τυποποίηση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού των υδροηλεκτρικών. Οι κύριες κατηγορίες που προκύπτουν κατά αυτόν τρόπο είναι τρεις: τα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα, τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα και τα micro-υδροηλεκτρικά έργα.

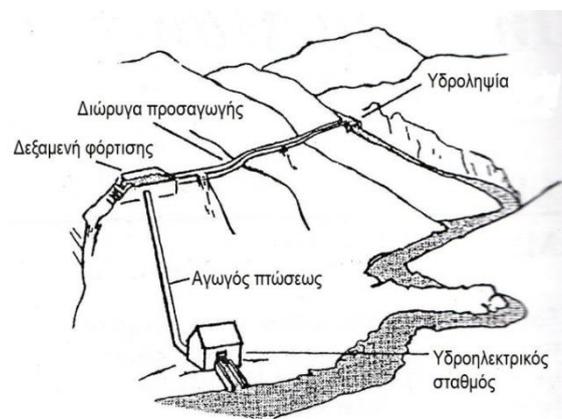
Η ονομαστική ισχύς των μεγάλων υδροηλεκτρικών σταθμών είναι μεγαλύτερη των 10MW ώστε να παράγουν αρκετή ηλεκτρική ενέργεια για την τροφοδότηση μεγάλων πόλεων μέσω εκτεταμένων ηλεκτρικών δικτύων. Οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί τροφοδοτούν εθνικά ηλεκτρικά δίκτυα με ισχύ μικρότερη από 10MW, αλλά μεγαλύτερη από 1MW. Εν συνεχεία, έρχονται οι mini-υδροηλεκτρικοί σταθμοί που καλύπτουν ένα μικρό φάσμα ισχύος: από 100kW έως 1MW και ακολουθούν οι micro-υδροηλεκτρικοί σταθμοί με ονομαστικές ισχύεις μικρότερες των 100kW. Μια υποκατηγορία των micro-υδροηλεκτρικών σταθμών αποτελούν οι pico-

υδροηλεκτρικοί σταθμοί με παραγόμενη ισχύ μικρότερη από 5kW. Οι μικρότεροι υδροηλεκτρικοί σταθμοί που ανήκουν στις τρεις τελευταίες κατηγορίες δε συνδέονται στο κύριο εθνικό δίκτυο, αλλά εγκαθίστανται συνήθως σε απομακρυσμένες και απομονωμένες επαρχιακές περιοχές για να τροφοδοτήσουν μικρές κοινότητες ή βιοτεχνίες [3]. Η Ελληνική Νομοθεσία (Ν.1559/85 και Ν.2244/95) ορίζει ως μικρούς τους σταθμούς με ισχύ μικρότερη των 10MW, με τον όρο ότι μόνο τα έργα εγκατεστημένης ισχύος έως και 2MW μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο ελεύθερης δράσης.

Η κατηγοριοποίηση των υδροηλεκτρικών σταθμών δεν είναι μόνο θέμα αριθμών ή μεγέθους · δηλαδή οι διαφορές που υπάρχουν δεν είναι μόνο ποσοτικές, αλλά κυρίως ποιοτικές, που σχετίζονται παραδείγματος χάριν με τη διαμόρφωση ή τον εξοπλισμό, τον τόπο εγκατάστασης, την χρήση της παραγόμενης ισχύος και άλλους παράγοντες. Μία πολύ χαρακτηριστική διαφορά των μικρότερων υδροηλεκτρικών έργων (ιδίως αυτών με ισχύς μικρότερες του 1MW) εντοπίζεται στην υδροληψία. Σε αυτήν την κατηγορία υδροηλεκτρικών σταθμών, ένα μέρος της ροής του ποταμού εκτρέπεται και χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, συνεπώς δεν είναι απαραίτητη η κατασκευή μεγάλων φραγμάτων για αποθήκευση του νερού. Λόγω της ιδιότητάς τους αυτής, οι συγκεκριμένοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί ονομάζονται σταθμοί εκτροπής ή ροής ποταμού (run of the river schemes) σε αντίθεση με αυτούς που χρησιμοποιούν μεγάλα φράγματα και ονομάζονται σταθμοί αποθήκευσης (storage schemes). Για τον λόγο αυτό, δε χρησιμοποιούνται εύκολα σε εφαρμογές αντλιοσταμίου με αποτέλεσμα η ενέργεια που παράγουν να απορροφάται κατά προτεραιότητα από το δίκτυο, ενώ οι μεγάλοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί καλύπτουν συνήθως φορτία αιχμής.



(α)



(β)

Σχήμα 1.1: (α) Υδροηλεκτρικό έργο με λεκάνη αποθήκευσης και φράγμα, (β) Υδροηλεκτρικό έργο με εκτροπή μέρους της ροής του ποταμού (run of the river) και ανοιχτή διώρυγα προσαγωγής του νερού[2]

Ανεξάρτητα από το μέγεθός τους τα υδροηλεκτρικά έργα παρουσιάζουν σημαντικά θετικά χαρακτηριστικά. Πρώτον, οι υδατοπτώσεις αποτελούν ανανεώσιμη πηγή ενέργειας κι έτσι δεν αντιμετωπίζουν ορατό κίνδυνο εξαντλήσεώς τους, όπως τα συμβατικά καύσιμα, ενώ για τον ίδιο λόγο, συμβάλλουν στη μείωση των εκπομπών καυσαερίων στην ατμόσφαιρα. Επιπλέον, σε σχέση με τις υπόλοιπες Α.Π.Ε., τα υδροηλεκτρικά παρουσιάζουν υψηλότερο βαθμό ενεργειακής απόδοσης και η παραγόμενη ενέργεια στη διάρκεια της ζωής τους είναι πολύ μεγαλύτερη από την ενέργεια που απαιτείται για την κατασκευή, συντήρηση και λειτουργία τους. Το κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας δεν παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις και αντιστοιχεί ουσιαστικά στις αποσβέσεις του έργου, καθώς και το λειτουργικό κόστος του υδροηλεκτρικού είναι μικρό. Ακόμα, η διάρκεια ζωής τους είναι μεγάλη, της τάξης των 50 ετών για τα μεγάλα και 20 με 30 ετών για τα μικρά και μπορεί να αυξηθεί με ανανέωση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, ενώ παράλληλα οι υδροστρόβιλοι είναι στιβαρές και αξιόπιστες μηχανές που απαιτούν μικρή συντήρηση και επίβλεψη. Τέλος, πολύ σημαντική ιδιότητα των υδροηλεκτρικών σταθμών είναι η γρήγορη απόκρισή τους είτε στην περίπτωση ανάληψης είτε απόρριψης φορτίου, έτσι ώστε να γίνεται δυνατή η παρακολούθηση της μεταβολής της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.

Ωστόσο, υφίστανται και κάποιοι ανασταλτικοί παράγοντες για την πιο εκτεταμένη χρήση τους, όπως είναι το σημαντικό κόστος και η σχετικά μεγάλη διάρκεια κατασκευής τους, η οποία οφείλεται στη χρονοβόρα διαδικασία της μελέτης και συλλογής και επεξεργασίας υδρολογικών και γεωλογικών στοιχείων, των οποίων η απαιτούμενη ακρίβεια αυξάνει αναλογικά με το μέγεθος του υπό κατασκευή υδροηλεκτρικού σταθμού. Επιπλέον, η ετήσια παραγωγή ενέργειας υφίσταται διακυμάνσεις, που σχετίζονται με την ποσότητα των ατμοσφαιρικών κατακρημισμάτων και τέλος η κατασκευή τους προϋποθέτει την ύπαρξη κατάλληλων υδατοπτώσεων και μεγάλων παροχών, με αποτέλεσμα την εγκατάστασή τους μακριά από την κατανάλωση και την οικονομική επιβάρυνση με πιο εκτεταμένα έργα μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας [4],[2].

1.2.1. Micro - υδροηλεκτρικό και ενδιάμεση τεχνολογία

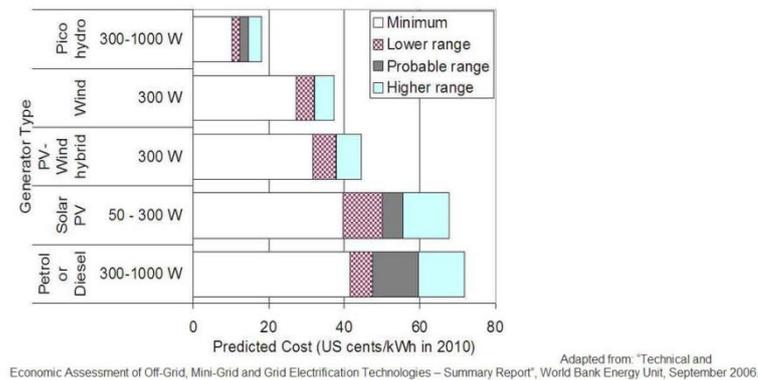
Τα μικρά και micro υδροηλεκτρικά έργα δεν εμφανίζουν τα αρνητικά χαρακτηριστικά των μεγάλων, ενώ έχουν ιδιαίτερα πλεονεκτήματα έναντι αυτών, τα οποία μάλιστα γίνονται πολύ πιο αισθητά όταν για την κατασκευή του υδροηλεκτρικού σταθμού και της γεννήτριας χρησιμοποιείται η ενδιάμεση τεχνολογία. Η ενδιάμεση τεχνολογία (intermediate technology) ή κατάλληλη τεχνολογία (appropriate technology), είναι ένας τρόπος αντίληψης της τεχνολογίας ως μία ενεργή συνιστώσα στην καθημερινή διαμόρφωση των κοινωνικών σχέσεων. Εμπεριέχει την αντίληψη πως οι ανθρώπινες κοινωνίες χρειάζεται να έχουν τη δυνατότητα να αποφασίζουν άμεσα για το μέλλον τους σύμφωνα με τις ιδιαιτερότητές τους και πως η ενδιάμεση τεχνολογία μπορεί να τις ενδυναμώσει προς αυτήν την κατεύθυνση [5].

Η χρήση της ενδιάμεσης τεχνολογίας είναι σχεδόν αλληλένδετη με τη χρήση Α.Π.Ε. για εφαρμογές μικρής κλίμακας, όπως είναι τα micro-υδροηλεκτρικά έργα που μελετώνται στην παρούσα εργασία. Ο συνδυασμός αυτών των δύο έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα:

- Τα micro-υδροηλεκτρικά έργα είναι "συνεχούς ροής", δεν απαιτούν σημαντική περισυλλογή νερού και κατά συνέπεια δεν είναι αναγκαία η κατασκευή φράγματος και μεγάλου ταμιευτήρα, που θα μετέβαλλαν το οικοσύστημα εγκαθιστάμενα σε περιοχές φυσικών ρευμάτων, μειώνοντας το οξυγόνο του νερού και δημιουργώντας λίμνες αδρανούς ύδατος αφιλόξενες για τα ενδημικά είδη ψαριών. Η κατασκευή ενός micro-υδροηλεκτρικού επιβαρύνει ελάχιστα το εγγύς φυσικό οικοσύστημα, ενώ παράλληλα η ποιότητα των υδάτων δεν υποβαθμίζεται με τη διέλευση τους από τον στρόβιλο και είναι δυνατόν μέσω κατάλληλης επεξεργασίας τους στις εγκαταστάσεις του

υδροηλεκτρικού να αποδοθούν ακόμα πιο καθαρά στο υδατόρευμα, στην περίπτωση που δεν περιείχαν χημικούς ρύπους.

- Η κατασκευή των micro-υδροηλεκτρικών συνδυάζεται συχνά και με άλλες δραστηριότητες ή διευθετήσεις, όπως άρδευση, ύδρευση, ρύθμιση πλημμύρας, αλιεία κ.τ.λ., συμβάλλοντας στην αποδοτικότερη αξιοποίηση των υδατικών πόρων.
- Είναι μικρά σε κλίμακα και απαιτούν μικρό αρχικό κεφάλαιο με αποτέλεσμα να είναι οικονομικά προσιτά σε οικογενειακό ή κοινοτικό επίπεδο.
- Τα micro και pico υδροηλεκτρικά συστήματα προσφέρουν τη δυνατότητα συνεχούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της μέρας, σε αντίθεση με τα φωτοβολταϊκά και τις ανεμογεννήτριες. Αυτός είναι ένας σημαντικός παράγοντας που τα καθιστά από τις πιο αποδοτικές και φθηνές ενεργειακές λύσεις όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2: Κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά kW από διαφορετικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

- Μπορούν εκτός από τα ηλεκτρικά φορτία, να χρησιμοποιηθούν και για την εξυπηρέτηση μηχανικών φορτίων (όπως μύλοι κ.τ.λ.)
- Δίνουν έμφαση στη χρήση τοπικών πρώτων υλών και τεχνικών με αποτέλεσμα η χρησιμοποιούμενη τεχνολογία να είναι περισσότερο εναρμονισμένη με τις τοπικές παραδόσεις και αξίες, και ταυτόχρονα να μειώνεται το κόστος και τα προβλήματα ανεφοδιασμού.
- Η ενδιάμεση τεχνολογία μπορεί να παραχθεί σε μικρές βιοτεχνίες ή εργαστήρια χωριών ή κοινοτήτων και είναι δυνατή η κατανόηση της λειτουργίας, της συντήρησης και του ελέγχου της από τους ανθρώπους που τη χρησιμοποιούν χωρίς εξειδικευμένη εκπαίδευση.
- Η δημιουργία ενός micro-υδροηλεκτρικού προϋποθέτει τη συλλογική εργασία της κοινότητας για τη βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης, ενώ παράλληλα προσφέρει ευκαιρίες για τη συμμετοχή του τοπικού πληθυσμού σε αλλαγές και βελτιώσεις της τεχνολογίας και της διαδικασίας παραγωγής της.

Όλα αυτά έχουν ως αποτέλεσμα τα micro-υδροηλεκτρικά έργα σε συνδυασμό με την ενδιάμεση τεχνολογία να αποτελούν μία πολύ καλή επιλογή για τη δημιουργία μικρών ηλεκτρικών δικτύων σε φτωχές χώρες και σε περιοχές απομονωμένες όπου είναι δύσκολη και ακριβή η σύνδεση στο κύριο ηλεκτρικό δίκτυο. Ωστόσο, σήμερα λόγω της εξέλιξης της τεχνολογίας και του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού που αυτά χρησιμοποιούν, ενδιαφέρουν πολύ και τις αναπτυσσόμενες χώρες, ως μία εναλλακτική πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

1.3. Η ηλεκτροδότηση αγροτικών περιοχών σε αναπτυσσόμενες χώρες

Στις περισσότερες αναπτυσσόμενες χώρες, υπάρχει ένα μεγάλο κομμάτι πληθυσμού, το οποίο επειδή ζει μακριά από τις μεγάλες πόλεις, δεν έχει πρόσβαση στην ενέργεια. Ιστορικά, οι όποιες προσπάθειες ηλεκτροδότησης των αγροτικών περιοχών που γίναν, δεν εστίαζαν στην αποκεντρωμένη ανάπτυξη. Αντίθετα, το ενδιαφέρον επικεντρωνόταν στην αύξηση της πρόσβασης στον ηλεκτρισμό μέσω της επέκτασης του κεντρικού δικτύου διανομής. Πλέον, η εξέλιξη της τεχνολογίας των micro-υδροηλεκτρικών σταθμών δίνει μια υπόσχεση για μια πιο δίκαιη και παράλληλα οικονομικά βιώσιμη λύση, που δείχνει να μπορεί να εφαρμοσθεί και να εξαπλωθεί πιο γρήγορα σε σχέση με το συμβατικό κεντρικό δίκτυο.

Πλέον, υπάρχουν αρκετά παραδείγματα micro-υδροηλεκτρικών σε αναπτυσσόμενες χώρες, που αποδεικνύουν ότι όταν χρησιμοποιηθούν κατάλληλα είναι μια αποτελεσματική λύση οικονομικά. Σε χώρες όπως η Ινδονησία, το Νεπάλ, η Σρι-Λάνκα έχουν εφαρμοσθεί αξιοποιώντας τη συμμετοχή των τοπικών κοινοτήτων, οι οποίες συντηρούν και διαχειρίζονται τις δικές τους ενεργειακές ανάγκες. Πολύ συχνά σε αυτές τις περιπτώσεις γίνονται προσπάθειες για την προστασία των τοπικών λεκάνων απορροής καθώς αυτή η προστασία βελτιώνει τη σταθερότητα της παροχής, το οποίο οδηγεί σε πιο παραγωγική χρήση του υδροηλεκτρικού. Έτσι, η οικονομική ανάπτυξη της περιοχής προϋποθέτει την εναρμόνιση με το περιβάλλον [6].

1.3.1. Δίκτυο ενίσχυσης micro-υδροηλεκτρικών έργων στη Νότια και Νοτιοανατολική Ασία (Hydro Empowerment Network)

Στην περιοχή της Νότιας και Νοτιοανατολικής Ασίας έχει αναπτυχθεί ένα δίκτυο οργανώσεων, με στόχο την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των κοινοτήτων που ασχολούνται με micro-υδροηλεκτρικά έργα. Αντικείμενό του είναι η ενίσχυση και η εξέλιξη της τεχνολογίας των micro-υδροηλεκτρικών. Έχει ως πρωταρχικές αξίες το σεβασμό προς το ντόπιο πληθυσμό, τη γη και το περιβάλλον. Μέσω της ορθολογικής επέκτασης των micro-υδροηλεκτρικών σταθμών αποβλέπει στην ισότιμη και βιώσιμη ανάπτυξη των αγροτικών κοινοτήτων στη Νότια και Νοτιοανατολική Ασία.

Σήμερα, έχει καταφέρει να παρέχει μια πλατφόρμα δημιουργικής ανταλλαγής γνώσεων για το συγκεκριμένο τεχνολογία. Βασικά ζητήματα που θέτει είναι:

- Η σταθερότητα στην εφαρμογή της τεχνολογίας των micro-υδροηλεκτρικών
- Η άσκηση πολιτικής για βιώσιμες λύσεις και ορθολογική και κοινωνικά δίκαιη επεκτασιμότητα
- Η κατάρτιση των ντόπιων εμπειρογνομόνων, καθώς και η προστασία των λεκάνων απορροής

Επιπλέον, θέλει να εξελίξει το επίπεδο της ανταλλαγής γνώσεων των οργανώσεων σε μια ευρύτερη συνεργασία και καλύτερη επικοινωνία μεταξύ τους [7].

1.3.2. Η δράση της τεχνολογίας των micro-υδροηλεκτρικών στην περιοχή

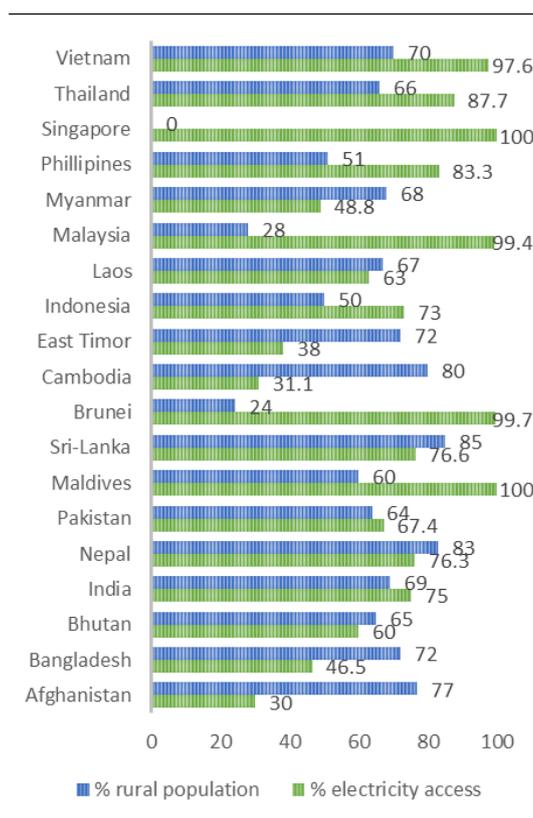
Στην περιοχή της Νότιας και Νοτιοανατολικής Ασίας περισσότεροι από 600 εκατομμύρια άνθρωποι ζουν μέχρι και σήμερα χωρίς ηλεκτρισμό. Το δίκτυο μπορεί να παίξει καθοριστικό ρόλο στην παροχή πρόσβασης στην ενέργεια σε πληθυσμούς που ζουν σε απομακρυσμένες περιοχές, μακριά από το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας τους. Οι micro-

υδροηλεκτρικοί σταθμοί, αν υπάρχουν οι δυνατότητες είναι η πιο ελπιδοφόρα λύση για αυτές τις αγροτικές κοινότητες.

Το παρακάτω σχήμα 1.3 δείχνει την κατάσταση της ηλεκτροδότησης αγροτικών περιοχών στην Νότια και Νοτιοανατολική Ασία και ο πίνακας παρουσιάζει την εγκατεστημένη χωρητικότητα ανά χώρα. Οι micro-υδροηλεκτρικοί σταθμοί που έχουν εγκατασταθεί, ήδη παρέχουν πρόσβαση σε ηλεκτρισμό σε περίπου 1.3 εκατομμύρια νοικοκυριά στην περιοχή, έχοντας εγκαταστήσει χωρητικότητα 154 MW. Παρ' όλα αυτά, όλες αυτές οι προσπάθειες έχουν επιτύχει να παρέχουν ηλεκτροδότηση μόλις σε περίπου 1% του πληθυσμού που δεν είχε πρόσβαση.

Άλλες ενδιαφέρουσες μελέτες:

- 2 στα 10 έργα οργανώσεων είναι χωρίς παραγωγική τελική χρήση
- 7 στις 10 οργανώσεις ακολουθούν «πολύπλευρη» αγροτική ανάπτυξη(integrated rural development)
- 2 στα 10 έργα οργανώσεων είναι οικονομικά βιώσιμα
- 3 στις 10 εκθέσεις-προτάσεις οργανώσεων δεν έχουν κυβερνητική στήριξη
- 3 στις 10 οργανώσεις δεν έχουν κάνει επαρκή εκπαίδευση ικανοτήτων οικοδόμησης κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης των έργων
- Έργα με ισχυρό κίνητρο από τους ντόπιους είναι πιο πιθανό να επιτύχουν
- Δεν υπάρχει κανονιστικό πλαίσιο για διασύνδεση και επικοινωνία μεταξύ των ομάδων



Σχήμα 1.3: Πληθυσμός σε αγροτικές περιοχές και ποσοστό πρόσβασης σε ηλεκτρισμό

<https://drive.google.com/file/d/0BwLnUSTGzaKcUU5FdmFMbElkYVU/view?pli=1>

<http://www.hpnet.org/research.html>

Country	Installed kW
Afghanistan	46450
Bangladesh	60
Bhutan	1480
India	6980
Nepal	25000
Pakistan	27000
Maldives	-
Sri-Lanka	1872
Brunei	-
Cambodia	500
East-Timor	40
Indonesia	21000
Laos	715
Malaysia	178
Myanmar	-
Philippines	1236
Singapore	-
Thailand	1167
Vietnam	20000
Total	153678

Πίνακας 1.1: Εγκατεστημένη ισχύς από micro-υδροηλεκτρικά ανά χώρα

Παρά τα θετικά αυτής της τεχνολογίας, υπάρχουν αρκετοί περιορισμοί και ζητήματα προς διερεύνηση που εμποδίζουν την εφαρμογή της. Έτσι γίνονται έρευνες με στόχο την απόκτηση λεπτομερέστερων πληροφοριών σε σχέση με την κατάσταση, την οικονομική βιώσιμότητα, τις παραγωγικές χρήσεις, τις δυνατότητες οικοδόμησης, τα κίνητρα μιας κοινότητας όπως και άλλα [7],[8].

Υπάρχουν ακόμα πολλά θεσμικά, οικονομικά και τεχνικά θέματα που εμποδίζουν την επέκταση των micro-υδροηλεκτρικών στην περιοχή. Για κάτι τέτοιο απαιτείται:

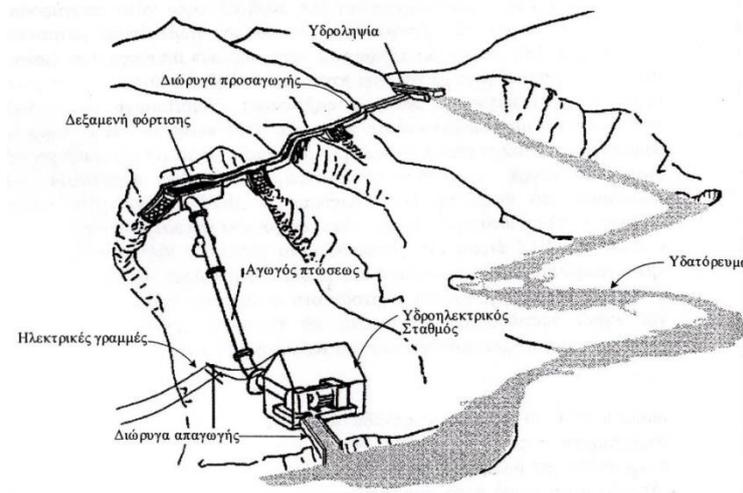
- Περισσότερη συνεργασία μεταξύ των ενδιαφερόμενων
- Ιση κατανομή στα δίκτυα μεταξύ των χωρών
- Μέσα ενημέρωσης και στήριξη από ντόπιους εμπειρογνώμονες
- Ενίσχυση των ντόπιων κατασκευαστών και μηχανικών
- Ενίσχυση της κοινότητας
- Ρύθμιση για βιώσιμη φορολογία
- Χρηματοδότηση έρευνας και ανάπτυξης
- Βάση δεδομένων και απογραφή της κοινότητας των micro-υδροηλεκτρικών
- Καινοτομία και εξέλιξη της τεχνολογίας και των συστημάτων
- Βελτίωση του συντελεστή φορτίου
- Προσαρμογή του εξοπλισμού στα αποθέματα της περιοχής

1.4. Διαμόρφωση micro-υδροηλεκτρικού σταθμού παραγωγής

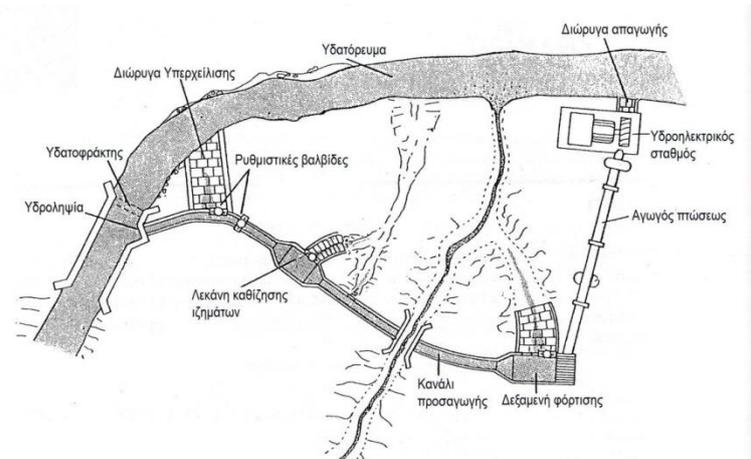
Τα υδροηλεκτρικά έργα μπορούν να έχουν διάφορες μορφές, ανάλογα με την θέση εγκατάστασής τους, την κλίση του εδάφους, τα γεωλογικά χαρακτηριστικά κ.τ.λ. Έτσι, μπορεί είναι υψηλής ή χαμηλής υδατόπτωσης, με μικρό ή μεγαλύτερο αγωγό πτώσεως, με ή χωρίς ανοιχτή ή κλειστή διώρυγα προσαγωγής του νερού στη δεξαμενή φόρτισης. Τα βασικότερα

στοιχεία που απαρτίζουν ένα τυπικό micro-υδροηλεκτρικό σύστημα απεικονίζονται στο σχήμα 1.4(α), ενώ μία πιο λεπτομερής παρουσίασή τους φαίνεται στο σχήμα 1.4(β).

Αρχικά, κατασκευάζεται ένας μικρός υδατοφράκτης/φράγμα κάθετα στη ροή του ποταμού ώστε να επιβραδυνθεί το υδατόρευμα και να μπορέσει ένα μέρος του να εκτραπεί και να εισέλθει στο κανάλι προσαγωγής, το οποίο θα οδηγήσει το νερό στην δεξαμενή φόρτισης. Κατά μήκος του καναλιού, είναι πιθανό να υπάρχει μία λεκάνη καθίζησης των ιζημάτων (τα οποία μπορεί να μεταφέρει το νερό), καθώς και κάποιοι υπερχειλιστές για προστασία της εγκατάστασης, στην περίπτωση επικίνδυνης αύξησης της ροής. Στα πολύ μικρά υδροηλεκτρικά μπορεί να μην υπάρχει λεκάνη καθίζησης και το κανάλι προσαγωγής να είναι αρκετά μικρό σε μήκος. Εν συνεχεία, το νερό συγκεντρώνεται στη δεξαμενή φόρτισης από την οποία μέσω ενός φίλτρου εισέρχεται στον αγωγό πτώσεως ή προσαγωγής. Αυτός μεταφέρει το νερό υπό πίεση στον χώρο του υδροηλεκτρικού σταθμού, ο οποίος αποτελείται από τον υδροστρόβιλο, τη γεννήτρια και τον υπόλοιπο ηλεκτρολογικό εξοπλισμό του σταθμού. Τέλος, το νερό μετά τη διέλευσή του από τον στρόβιλο, οδηγείται μέσω της διώρυγας απαγωγής πίσω στον ποταμό.



(α)



(β)

Σχήμα 1.4: Διαμόρφωση ενός μικρού υδροηλεκτρικού έργου (α), (β) [2]

Οι κύριες συνιστώσες ενός micro-υδροηλεκτρικού παρουσιάζονται πιο αναλυτικά στο δεύτερο κεφάλαιο, ενώ οι υδροστρόβιλοι και οι γεννήτριες είναι αντικείμενα του τρίτου και τέταρτου κεφαλαίου αντίστοιχα.

1.5. Σχεδιασμός και μελέτη micro-υδροηλεκτρικού σταθμού παραγωγής

Κατά τον σχεδιασμό των μικρών υδροηλεκτρικών απαιτούνται πολλά στάδια τεχνικών και οικονομικών μελετών για τη εύρεση της κατάλληλης θέσης για την εγκατάστασή του. Η βιωσιμότητα του κάθε έργου είναι άμεσα εξαρτώμενη από τη θέση του, καθώς η παραγωγή ισχύος εξαρτάται από την παροχή και το ύψος της πτώσης του διαθέσιμου νερού και το ποσό της παραγόμενης ενέργειας εξαρτάται από την ποσότητα του νερού και τη μεταβλητότητα της ροής κατά τη διάρκεια του έτους. Για την ακρίβεια, η ισχύς P στην έξοδο ενός υδροηλεκτρικού σταθμού δίνεται από τον τύπο:

$$P = n_t \rho Q g H \quad (1.1)$$

όπου

n_t : η συνολική απόδοση του υδροηλεκτρικού σταθμού (ισούται με το γινόμενο των βαθμών απόδοσης των επιμέρους τμημάτων του υδροηλεκτρικού σταθμού)

$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$: η πυκνότητα του νερού

$Q [\text{m}^3/\text{sec}]$: η παροχή νερού στον υδροστρόβιλο

$g = 9,8 \text{ m/sec}^2$: η επιτάχυνση της βαρύτητας

$H [\text{m}]$: το ύψος υδατόπτωσης ή υδραυλικό ύψος, που είναι ίσο με την κάθετη υψομετρική διαφορά της δεξαμενής φόρτισης με τον υδροστρόβιλο.

Η μελέτη σχεδιασμού είναι ουσιαστικά μία επαναληπτική διαδικασία κατά την οποία συγκρίνονται συνεχώς τα κέρδη και τα κόστη του έργου, καθώς επίσης περιλαμβάνει διάφορες φάσεις, η έκταση και η εμβάθυνση των οποίων εξαρτώνται σημαντικά από τον χαρακτήρα και το μέγεθος της εγκατάστασης. Αρχικός σκοπός της μελέτης είναι η διαπίστωση του εάν η εξεταζόμενη θέση αξίζει περισσότερης διερεύνησης και εν συνεχεία η διαμόρφωση και η διαστασιολόγηση, όπως αυτές προκύπτουν από την εξέταση και ανάλυση διαφόρων εναλλακτικών λύσεων. Το τελευταίο στάδιο της μελέτης περιλαμβάνει σύνταξη των σχεδίων, των υπολογισμών, των αποτελεσμάτων οικονομικής ανάλυσης και των προδιαγραφών του απαραίτητου εξοπλισμού.

Ακολούθως παρατίθενται συνοπτικά τα στάδια της διαδικασίας μελέτης μιας micro-υδροηλεκτρικής εγκατάστασης:

1. Αναγνώριση της περιοχής και της ζήτησης

Στο στάδιο αυτό, καθορίζεται το κατά πόσο υπάρχει ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος στην περιοχή, τι ανάγκες θα πρέπει να ικανοποιηθούν, πιθανοί καταναλωτές /αγοραστές και το αν είναι διαθέσιμο ή όχι κάποιο εξωτερικό δίκτυο ηλεκτρικής ισχύος. Επίσης, περιλαμβάνει έρευνα και προσδιορισμό των οργανωτικών και τεχνικών ικανοτήτων των κατοίκων, καθώς και της

υποδομής και των τοπικών παραδοσιακών τεχνικών, ώστε να συμπεριληφθούν όσες μπορούν στον τρόπο υλοποίησης του έργου, αλλά και να ανιχνευθούν οι πιθανές δυσκολίες και τα κενά που πρέπει να καλυφθούν με εκπαίδευση των κατοίκων που θα εργαστούν για την κατασκευή και λειτουργία του.

Παράλληλα, στο πρώτο στάδιο σχεδιάζεται η αρχική διάταξη και χωροθέτηση του έργου, η καταγραφή των τοπικών συνθηκών, των άλλων ανταγωνιστικών χρήσεων νερού και η μελέτη των γεωλογικών συνθηκών. Επίσης, προσδιορίζεται και το διαθέσιμο ύψος υδατόπτωσης (ή υδραυλικό ύψος) με χρήση και χαρτών, αλλά κυρίως με μετρήσεις στο σημείο πιθανής εγκατάστασης του έργου. Είναι σημαντικό να υπάρχει ακρίβεια στη μέτρηση του υδραυλικού ύψους και για τον λόγο αυτό συνδυάζονται συνήθως διαφορετικές μέθοδοι μετρήσεων, ώστε το αποτέλεσμα να είναι πιο αξιόπιστο. Τα βασικά χαρακτηριστικά των μεθόδων αυτών φαίνονται στον πίνακα 1.2.

Μέθοδος	Κόστος	Ακρίβεια	Δυσκολία	Απαιτούμενος χρόνος	Απαραίτητος εξοπλισμός	Ελάχιστα άτομα
Μέθοδος σωλήνα	Χαμηλό	Υψηλή	Όχι δύσκολη	3 έως 6 ώρες	Πλαστικός σωλήνας, ταινία μεζούρας, ξύλινες τάπες	2
Μετρητής υψομέτρου	Μεσαίο έως υψηλό	Απόκλιση $\pm 1m$ έως $\pm 5m$	Όχι δύσκολη	Εώς 1 ώρα	Ψηφιακό όργανο μέτρησης ύψους	1
Κλισιόμετρο	Αρκετά χαμηλό	Υψηλή	Απαιτείται εμπειρία	Εώς και 2 ώρες	Κλισιόμετρο Abney, μακριά ταινία μεζούρας, 2 ράβδους ίσου δεδομένου ύψους	2

Πίνακας 1.2: Μέθοδοι μέτρησης του διαθέσιμου ύψους υδατόπτωσης [10]

2. Υδρολογική μελέτη

Στο στάδιο αυτό, προσδιορίζεται το υδραυλικό δυναμικό της περιοχής με λήψη μετρήσεων της ροής του ποταμού καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, αλλά και με τη συλλογή και αξιολόγηση υπαρχόντων υδρολογικών στοιχείων και συγκεκριμένων χρονοσειρών παροχής. Όταν δεν υπάρχουν επαρκή υδρολογικά στοιχεία, γίνεται προσεγγιστική εκτίμηση αυτών, συνεκτιμώντας στοιχεία από τη συγκεκριμένη λεκάνη απορροής, από γειτονικές λεκάνες και από σχόλια και παρατηρήσεις των κατοίκων της περιοχής. Η ακρίβεια με την οποία πρέπει να υπολογιστεί η τιμή της παροχής εξαρτάται από τη θέση της εγκατάστασης.

Η μέτρηση της ροής του ποταμού από τον μελετητή πρέπει να επαναληφθεί κάποιες φορές στη διάρκεια του έτους, ώστε να προσδιορίζονται αξιόπιστα οι διακυμάνσεις της κατά τη χειμερινή και θερινή περίοδο. Για τη μέτρηση της παροχής, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τρεις μέθοδοι, τα βασικά χαρακτηριστικά των οποίων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Μέθοδος	Κόστος	Ακρίβεια	Δυσκολία	Απαιτούμενος χρόνος	Απαραίτητος εξοπλισμός	Ελάχιστα άτομα
---------	--------	----------	----------	---------------------	------------------------	----------------

Μέθοδος δοχείου (κατάλληλη μόνο για $Q < 10$ l/sec)	Αμελητέο	μεσαία	δύσκολη	10 λεπτά	Δοχείο και χρονοόμετρο	2
Μέθοδος float	Αμελητέο	Μεσαία για ομαλή ροή ποταμού παράλληλη στην όχθη	Όχι δύσκολη	30 λεπτά	Ξύλινο κομμάτι, μεζούρα, χρονοόμετρο	2
Μέθοδος ανάλυσης αλατιού	Σχετικά υψηλό	Μεσαία έως υψηλή	Απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή	10 λεπτά	Μετρητής αγωγιμότητας, δοχείο, υπολογιστής, ζυγισμένες ποσότητες αλατιού	1

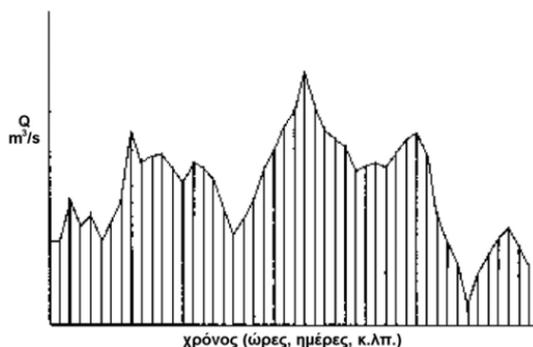
Πίνακας 1.3: Μέθοδοι μέτρησης της ροής του ποταμού [10]

Για να μετρηθεί η ροή σύμφωνα με τη μέθοδο του δοχείου, το δοχείο τοποθετείται σε τέτοιο σημείο ώστε η παροχή του νερού να κατευθύνεται μέσα σε αυτό και χρονομετρείται το πόσο γρήγορα θα γεμίσει. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται τουλάχιστον τρεις φορές και βρίσκεται η μέση τιμή των αποτελεσμάτων. Η διαίρεση του όγκου του δοχείου με τον μέσο χρόνο γεμίματός του δίνει την τιμή της παροχής.

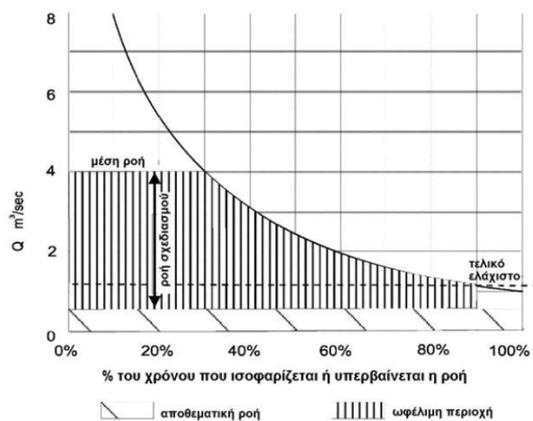
Για τον υπολογισμό της παροχής με τη μέθοδο float, είναι απαραίτητη η γνώση της ταχύτητας και της διατομής της ροής, η οποία είναι ίση με το γινόμενο του πλάτους του ρεύματος του νερού επί το βάθος του. Η ταχύτητα υπολογίζεται μετρώντας τον χρόνο που απαιτείται για να διανύσει ένα ξύλινο κομμάτι που επιπλέει μία γνωστή απόσταση, και διαιρώντας την απόσταση αυτή με τον αντίστοιχο χρόνο. Πάλι η διαδικασία μέτρησης και των διαστάσεων της ροής και της ταχύτητας επαναλαμβάνεται και βρίσκεται η μέση τιμή κάθε μεγέθους. Τελικά η παροχή δίνεται από το γινόμενο της μέσης ταχύτητας επί τη μέση διατομή επί ένα διορθωτικό συντελεστή που έχει σχέση με την ταχύτητα.

Για την υλοποίηση της τελευταίας μεθόδου, μία γνωστή ποσότητα αλατιού ρίχνεται σε ένα δοχείο με νερό μέχρι να διαλυθεί πλήρως και στη συνέχεια το δοχείο αδειάζει μέσα στο κανάλι του ποταμού. Σε απόσταση 20 - 30 μέτρων κατάντι της ροής τοποθετείται ο ψηφιακός μετρητής αγωγιμότητας με τον δέκτη του βυθιζόμενο στο μισό περίπου βάθος του ποταμού, και αφού πρώτα έχει μετρηθεί η αγωγιμότητα του νερού χωρίς την παρουσία του αλατιού. Το αλμυρό νερό όσο κινείται κατά μήκος του ποταμού διασπείρεται καθ' όλο το βάθος και το πλάτος του ποταμού. Έτσι σχηματίζει ένα «σύννεφο» αλμυρού νερού με ασθενές σε περιεκτικότητα αλατιού αρχικό και τελευταίο μέρος κι ένα υψηλής περιεκτικότητας μεσαίο μέρος. Η περιεκτικότητα σε αλάτι μπορεί να προσδιοριστεί μέσω μέτρησης της αγωγιμότητας του νερού. Αν η ροή του ποταμού είναι χαμηλή, τότε το αλμυρό νερό θα αργήσει να ανιχνευθεί και η μετρούμενη τιμή αγωγιμότητας θα είναι υψηλή, αφού αυτό δεν θα έχει διαλυθεί αρκετά κατά τη ροή του στον ποταμό.

Με το τέλος της υδρολογικής μελέτη έχουν συγκεντρωθεί αρκετά στοιχεία, ώστε να μπορεί να σχεδιαστεί ένα υδατογράφημα και μία καμπύλη διάρκειας ροής, όπως αυτά που φαίνονται στα σχήματα 1.5 και 1.6. Η καμπύλη διάρκειας ροής παρουσιάζει το ποσοστό του χρόνου κατά τον οποίο η απορροή γίνεται ίση ή μεγαλύτερη κάποιας τιμής. Πρέπει να σημειωθεί ότι δε μπορεί να αξιοποιηθεί όλη αυτή η ροή του ποταμού παρά μόνο η ωφέλιμη, η οποία προκύπτει μετά από αφαίρεση της αποθεματικής ροής από τη συνολική ώστε να επιτρέπεται η συνέχιση της φυσικής ροής ανά πάσα στιγμή [2].



Σχήμα 1.5: Τυπικό υδατογράφημα



Σχήμα 1.6: Τυπική καμπύλη διάρκειας της ροής

3. Έρευνα αγοράς και διαθεσιμότητα

Στο στάδιο αυτό δεν είναι δυνατόν να γίνει ακόμα μια πλήρης τεχνοοικονομική ανάλυση της εγκατάστασης. Γίνεται ωστόσο μία έρευνα αγοράς ως προς το κόστος των σωλήνων της εγκατάστασης, του υδροστροβίλου, της γεννήτριας και του ελεγκτή της, τα οποία αποτελούν συνήθως τα πιο ακριβά στοιχεία της εγκατάστασης.

4. Υπολογισμός της παραγόμενης ισχύος

Ανάλογα με τους συνδυασμούς υδραυλικών υψών και παροχών, που είναι δυνατό να επιτευχθούν, υπολογίζεται η παραγόμενη ισχύς της εγκατάστασης και κρίνεται αν είναι επαρκής ή όχι για τη λειτουργία μίας micro ή pico υδροηλεκτρικής εγκατάστασης. Για να γίνει αυτό, πρέπει παράλληλα να υπολογιστούν οι απαιτήσεις της εγκατάστασης, δηλαδή η ελάχιστη ηλεκτρική ισχύς που πρέπει να παράγεται από τη γεννήτρια της εγκατάστασης, ώστε να λειτουργούν στο επιθυμητό επίπεδο όλες οι συσκευές που θα συνδεθούν και θα τροφοδοτηθούν από αυτήν.

5. Μέγεθος και κόστος γεννήτριας

Ανάλογα με τις απαιτήσεις της εγκατάστασης που υπολογίστηκαν στο τέταρτο στάδιο υπολογίζεται το μέγεθος της γεννήτριας και στη συνέχεια, με χρήση των στοιχείων που συγκεντρώθηκαν στο τρίτο στάδιο, το κόστος της.

6. Προκαταρκτικός έλεγχος οικονομικής βιωσιμότητας

Ανάλογα με την εκτίμηση της παραγόμενης ισχύος και των απαιτήσεων της εγκατάστασης επιλέγεται ο βέλτιστος σχεδιασμός και συγκρίνονται τα ετήσια έσοδα με το κόστος του κεφαλαίου της επένδυσης. Εάν οι ετήσιες αποδοχές είναι λιγότερες από το 10% του κόστους του αρχικού κεφαλαίου, τότε η επένδυση κρίνεται ως μη βιώσιμη. Εάν τα έσοδα κυμαίνονται από το 10 ως το 25% του αρχικού κεφαλαίου, τότε η επένδυση είναι μάλλον εφικτή. Τέλος, αν οι ετήσιες αποδοχές ξεπερνούν το 25% του αρχικού κεφαλαίου, η επένδυση κρίνεται ανεπιφύλακτα ως βιώσιμη.

Στο στάδιο αυτό, ο μελετητής θα πρέπει να αναζητήσει και άλλους εναλλακτικούς τρόπους κάλυψης των αναγκών των κατοίκων σε ηλεκτρική ενέργεια, όπως μία πιθανή επέκταση του κεντρικού ηλεκτρικού δικτύου και σύνδεση σε αυτό ή η χρήση κάποιας ντιζελογεννήτριας και να

τις συγκρίνει με τη λύση εγκατάστασης του υδροηλεκτρικού, ώστε να είναι σίγουρος ότι αυτή είναι η πιο επικερδής.

7. Υδραυλικό ύψος και παροχή

Στο στάδιο αυτό επιλέγεται ο κατάλληλος συνδυασμός παροχής και ύψους υδατόπτωσης, ώστε να παράγεται η απαιτούμενη ισχύς από το σύστημα υδροστροβίλου-γεννήτριας. Επίσης, πρέπει να προσδιοριστεί προσεγγιστικά ο βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης. Εάν υπάρχουν αμφιβολίες τίθεται ολικός βαθμός απόδοσης (για τη συνολική μετατροπή ισχύος από υδραυλική σε ηλεκτρική) ίσος με 50%.

8. Επιλογή τελικής τιμής ισχύος εξόδου

Εκτιμάται το οριστικό μέγεθος της γεννήτριας που θα χρησιμοποιηθεί, βάσει των δεδομένων για το υδραυλικό δυναμικό της εγκατάστασης που έχει υπολογιστεί κατά τα πρώτα στάδια. Πρέπει στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι μερικές φορές είναι προτιμότερο να διατηρηθεί το μέγεθος της γεννήτριας μικρότερο, όπως είχε εκτιμηθεί αρχικά, ακόμα κι αν οι δυνατότητες της εγκατάστασης φαίνονται μεγαλύτερες. Αυτό γίνεται επειδή το κόστος της μικρότερης εγκατάστασης είναι πολύ χαμηλότερο από αυτό κάποιας μεγαλύτερης κι επειδή στην περίπτωση που έχει γίνει κάποιο λάθος στους υπολογισμούς μέχρι αυτό το σημείο είναι έτσι ευκολότερο να διορθωθεί.

9. Σχεδιασμός της εγκατάστασης

Κατασκευάζονται τα σχέδια και ο χάρτης της εγκατάστασης, όπου συμπεριλαμβάνονται όλα τα στοιχεία της, οι διαστάσεις και η διάταξή τους, όπως τα μήκη των αγωγών, τα κανάλια νερού με τις θέσεις τους, το κτίριο της μονάδας κ.τ.λ.

10. Εναλλακτικές λύσεις

Στο στάδιο αυτό, διερευνάται η ύπαρξη εναλλακτικών λύσεων ως προς τη σχεδίαση του έργου, όπως η αλλαγή θέσης ενός αγωγού, και το κατά πόσο αυτές θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε χαμηλότερο κόστος ή ευνοϊκότερη λειτουργία της εγκατάστασης.

11. Λεπτομερής υπολογισμός κόστους

Υπολογίζεται αναλυτικά το κόστος κάθε στοιχείου του micro-υδροηλεκτρικού σταθμού και προσδιορίζεται το συνολικό κόστος κατασκευής και εγκατάστασής του, κάνοντας και μία μικρή προσαύξησή του, ώστε να συνυπολογιστούν και κάποιο απρόβλεπτα έξοδα που είναι πιθανό να προκύψουν. Επίσης, θα πρέπει να έχει συμπεριληφθεί στο αρχικό η προμήθεια ανταλλακτικών για εξαρτήματα και εξοπλισμό με τη μεγαλύτερη πιθανότητα βλάβης.

12. Έλεγχος οικονομικής βιωσιμότητας

Βάση της τελικής ακριβέστερης τιμής του κόστους εγκατάστασης, διερευνάται αν η επένδυση εξακολουθεί να είναι οικονομικά βιώσιμη. Αν όχι, θα πρέπει να επανεξετασθούν τα στοιχεία που προκάλεσαν την παραπάνω οικονομική επιβάρυνση και να γίνουν βελτιώσεις.

13. Εκπαίδευση του προσωπικού

Στο στάδιο αυτό είναι σημαντικό να προετοιμασθούν και να εκπαιδευθούν τα μέλη της κοινότητας που θα απασχοληθούν για τη λειτουργία και τη διαχείριση του έργου. Πρέπει αφενός να εξοικειωθούν με τη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία και τον εξοπλισμό ώστε να μπορούν αν επιδιορθώσουν πιθανές βλάβες αλλά και να συντηρήσουν σωστά τη εγκατάσταση και αφετέρου,

αν αποκτήσουν οργανωτικές και διαχειριστικές ως προς τα οικονομικά μεγέθη ιδιότητες, ώστε το έργο αυτό να αποτελέσει την αρχική πηγή εξέλιξης και ανάπτυξης της κοινωνίας.

14. Παραγγελία υλικών, απαραίτητου εξοπλισμού και εγκατάσταση

Στο σημείο αυτό, μπορεί πλέον να γίνει η αγορά των υλικών και του απαραίτητου εξοπλισμού για τη λειτουργία και να γίνει η εγκατάστασή τους σύμφωνα με τον αναλυτικό σχεδιασμό, που έχει γίνει στο 9ο στάδιο. Αφού ελεγχθεί η θέση και η σωστή τοποθέτηση όλων των επιμέρους στοιχείων, ο micro-υδροηλεκτρικός σταθμός τίθεται σε λειτουργία [3],[4].

Η επιλογή και διαστασιολόγηση του αγωγού προσαγωγής, του υδροστροβίλου και της γεννήτριας, καθώς και η διερεύνηση του καταλληλότερου τρόπου σύνδεσης της μονάδας παρουσιάζονται εκτενέστερα στα επόμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας.

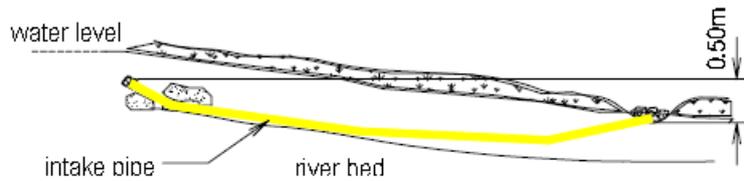
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο : ΚΥΡΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΙΑΣ MICRO /PICO – ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

2.1. Σύστημα εισόδου του νερού

Στόχος του συστήματος εισόδου του νερού είναι η εκτροπή του απαιτούμενου μέρους της ροής του νερού και η ελεγχόμενη είσοδος του στην υδροηλεκτρική εγκατάσταση. Ο έλεγχος της ροής του νερού που εισέρχεται στην εγκατάσταση θα πρέπει να οριοθετεί ένα αποδεκτό εύρος τιμών, είτε ο ποταμός εμφανίζει υψηλή είτε χαμηλή ροή. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να προστατευθεί η εγκατάσταση σε περίπτωση πλημμύρας, αλλά παράλληλα το σύστημα εισόδου θα πρέπει να είναι σωστά τοποθετημένο ώστε να εξασφαλίζεται η απαραίτητη ροή τους καλοκαιρινούς μήνες κατά την οποία η ροή του νερού στον ποταμό είναι πιθανότατα ελάχιστη. Επίσης, είναι απαραίτητη η ύπαρξη δυνατότητας αρχικού φιλτραρίσματος του νερού ώστε να εμποδίζεται η είσοδος πετρών και γενικότερων φερτών υλών του νερού που μπορούν αργότερα να μπλοκάρουν τους σωλήνες και να προκαλέσουν ζημιά [3]. Τέλος, το σύστημα εισόδου του νερού θα πρέπει να είναι κατασκευασμένο ώστε να είναι φιλικό προς το περιβάλλον, δηλαδή να μην εμποδίζει την πιθανή πορεία ψαριών στο ποτάμι και γενικότερα να αλλοιώνει το τοπικό οικοσύστημα. Το σύστημα εισόδου του νερού μπορεί ανάλογα με τις συνθήκες να υλοποιηθεί με πολλούς διαφορετικούς τρόπους.

- Σύστημα εισόδου του νερού χωρίς υδατοφράκτη

Αυτό το σύστημα εισόδου μπορεί να υλοποιηθεί στην περίπτωση που υπάρχει άφθονη ροή σε μικρό ποτάμι καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Σε αυτήν την περίπτωση τοποθετείται ένας σωλήνας εντός του ποταμού αντίθετα στη ροή. Το στόμιο εισόδου μπορεί να είναι τοποθετημένο είτε στον βυθό του ποταμού ελαφρώς ανυψωμένο και σταθεροποιημένο με πέτρες όπως στο σχήμα 2.1, είτε να βρίσκεται 30 με 50 εκατοστά κάτω από την επιφάνεια του νερού στερεωμένο με ένα γερό σχοινί ή σύρμα. Το στόμιο εξόδου του σωλήνα μπορεί να συνδέεται είτε με τον κανάλι προσαγωγής του νερού στη δεξαμενή φόρτισης είτε κατευθείαν με τον αγωγό προσαγωγής του νερού στον υδροστροβίλο.



Σχήμα 2.1: Σύστημα εισόδου νερού με σωλήνα εισόδου τοποθετημένο στον πάτο του ποταμού. Το μήκος του σωλήνα ίσως χρειαστεί να είναι μεγάλο για να διασφαλιστεί ότι η είσοδός του θα βρίσκεται ψηλότερα από την έξοδό του στο κανάλι [10].

Η λύση αυτή είναι φθηνή και απλή και οποιαδήποτε φθορά προκληθεί από πλημμύρα είναι εύκολο να αποκατασταθεί. Ο σωλήνας είναι κατά κανόνα εφοδιασμένος με φίλτρο στη είσοδό του, ώστε να μην εισέρχονται πέτρες, λάσπη και γενικότερα στοιχεία που μπορούν να μπλοκάρουν τη λειτουργία του στροβίλου. Ένα μειονέκτημα του συγκεκριμένου συστήματος υδροληψίας είναι η ανάγκη για συχνό καθαρισμό του φίλτρου, ιδίως κατά την εποχή των πρώτων βροχοπτώσεων για την απομάκρυνση φύλλων και φερτών υλών. Χρησιμοποιείται συχνά σε μικρά ποτάμια λόγω του μικρού κόστους των απαιτούμενων υλικών και της απλότητας της κατασκευής [10],[2].

- Σύστημα εισόδου του νερού με μικρό υδατοφράκτη

Μία ακριβότερη αλλά αποδοτική λύση είναι η κατασκευή ενός μικρού υδατοφράκτη, ο οποίος θα επιβραδύνει λίγο τη ροή του νερού του ποταμού και θα αυξάνει τη συγκέντρωσή του στο σημείο υδροληψίας, διευκολύνοντας την εκτροπή του και επιτρέποντας την αξιοποίηση και των πιο χαμηλών τιμών ροής.

Τα στάδια για τον σχεδιασμό του συστήματος υδροληψίας είναι τα εξής:

1. Υπολογισμός της μέγιστης ροής, που είναι πιθανό να παρουσιαστεί κατά τη διάρκεια πλημμύρας τα επόμενα είκοσι χρόνια
2. Υπολογισμός του ύψους των πλευρικών τοιχείων, που θα προστατέψουν το κανάλι από την είσοδο ορμητικού νερού κατά τη διάρκεια πλημμύρας
3. Υπολογισμός των διαστάσεων του στομίου του καναλιού, ώστε υπό κανονικές συνθήκες να διοχετεύεται η κατάλληλη ροή στο κανάλι.
4. Υπολογισμός του πλάτους και εν συνεχεία της κλίσης του αρχικού μέρους του καναλιού, ώστε το νερό να κυλάει με τέτοια ταχύτητα που να συμπαρασύρει τη λάσπη και τις υπόλοιπες φερτές ύλες στη λεκάνη καθίζησης, αλλά να μην προκαλεί σημαντική διάβρωση στο κανάλι.
5. Υπολογισμός της μέγιστης ροής που μπορεί να διοχετευθεί στο κανάλι και της ροής που θα διέλθει από αυτό σε περίπτωση πλημμύρας, ώστε να μπορούν μετά να διαστασιοποιηθούν και τα πλευρικά του τοιχώματα
6. Κοστολόγηση του έργου για το σύστημα υδροληψίας και επανάληψη της διαδικασίας με αλλαγές μεγεθών, όπως το μήκος του υδατοφράκτη με σκοπό την εύρεση οικονομικότερα βέλτιστης λύσης.

Για περισσότερα στοιχεία για την κατασκευή ενός υδατοφράκτη, ο αναγνώστης παραπέμπεται στην αναφορά [3].

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι κατασκευής ενός συστήματος εισόδου νερού με υδατοφράκτη, οι περισσότεροι από τους οποίους παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους.



Σχήμα 2.2: Μικρός υδατοφράκτης

- Μικρός υδατοφράκτης και εκτροπή του νερού σε ανοιχτό κανάλι

Το κανάλι στο οποίο εισέρχεται το εκτρεπόμενο νερό είναι ουσιαστικά το πρώτο μέρος της διώρυγας προσαγωγής (πριν τη λεκάνη καθίζησης) το οποίο χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα γρήγορη ροή του νερού.

- Σύστημα υδροληψίας με μικρό υδατοφράκτη και έναν απλό σωλήνα

Κάποιες φορές στα pico-υδροηλεκτρικά έργα, το κανάλι προσαγωγής και η λεκάνη καθίζησης παραλείπονται και αντ' αυτών υπάρχει ένας εύκαμπτος σωλήνας ο οποίος ξεκινάει από τον υδατοφράκτη και είτε καταλήγει στη δεξαμενή φόρτισης, είτε αποτελεί ο ίδιος τον σωλήνα πτώσεως.

- Σύστημα υδροληψίας με μικρό υδατοφράκτη και ένα κουτί με φίλτρα (Screen box)

Αυτό το σύστημα υδροληψίας συνδυάζει την κατασκευή ενός μικρού υδατοφράκτη με ένα κουτί εφοδιασμένο με φίλτρα μέσω του οποίου εισέρχεται το νερό στην υδροηλεκτρική εγκατάσταση.

- Σύστημα υδροληψίας με μικρό υδατοφράκτη και έναν κυλινδρικό διάτρητο κάδο (Pond bucket)

Σε αυτό το σύστημα υδροληψίας, το νερό εισέρχεται στην υδροηλεκτρική εγκατάσταση μέσω ενός διάτρητου κυλινδρικού κάδου με χωρητικότητα εξαρτώμενη από την επιθυμητή παροχή.

- Σύστημα υδροληψίας με μικρό υδατοφράκτη και έναν υπερχειλιστή με φίλτρο προς αξιοποίηση του φαινομένου Coanda (Spillway with Coanda-Effect Screen)

Το συγκεκριμένο σύστημα υδροληψίας περιλαμβάνει την κατασκευή ενός υδατοφράκτη με υπερχειλιστή με φίλτρο με τριγωνικές σχισμές που αξιοποιεί το φαινόμενο Coanda. Το φαινόμενο Coanda αποτελεί την τάση ενός ρεύματος ρευστού να μένει σε επαφή κατά την πορεία του σε μία κυρτή επιφάνεια, από το να ακολουθήσει μία πορεία σε ευθεία γραμμή όπως η αρχική του. Ένα μέρος του νερού που ρέει μέσω του υπερχειλιστή διοχετεύεται στον σωλήνα προσαγωγής του νερού στον υδροστρόβιλο, ενώ το υπόλοιπο συνεχίζει τη ροή του

στον ποταμό συμπαρασύροντας τις φερτές ύλες που έχουν κατακάτσει στο φίλτρο και καθαρίζοντάς το.

Για περισσότερες πληροφορίες για τα διάφορα συστήματα υδροληψίας που χρησιμοποιούνται στα micro-υδροηλεκτρικά έργα, ο αναγνώστης παραπέμπεται στην αναφορά [11].

2.2. Διώρυγα προσαγωγής

Η διώρυγα ή κανάλι προσαγωγής οδηγεί το νερό από το σύστημα υδροληψίας στην λεκάνη καθίζησης και εν συνεχεία στη δεξαμενή φόρτισης. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της τοποθεσίας, ένα κανάλι μπορεί να αποτελέσει μία φθηνή λύση για τη μεταφορά του νερού σε ένα καλύτερο σημείο εγκατάστασης της δεξαμενής όρτισης, αφού έτσι θα μειωθεί και το απαιτούμενο μήκος του σωλήνα πτώσεως.

Σχεδιάζοντας ένα κανάλι προσαγωγής και τη διαδρομή του, υπάρχουν πολλά σημεία στα οποία θα πρέπει να δοθεί προσοχή και ποικίλοι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Είναι απαραίτητο να γίνουν γεωλογικές μελέτες και τα σημαντικότερα κριτήρια για την επιλογή των χαρακτηριστικών του καναλιού αποτελούν ο τύπος εδάφους, η απαιτούμενη ενίσχυση για τη στήριξη του καναλιού, το κόστος των μεταφερόμενων υλικών (όπως το τσιμέντο), η απαιτούμενη ροή νερού, καθώς και οι παράλληλες χρήσεις του. Το κανάλι που θα κατασκευαστεί πρέπει να είναι ανθεκτικό, να μπορεί να υποστηρίξει ροή λίγο μεγαλύτερη από την απαιτούμενη για κανονική λειτουργία, ώστε να αντέχει σε περιόδους βροχοπτώσεων, να μην παρουσιάζει διαρροή, μεγάλη τριβή και σημαντικές απώλειες. Επίσης, πρέπει η κλίση του να είναι τέτοια ώστε η ταχύτητα της ροής του νερού να μην είναι τόσο μεγάλη που να προκαλεί διάβρωση, αλλά ούτε και τόσο μικρή που να επιτρέπει την κατακάθιση ιζημάτων και φερτών υλών.



Σχήμα 2.3: Κανάλι προσαγωγής

2.2.1. Σχεδίαση της διώρυγας προσαγωγής

Η σχεδίαση της διώρυγας περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της εγκάρσιας διατομής, των διαστάσεων, και της κλίσης της και γίνεται συναρτήσεως της προβλεπόμενης ροής, της απαιτούμενης ταχύτητας του νερού και της τραχύτητας του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένη.

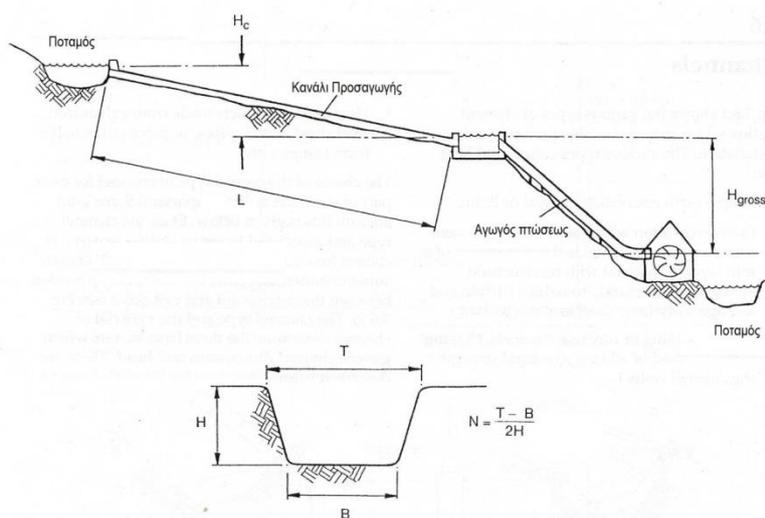
Η ροή του νερού Q σε ένα κανάλι εξαρτάται από την ταχύτητα v του νερού και την εγκάρσια διατομή του ρεύματος του νερού A που διαρρέει το κανάλι, σύμφωνα με τον τύπο (2.1):

$$Q = v A \quad (2.1)$$

Η ταχύτητα του νερού που διαρρέει το κανάλι εξαρτάται από την κλίση του s και από την τραχύτητα της επιφάνειάς του (η οποία προσδιορίζεται από τον συντελεστή τραχύτητας n χαρακτηριστικό για κάθε υλικό). Επίσης, η τιμή της πρέπει να διατηρείται πάνω από μία ελάχιστη τιμή για να αποτραπεί η ιζηματοπόθεση και η ανάπτυξη υδρόβιων φυτών, αλλά κάτω από μία μέγιστη τιμή ώστε να αποφευχθεί η διάβρωση. Το κάτω όριο της ταχύτητας για τη διατήρηση των ιζημάτων σε αιώρηση μετά την είσοδό τους στο κανάλι είναι $0,3\text{m/sec}$. Αν το νερό είναι καθαρό, το όριο αυτό δεν έχει σημασία. Μικρή ταχύτητα νερού συνεπάγεται μικρή κλίση της ευθείας του καναλιού, μικρή υψομετρική διαφορά μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του καναλιού κι επομένως εξασφάλιση του μέγιστου δυνατού ύψους υδατόπτωσης για τον αγωγό πτώσεως.

Η εγκάρσια διατομή του καναλιού, η οποία είναι συνήθως τραπεζοειδής, πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την εγκάρσια διατομή του ρεύματος του νερού που αντιστοιχεί στην σχεδιαζόμενη για τον υδροστρόβιλο παροχή. Το επιπλέον ύψος που δίνεται στο κανάλι ως περιθώριο ασφαλείας F αντιστοιχεί σε ένα ποσοστό 30% του αρχικού και μειώνει τον κίνδυνο καταστροφής των τοιχωμάτων του από κάποια υπερχειλίση. Το πλάτος του καναλιού πρέπει να είναι μεγάλο σε σχέση με το βάθος του και τα πλευρικά του τοιχώματα πρέπει να έχουν κλίση προς τα έξω, ώστε να αποφεύγεται η διάβρωσή και τελικά η κατάρρευσή τους.

Όταν το νερό ρέει μέσα στο κανάλι, υπάρχουν απώλειες ενέργειας λόγω της επαφής του με τα τοιχώματα και τον πάτο του καναλιού. Όσο πιο τραχύ είναι το υλικό που χρησιμοποιείται στην κατασκευή του, τόσο μεγαλύτερη πρέπει να είναι η κλίση του καναλιού για μία δεδομένη ταχύτητα. Η τραχύτητα είναι ενδεικτική των υδραυλικών απωλειών οι οποίες αντιστοιχούν σε μείωση του τελικού διαθέσιμου υδραυλικού ύψους. Επομένως, είναι καλό να χρησιμοποιούνται υλικά με όσο το δυνατόν πιο ομαλή και λεία επιφάνεια για την επικάλυψη του καναλιού [3],[10].



Σχήμα 2.4: Κανάλι προσαγωγής με τις διαστάσεις του [3].

Τα απαραίτητα μεγέθη για την εκκίνηση της διαδικασίας διαστασιολόγησης ενός καναλιού (όπως αυτό του σχήματος 2.4) είναι το μήκος του και το υλικό κατασκευής του, το οποίο το επιλέγει ο μελετητής. Εν συνεχεία, πρέπει να επιλεγεί η κατάλληλη ταχύτητα ροής του νερού, σύμφωνα με τους προαναφερόμενους περιορισμούς και η κλίση των πλευρικών τοιχωμάτων N σε συνάρτηση με το υλικό που χρησιμοποιείται καθώς και να γίνει μία εκτίμηση της τραχύτητας n του υλικού αυτού. Η τιμή της κλίσης μπορεί να επιλεγεί με τη βοήθεια του πίνακα 2.1, ενώ ο συντελεστής τραχύτητας n των διαφόρων υλικών μπορεί να βρεθεί με τον ίδιο τρόπο σε πίνακες από σχετική βιβλιογραφία.

Υλικό	Πλευρική κλίση N
Τραπεζοειδής διατομή	
Αμμώδες έδαφος	2
Κανάλι ενισχυμένο με αργιλώδη πηλό	1
Κανάλι ενισχυμένο με τσιμέντο	0.58
Ορθογωνική διατομή	0

Πίνακας 2.1: Κλίση πλευρικών τοιχωμάτων καναλιού [3].

Ακολουθώς, επιλέγεται το περιθώριο δυνατής αύξησης της παροχής F χωρίς την ύπαρξη κινδύνου για το κανάλι. Συνήθως θεωρείται $F=1,3$ και τελικά υπολογίζεται η εγκάρσια διατομή A_c του καναλιού από τον τύπο (2.2):

$$A_c = \frac{QF}{v} \quad (2.2)$$

Υπολογίζεται το ύψος του καναλιού H , το πλάτος του πάτου του B και το πλάτος της κορυφής του T μέσω των τύπων (2.3), (2.4) και (2.5):

$$H = \sqrt{\frac{A}{XN}} \quad (2.3)$$

$$B = HX \quad (2.4)$$

$$T = B + (2HN) \quad (2.5)$$

όπου X : δείκτης που εκφράζει την κλίση N ανηγμένη σε ημικύκλιο και δίνεται από τον τύπο (2.6)

$$X = 2\sqrt{(1 + N^2)} - 2N \quad (2.6)$$

Εν συνεχεία, πρέπει να υπολογιστεί η κρίσιμη τιμή ταχύτητας v_c και να διασφαλιστεί ότι η ταχύτητα v που έχει επιλεγεί είναι μικρότερη από τον 90% αυτής, ώστε η ροή του νερού να είναι στρωτή κατά μήκος του καναλιού.

$$v_c = \sqrt{\left(A \frac{g}{T}\right)} \quad (2.7)$$

Πρέπει να υπολογιστεί η μέση υδραυλική ακτίνα από τον τύπο (2.8):

$$R = \frac{A}{P} \quad (2.8)$$

όπου P : η βρεχόμενη περίμετρος (δίδονται έτοιμοι τύποι υπολογισμού της ανάλογα με το σχήμα του καναλιού σε πίνακες σε σχετική βιβλιογραφία)

Τέλος, υπολογίζεται η κλίση S του καναλιού από την εξίσωση του Manning (2.9):

$$S = \left(n \frac{v}{R^{0.667}}\right)^2 \quad (2.9)$$

Το ύψος H_1 που χάνεται κατά την κατασκευή του καναλιού είναι ίσο με την κατακόρυφη υψομετρική διαφορά μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του και ισχύει ότι:

$$H_1 = L \cdot S \quad (2.10)$$

Αν το κανάλι αποτελείται από τμήματα με διαφορετικό υλικό ή σχήμα, η παραπάνω διαδικασία θα πρέπει να γίνει για κάθε τμήμα χωριστά και μετά να αθροιστούν τα αποτελέσματα. Αν η

συνολική απώλεια υδραυλικού ύψους από την κατασκευή της διώρυγας προσαγωγής είναι μεγάλη θα πρέπει να γίνουν διορθωτικές κινήσεις (όπως αλλαγή της ταχύτητας ή κάποιων υλικών) με στόχο τη μείωσή της. Η διαστασιολόγηση αυτή είναι μία επαναληπτική διαδικασία με στόχο τη σχεδίαση ενός ασφαλούς, αξιόπιστου, αποδοτικού και χαμηλού σε κόστος καναλιού και πρέπει να γίνεται με προσοχή [3].

2.3. Λεκάνη καθίζησης ιζημάτων και δεξαμενή φόρτισης

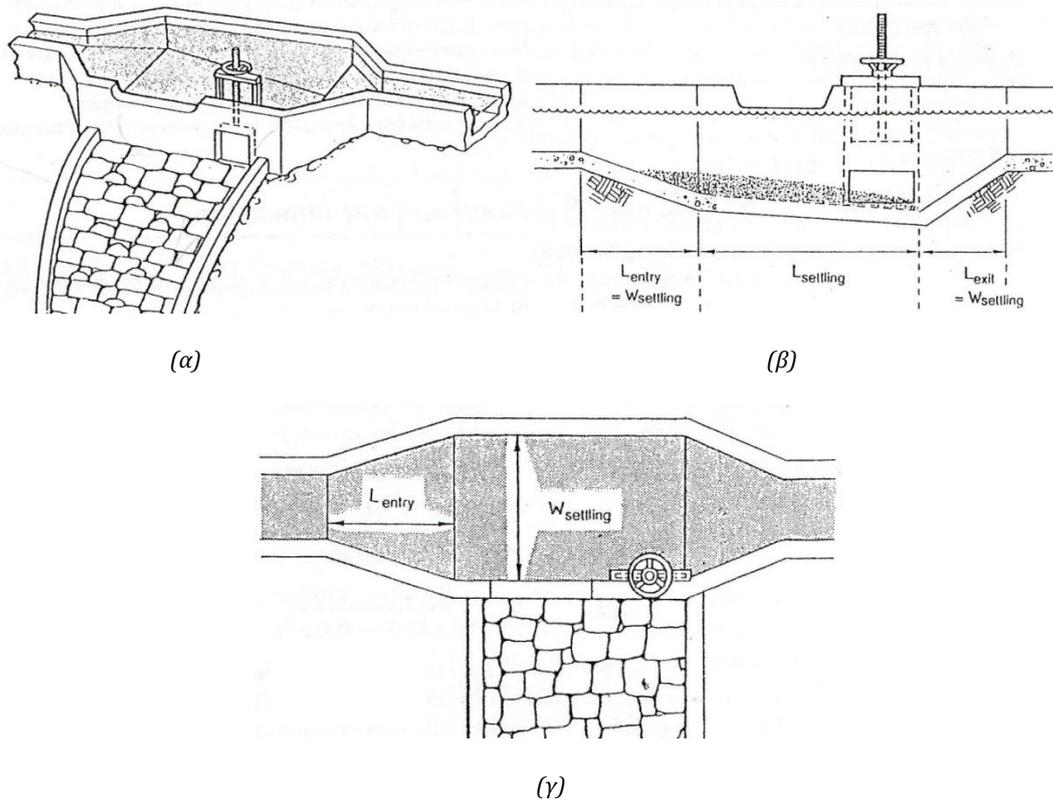
Σε ένα micro-υδροηλεκτρικό έργο χρησιμοποιούνται δύο είδη δεξαμενών: η λεκάνη καθίζησης ιζημάτων (silt basin) και η δεξαμενή φόρτισης (forebay tank). Η λεκάνη καθίζησης ιζημάτων προηγείται της δεξαμενής φόρτισης, καθώς βρίσκεται πιο κοντά στο σημείο υδροληψίας αν και δεν χρησιμοποιείται πάντα (σε έργα που δεν υπάρχει κανάλι προσαγωγής, δεν κατασκευάζεται λεκάνη καθίζησης).

Οι δεξαμενές πρέπει να πληρούν τις εξής προδιαγραφές:

- i.** Το μήκος και το πλάτος τους πρέπει να είναι επαρκώς μεγάλα ώστε να επιτρέπουν την επιβράδυνση του νερού και να βοηθούν στην κατακάθιση των ιζημάτων και των φερτών υλών του, χωρίς όμως να καταλήγουν σε μία πολύ ακριβή και ογκώδη κατασκευή.
- ii.** Πρέπει να επιτρέπουν τον εύκολο καθαρισμό και απομάκρυνση των ιζημάτων ανά επαρκή χρονικά διαστήματα.
- iii.** Το νερό που εξέρχεται από τις δεξαμενές μέσω της πύλης καθαρισμού τους πρέπει να απομακρύνεται με προσοχή και ασφάλεια μακριά από την εγκατάσταση, ώστε να μην προκαλείται διάβρωση του εδάφους στο οποίο στηρίζονται ουσιαστικά οι δεξαμενές, το κανάλι προσαγωγής και ο σωλήνας πτώσεως.
- iv.** Δεν πρέπει να προκαλούν στροβιλισμό του νερού ή διαχωρισμό της ροής του, τα οποία οφείλονται στην ύπαρξη αιχμηρών γωνιών και απότομων αλλαγών κλίσης και έχουν ως αποτέλεσμα τη συνέχιση της πορείας των ιζημάτων.
- v.** Πρέπει να έχει επαρκή χωρητικότητα ώστε να επιτρέπει τη συγκέντρωση της μεταφερόμενης ποσότητας ιζημάτων.
- vi.** Πρέπει να είναι προστατευμένες από μεγάλες αυξήσεις της ροής και να διαθέτουν υπερχειλιστές.

2.3.1 Λεκάνη καθίζησης ιζημάτων

Η λεκάνη καθίζησης ιζημάτων έχει τη μορφή που φαίνεται στο σχήμα 2.5. Για τη σχεδίασή της, είναι απαραίτητη η γνώση της ροής του νερού και μία εκτίμηση της ποσότητας των μεταφερόμενων ιζημάτων.



Σχήμα 2.5: (α) Απεικόνιση μιας λεκάνης καθίζησης με βαλβίδα καθαρισμού και υπερχειλιστή, (β) πλάγια όψη και (γ) κάτοψη της λεκάνης καθίζησης [3].

Η λεκάνη διαχωρίζεται κατά το μήκος της σε τρία κομμάτια: το πρώτο κομμάτι εισόδου με μήκος L_{entry} , το δεύτερο κομμάτι καθίζησης με μήκος $L_{settling}$ και πλάτος $W_{settling}=L_{entry}=L_{exit}$ και το τελευταίο κομμάτι εξόδου L_{exit} . Κατά το βάθος της χωρίζεται σε δύο τμήματα: το τμήμα κατακάθισης με βάθος $D_{settling}$ και το τμήμα συγκέντρωσης με βάθος $D_{collection}$.

Για τη σχεδίαση της δεξαμενής αυτής σύμφωνα με το [3], πρέπει αρχικά να επιλεγεί μία κατάλληλη τιμή πλάτους τέτοιο για να είναι εύκολη η κατασκευή της με την προϋπόθεση να είναι πέντε έως δεκαπέντε φορές μεγαλύτερο από το βάθος του καναλιού. Το βάθος $D_{settling}$ μπορεί να επιλεγεί ίσο με το βάθος του ρεύματος του νερού που ρέει στο κανάλι. Το μήκος του μεσαίου τμήματος της δεξαμενής προκύπτει από τον τύπο (2.11) :

$$L_{settling} = \frac{Q}{W_{settling} v_{vertical}} \quad (2.11)$$

Αν το μήκος που προκύπτει κρίνεται ακατάλληλο λόγω δυσκολίας κατασκευής, μπορεί να γίνει αναπροσαρμογή του πλάτους $W_{settling}$ και μετά να υπολογιστεί το νέο μήκος. Για τον προσδιορισμό του βάθους $D_{collection}$ πρέπει πρώτα να υπολογιστεί το φορτίο των ιζημάτων (Silt load) σε kg μέσω του τύπου (2.12):

$$Silt\ load = QTS \quad (2.12)$$

όπου Q : η αρχική ροή του νερού χωρίς να συμπεριληφθούν οι πιθανές απώλειες διαρροής στο κανάλι

T : η μέση συχνότητα καθαρισμού της λεκάνης κατά τη διάρκεια του έτους σε ώρες

S : το μεταφερόμενο φορτίο ιζημάτων που έχει εκτιμηθεί σε kg/m³

Επίσης, με γνωστή την πυκνότητα της άμμου και των ιζημάτων ρ_s , υπολογίζεται ο συνολικός τους όγκος V_s και η απαιτούμενη χωρητικότητα C συγκέντρωσης ιζημάτων της λεκάνης:

$$V_s = \frac{1}{\rho_s S} \quad [\text{m}^3] \quad (2.13) \quad C = V_s(\text{silt load})$$

$$[\text{m}^3] \quad (2.14)$$

Τελικά, το βάθος $D_{\text{collection}}$ προκύπτει από τον τύπο (2.15):

$$D_{\text{collection}} = \frac{C}{W_{\text{settling}} L_{\text{settling}}} \quad (2.15)$$

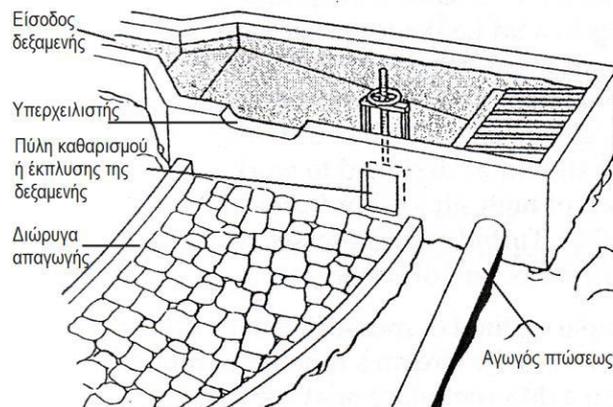
Πρακτική αύξηση του βάθους της λεκάνης μπορεί να επιτευχθεί με τακτικό άδειασμα και καθαρισμό αυτής [2].

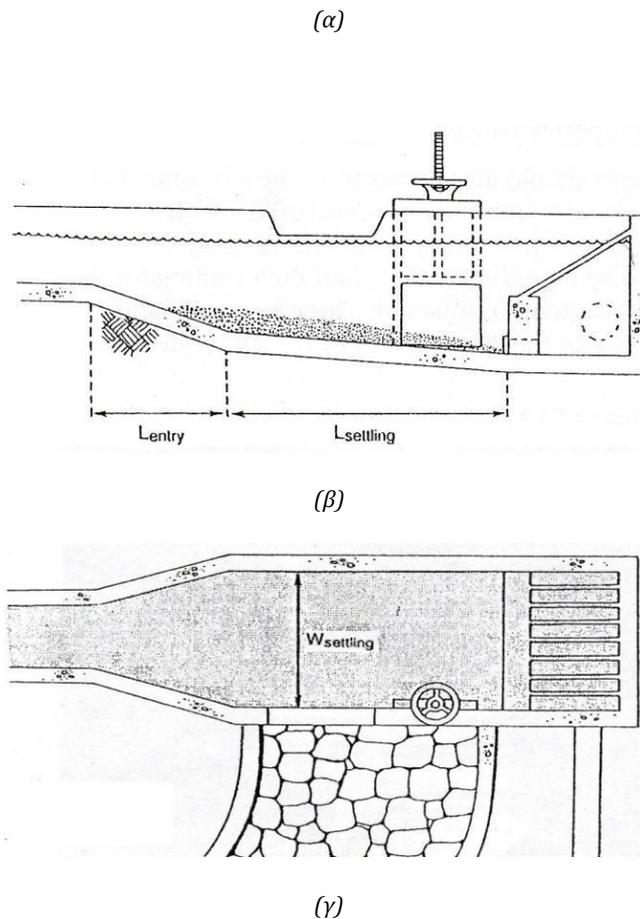


Σχήμα 2.6: Λεκάνης καθίζησης ιζημάτων

2.3.2. Δεξαμενή φόρτισης

Η δεξαμενή φόρτισης παρέχει επαρκές βάθος νερού ώστε το στόμιο εισόδου του σωλήνα πτώσεως να είναι ανά πάσα στιγμή πλήρως καλυμμένο από νερό. Η σχεδιάσή της ακολουθεί την ίδια διαδικασία με τη λεκάνη καθίζησης ιζημάτων με τη διαφορά ότι το τμήμα εξόδου της τελευταίας έχει αντικατασταθεί από μία σχάρα και την είσοδο στον σωλήνα. Η μορφή μίας δεξαμενής φόρτισης σε διαφορετικές όψεις φαίνεται στο σχήμα 2.7. Στην περίπτωση που ο σωλήνας προσαγωγής του νερού στον υδροστρόβιλο ξεκινάει από το σημείο υδροληψίας, τότε προφανώς η δεξαμενή αυτή παραλείπεται.





Σχήμα 2.7: (α) Απεικόνιση μιας δεξαμενής φόρτισης με βαλβίδα καθαρισμού και υπερχειλιστή, (β) πλάγια όψη και (γ) κάτοψη της λεκάνης καθίζησης [2].

2.4. Αγωγός πτώσεως

Ο αγωγός πτώσεως ή αγωγός νερού ή σωλήνας καταθλίψεως (penstock) είναι ο σωλήνας που μεταφέρει το νερό υπό πίεση στον υδροστρόβιλο. Μπορεί να ξεκινάει κατευθείαν από το σημείο υδροληψίας, αν και συνήθως ξεκινάει από τη δεξαμενή φόρτισης, αφού έτσι έχει μικρότερο μήκος και χαμηλότερο κόστος [10]. Ο αγωγός πτώσεως αποτελεί μία σημαντική συνιστώσα του συνολικού κόστους κατασκευής του micro-υδροηλεκτρικού έργου και για τον λόγο αυτό η σχεδιάσή και η εγκατάστασή του πρέπει να γίνονται με εξαιρετική προσοχή, ώστε να διασφαλίζεται μεγάλος χρόνος ζωής και ασφαλής και αποδοτική λειτουργία [2].

2.4.1. Διαστασιολόγηση του αγωγού πτώσεως

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι διαστασιολόγησης ενός αγωγού πτώσεως. Με βάση τη διαθέσιμη βιβλιογραφία, στην παρούσα εργασία επιλέγεται να παρουσιαστεί η μέθοδος του [3], καθώς τα υπόλοιπα μοντέλα διαστασιολόγησης αναφέρονται σε μικρές υδροηλεκτρικές εφαρμογές, που είναι μεγαλύτερης κλίμακας έργα από αυτά που μελετώνται εδώ. Υπενθυμίζεται ότι οι μικροί

υδροηλεκτρικοί σταθμοί έχουν παραγόμενη ισχύ μεταξύ 1MW και 100MW, ενώ οι micro και pico υδροηλεκτρικοί σταθμοί έχουν παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ μικρότερη των 100MW. Κάθε μέθοδος διαστασιολόγησής του, όμως, είναι μία επαναληπτική διαδικασία. Επιλέγεται αρχικά η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα και ένα πάχος τοιχώματος (ανάλογα με την πίεση λειτουργίας) και εν συνεχεία υπολογίζονται οι υδραυλικές απώλειες, το καθαρό ύψος υδατόπτωσης και γίνεται εκτίμηση του μεγέθους ενός πιθανού υδραυλικού πλήγματος. Αν τα μεγέθη που προκύπτουν δεν είναι ικανοποιητικά πρέπει να αλλάξουν οι αρχικές επιλογές και να επαναληφθεί η διαδικασία από την αρχή.

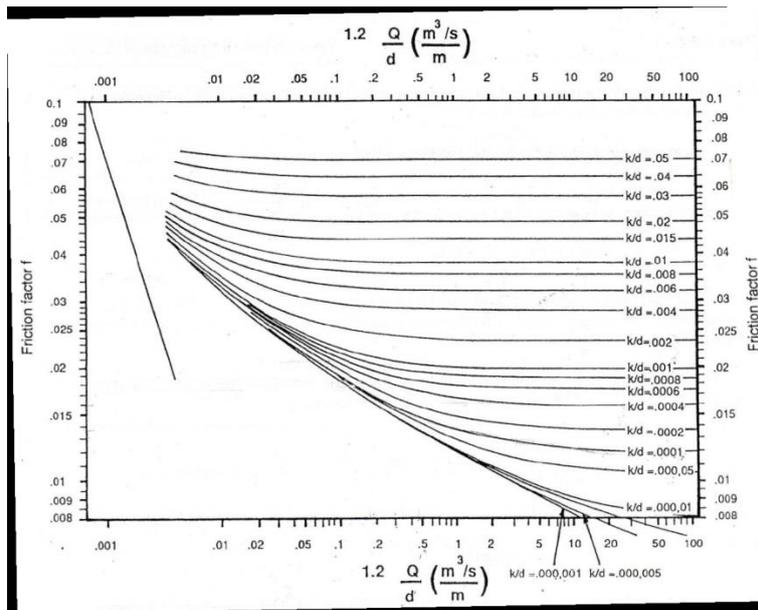
Αρχικά, πρέπει να υπολογιστεί η καθαρή ροή του νερού Q_{net} στον σωλήνα, η οποία προκύπτει αν αφαιρεθούν από την αρχική ροή οι απώλειες λόγω διαρροής κατά τη μεταφορά του νερού στη δεξαμενή φόρτισης και λόγω ανταγωνιστικών χρήσεων του νερού. Επίσης, απαραίτητη είναι η γνώση του μήκους L_{pipe} του σωλήνα, που προκύπτει με χρήση του Πυθαγόρειου θεωρήματος όπως φαίνεται στον τύπο (2.16):

$$L_{pipe} = \sqrt{L_{horizontal}^2 + H_{gross}^2} \quad (2.16)$$

όπου $L_{horizontal}$: η οριζόντια απόσταση μεταξύ της εισόδου του σωλήνα στη δεξαμενή φόρτισης και της εξόδου του στο κτίριο του σταθμού.

Εν συνεχεία, επιλέγεται μία εσωτερική διάμετρος d για τον σωλήνα και υπολογίζονται οι υδραυλικές απώλειες. Οι υδραυλικές απώλειες H_{loss} σε έναν σωλήνα είναι δύο ειδών: οι απώλειες λόγω τριβής στα τοιχώματα του σωλήνα $H_{wallloss}$ και οι απώλειες λόγω στροβιλισμού $H_{turbloss}$ σε ειδικές διαμορφώσεις και εξαρτήματα του σωλήνα, όπως είναι το στόμιο εισόδου του, βαλβίδες, διακλαδώσεις, σημεία κάμψης του σωλήνα καθώς και σημεία συστολής ή διεύρυνσης της ροής του νερού σε αυτόν.

Για να υπολογιστεί η πρώτη συνιστώσα των υδραυλικών απωλειών, πρέπει να γίνει εκτίμηση του συντελεστή τριβής f του σωλήνα. Αυτή μπορεί να γίνει είτε αριθμητικά είτε διαγραμματικά, όπως εδώ, με χρήση του διαγράμματος Moody (ένα παράδειγμα τέτοιου διαγράμματος φαίνεται στο σχήμα 2.8) και εξαρτάται από το υλικό του αγωγού και τον συντελεστή τραχύτητάς του k . Έτσι, πρέπει να υπολογιστούν οι λόγοι k/d (ο οποίος αντιστοιχεί στις καμπύλες του διαγράμματος) και $1.2Q/d$ που αντιστοιχεί στα σημεία του οριζόντιου άξονα με λογαριθμική κλίμακα.



Σχήμα 2.8: Διάγραμμα Moody

Αφού έχει υπολογιστεί ο συντελεστής τριβής, μπορούν να υπολογιστούν οι απώλειες τριβής μέσω του τύπου (2.17):

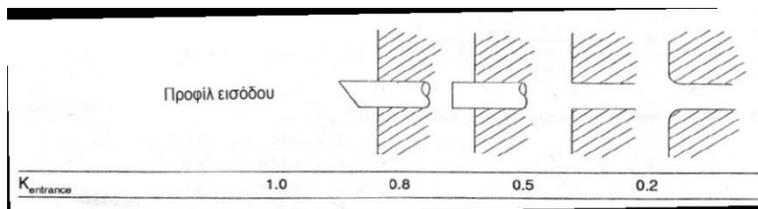
$$H_{wallloss} = \frac{fL\rho v^3}{d^5} \quad (2.17)$$

Η ταχύτητα v με την οποία ρέει το νερό στο εσωτερικό του σωλήνα υπολογίζεται από τον τύπο (2.18):

$$v = \frac{4Q}{\pi d^2} \quad (2.18)$$

Για τον υπολογισμό των απωλειών λόγω στροβιλισμού πρέπει κανείς να γνωρίζει ακριβώς τα σημεία στα οποία αυτές θα δημιουργηθούν και το είδος τους. Οι απώλειες σε καθένα από αυτά εκφράζεται μέσω του συντελεστή απωλειών k (εναλλακτικός συμβολισμός: ζ).

Για το στόμιο εισόδου του σωλήνα, υπάρχει ο συντελεστής $k_{entrance}$ που εξαρτάται από τη διαμόρφωση της εισόδου και ενδεικτικές τιμές του φαίνονται στον πίνακα 2.1:



Πίνακας 2.1: Συντελεστής απωλειών στην είσοδο του αγωγού πτώσεως ($k_{entrance}$) [2]

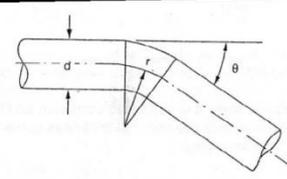
Για τις βαλβίδες υπάρχει ο συντελεστής k_{valve} που εξαρτάται από το είδος της βαλβίδας και ενδεικτικές τιμές του φαίνονται στον πίνακα 2.2:

Τύπος βαλβίδας	Σφαιρική	Διαφράγματος	Πεταλούδα
K_{valve}	0	0.1	0.3

Πίνακας 2.2: Συντελεστής απωλειών στη βαλβίδα (k_{valve}) [2]

Για τα σημεία καμπύλωσης του σωλήνα, υπάρχει ο συντελεστής k_{bend} που εξαρτάται από τον λόγο της ακτίνας καμπυλότητας προς την εσωτερική διάμετρο r/d και τη γωνία κάμψης του σωλήνα θ με ενδεικτικές τιμές που φαίνονται στον πίνακα 2.3:

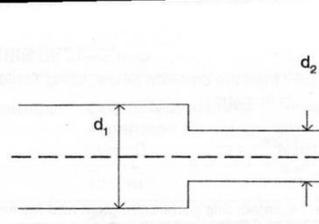
Προφίλ καμπύλωσης σωλήνα



r/d	1	2	3	5
K_{bend} ($\theta = 20^\circ$)	0.36	0.25	0.20	0.15
K_{bend} ($\theta = 45^\circ$)	0.45	0.38	0.30	0.23
K_{bend} ($\theta = 90^\circ$)	0.60	0.50	0.40	0.30

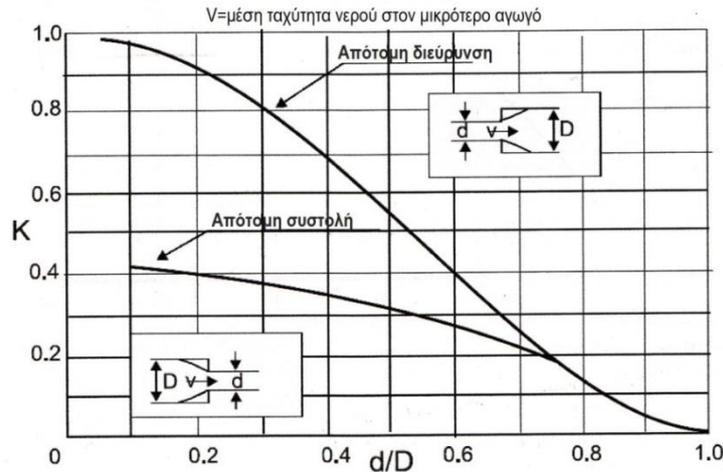
Πίνακας 2.3: Συντελεστής απωλειών στα σημεία κάμψης του αγωγού πτώσεως (k_{bend}) [2]

Για τα σημεία στα οποία μεταβάλλεται η διάμετρος του σωλήνα είτε με συστολή είτε με διεύρυνση της ροής, υπάρχουν οι συντελεστές k_c και k_{ex} αντίστοιχα που εξαρτώνται από τον λόγο της μικρότερης προς τη μεγαλύτερη διάμετρο d_1/d_2 . Όσο πιο ομαλή είναι η μετάβαση, τόσο λιγότερες είναι και οι απώλειες. Ενδεικτικές τιμές του k_c για συστολή της ροής φαίνονται στον πίνακα 2.4, ενώ στο σχήμα 2.9 φαίνονται τιμές και των δύο συντελεστών σε σχέση με τον λόγο d_1/d_2 :



d_1/d_2	1.0	1.5	2.0	2.5	5.0
$K_{contraction}$	0	0.25	0.35	0.40	0.50

Πίνακας 2.4: Συντελεστής απωλειών στα σημεία συστολής της ροής του αγωγού πτώσεως (k_c) [2]



Σχήμα 2.9: Συντελεστές απωλειών στα σημεία συστολής k_c και διεύρυνσης k_{ex} της ροής σε έναν αγωγό πτώσεως [2]

Για τις διακλαδώσεις, ο υπολογισμός είναι λίγο πιο περίπλοκος καθώς υπάρχουν δύο συντελεστές για τις δύο διαφορετικές πορείες του νερού και εξαρτώνται από την κατεύθυνση της ροής του νερού, τη γωνία της διακλάδωσης και το ποσοστό του νερού που εκτρέπεται προς διαφορετική κατεύθυνση. Ενδεικτικές τιμές των δύο συντελεστών για διάφορες περιπτώσεις φαίνονται στον πίνακα 2.5:

Διαμόρφωση	Q_2/Q	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
	k_z	0,96	0,88	0,89	0,96	1,10	1,29
	k	0,05	-0,08	-0,04	0,07	0,21	0,35
	k_z	-1,04	-0,40	0,10	0,47	0,73	0,92
	k	0,06	0,18	0,30	0,40	0,50	0,60
	k_z	0,98	0,79	0,64	0,57	0,60	0,75
	k	0,05	-0,05	-0,02	0,07	0,20	0,34
	k_z	-0,92	-0,30	0,13	0,40	0,57	0,66
	k	0,04	0,24	0,30	0,25	0,10	-0,19
	k_z	0,90	0,68	0,50	0,38	0,35	0,48
	k	0,04	-0,06	-0,04	0,07	0,20	0,33
	k_z	-0,90	-0,73	0,00	0,22	0,37	0,38
	k	0,05	0,18	0,19	0,06	-0,18	-0,54

Πίνακας 2.5: Συντελεστής απωλειών σε διακλάδωση κυκλικής διατομής (k_{bend}) [9]

Με άθροιση όλων αυτών των συντελεστών k ανάλογα με τα εμπόδια, τις φορές εμφάνισής τους και τη μορφή τους προκύπτει ένας συνολικός συντελεστής k_{turb} , ο οποίος χρησιμοποιείται στον τύπο (2.19) για τον υπολογισμό των απωλειών λόγω στροβιλισμού στις τοπικές αντιστάσεις:

$$H_{turbloss} = \frac{v^2}{2g} k_{turb} \quad (2.19)$$

Για παράδειγμα, αν σε ένα σύστημα υπάρχουν δύο σημεία κάμψης του σωλήνα, ένα σημείο συστολής της ροής και μία βαλβίδα, ο συντελεστής K_{turb} θα είναι: $K_{turb} = K_{entrance} + K_{bend1} + K_{bend2} + K_c + K_{valve}$. Συχνά, οι απώλειες διακλάδωσης, λόγω του δυσκολότερου υπολογισμού τους και των κλάδων του σωλήνα με διαφορετική ροή, υπολογίζονται ξεχωριστά και προστίθενται στις υπόλοιπες απώλειες λόγω στροβιλισμού.

Στο σημείο αυτό, μπορεί να υπολογιστεί το σύνολο των απωλειών H_{loss} και το καθαρό ύψος υδατόπτωσης H_{net} :

$$H_{net} = H_{gross} - H_{loss} = H_{gross} - H_{wallloss} - H_{turbloss}$$

Αν το υδραυλικό ύψος που προκύπτει δεν αρκεί για την περιστροφή του υδροστροβίλου στην επιθυμητή ταχύτητα, πρέπει να επιλεγεί μεγαλύτερη διάμετρος ώστε να μειωθούν οι απώλειες, με ταυτόχρονη όμως αύξηση του κόστους.

Εν συνεχεία ακολουθεί ο προσδιορισμός του απαραίτητου πάχους t του τοιχώματος του σωλήνα. Στην κανονική κατάσταση λειτουργίας και σε κάθε σημείο του σωλήνα, η πίεση P σε bar που αυτός υφίσταται είναι πρακτικά ίση με $0,0981 \cdot H$, όπου το H είναι σε m και αποτελεί την υψομετρική διαφορά του σημείου αυτού με τη δεξαμενή φόρτισης. Έτσι, στο τέλος του αγωγού πτώσεως η πίεση θα είναι ίση με $0,0981 \cdot H_{net}$. Ωστόσο, το επιλεγόμενο πάχος πρέπει να αντέχει και στα υδραυλικά πλήγματα που μπορεί να εμφανιστούν. Επομένως, πρέπει να υπολογιστεί η ένταση του υδραυλικού πλήγματος και η αύξηση της πίεσης που αυτό θα επιφέρει.

Πρώτα πρέπει να υπολογιστεί η ταχύτητα του μεταβατικού «κύματος» πίεσης a με χρήση του τύπου (2.20):

$$a = \frac{1400}{\sqrt{1 + \left(2.1 \cdot \frac{10^9 d}{E t}\right)^2}} \quad (2.20)$$

όπου E [N/m^2]: ο συντελεστής του Young και είναι χαρακτηριστικό μέγεθος κάθε υλικού.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω, η αύξηση της πίεσης κατά την εκδήλωση του μεταβατικού φαινομένου αντιστοιχεί σε μία αύξηση του μανομετρικού ύψους, η οποία είναι ίση με H_{surge} :

$$H_{surge} = \frac{av}{g} \quad (2.21)$$

Άρα, το συνολικό μανομετρικό ύψος H_{total} και η πίεση P_{total} στον αγωγό λόγω υδραυλικού πλήγματος είναι:

$$H_{total} = H_{gross} + H_{surge} \quad (2.22)$$

$$P_{total} = \frac{\rho g H_{total}}{10^5} = 0.0981 H_{total} \text{ [bar]} \quad (2.23)$$

Όπου $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$: η πυκνότητα του νερού

$g = 9.8 \text{ m/sec}^2$: η επιτάχυνση της βαρύτητας

2.5. Σταθμός παραγωγής

Ο σταθμός παραγωγής του micro-υδροηλεκτρικού συστήματος είναι ο χώρος που τερματίζει το σύστημα προσαγωγής και στον οποίο εγκαθίσταται ο ηλεκτρομηχανολογικός (H/M) εξοπλισμός,

δηλαδή οι στρόβιλοι, οι γεννήτριες, οι μετασχηματιστές, ο εξοπλισμός παρακολούθησης και ελέγχου κ.ο.κ. Η κατασκευή και διάταξη του σταθμού παραγωγής εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα των υλικών

το κλίμα της περιοχής, την υφιστάμενη τοπογραφία, τις συνθήκες ροής του φυσικού υδατορεύματος και τον τύπο του Η/Μ εξοπλισμού. Μια καλή σχεδίαση του σταθμού εξασφαλίζει την προστασία του Η/Μ εξοπλισμού και την ύπαρξη αρκετού χώρου για τη διεξαγωγή εργασιών επισκευής και συντήρησης αυτού, κατά τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης, η οποία πρέπει να είναι τουλάχιστον δεκαπέντε χρόνια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ

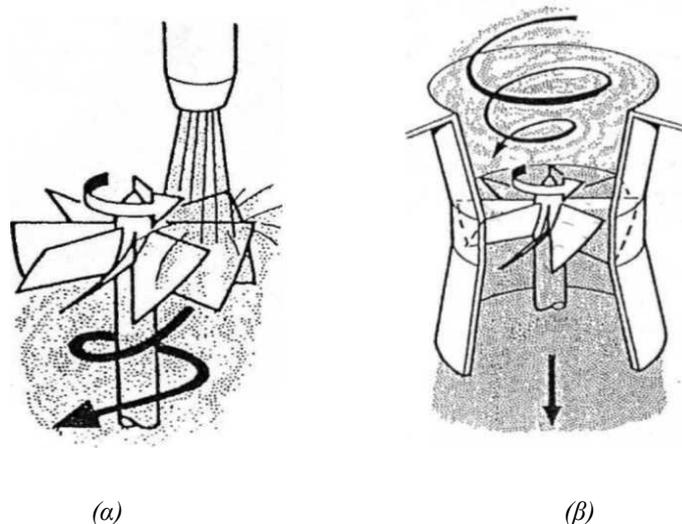
3.1. Γενικά στοιχεία - Τύποι υδροστροβίλων

Υδροστρόβιλος ονομάζεται η μηχανή που μετατρέπει την ενέργεια του υγρού (νερού) σε μηχανική ενέργεια μέσω συνεχούς ροής του υγρού και σταθερής περιστροφικής κίνησης του άξονα του στροβίλου. Η μετατροπή (μέρους) της ενέργειας του διερχόμενου υγρού σε μηχανική ενέργεια λαμβάνει χώρα στο στρεφόμενο μέρος της μηχανής, το οποίο καλείται δρομέας, μέσω της ανάπτυξης της κινητήριας ροπής σε αυτό. Η άτρακτος του δρομέα είναι συζευγμένη με την άτρακτο της ηλεκτρικής γεννήτριας μέσω της οποίας μετατρέπεται η μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική, δηλ. σε μία μορφή ενέργειας η οποία είναι εύκολο να μεταφερθεί στον τόπο κατανάλωσής της [9].

Η επιλογή του καταλληλότερου υδροστροβίλου για μία συγκεκριμένη εφαρμογή γίνεται με βάση τα χαρακτηριστικά του συστήματος, όπως η απαιτούμενη παροχή Q , το διαθέσιμο υδραυλικό ύψος H , η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας ω_e που θα χρησιμοποιηθεί καθώς και η αναγκαιότητα διατήρησης υψηλής απόδοσης του υδροστροβίλου σε συνθήκες μερικής ροής. Η λειτουργία κάθε υδροστροβίλου περιγράφεται από τις χαρακτηριστικές ισχύος - ταχύτητας και απόδοσης - ταχύτητας. Για ένα δεδομένο ύψος υδατόπτωσης, ο στρόβιλος λειτουργεί αποδοτικότερα σε συγκεκριμένη ταχύτητα περιστροφής και για συγκεκριμένο εύρος παροχής.

Οι υδροστρόβιλοι χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με το υδραυλικό ύψος στο οποίο λειτουργούν πιο αποδοτικά (χαμηλό, μεσαίο, υψηλό). Επίσης, διακρίνονται σε δύο κατηγορίες με

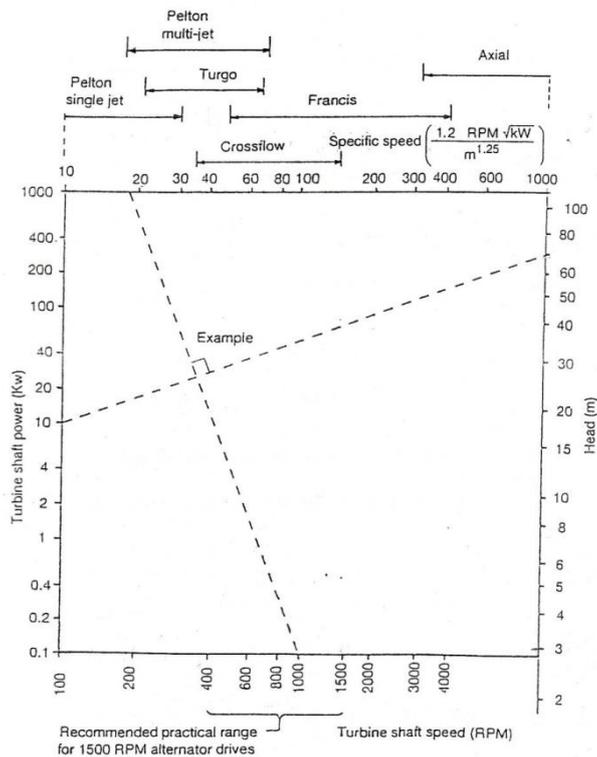
βάση την αρχή λειτουργίας τους: τους υδροστροβίλους δράσεως (impulse turbines) και υδροστροβίλους αντιδράσεως (reaction turbines). Οι υδροστροβίλοι δράσεως είναι μερικής



προσβολής, και σε κάθε χρονική στιγμή τμήμα μόνο του δρομέα συμμετέχει στην ενεργειακή μετατροπή, ενώ οι υδροστροβίλοι αντιδράσεως είναι ολικής προσβολής, δηλαδή ολόκληρος ο δρομέας λειτουργεί αξονοσυμμετρικά, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1.

Σχήμα 3.1: Απλοποιημένη σχηματική απεικόνιση ενός (α) υδροστροβίλου δράσεως, (β) υδροστροβίλου αντιδράσεως.

Μία τελευταία κατηγοριοποίηση των υδροστροβίλων γίνεται με κριτήριο την καθοδήγηση του νερού. Έτσι, οι υδροστροβίλοι διακρίνονται σε: αξονικούς, ακτινωτούς και μικτούς. Στους αξονικούς υδροστροβίλους το νερό οδηγείται κατά τέτοιον τρόπο στην κινητή στεφάνη, ώστε η κυκλοφορία του να γίνεται με κατεύθυνση παράλληλη προς τον άξονα του στροβίλου. Στους ακτινωτούς υδροστροβίλους, η προσαγωγή του νερού γίνεται κατά διεύθυνση ακτινωτή, δηλαδή κάθετη προς τον άξονά τους. Στους υδροστροβίλους αυτού του τύπου η απαγωγή του νερού από την κινητή στεφάνη γίνεται κατά οποιαδήποτε κατεύθυνση. Ειδικότερα οι ακτινωτοί στροβίλοι χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες: τον κεντρομόλο και τον φυγοκεντρικό. Όταν τα μόρια του νερού κατά την εντός του στροβίλου κυκλοφορία κατευθύνονται προς τον άξονα, ο στροβίλος καλείται κεντρομόλος, ενώ, όταν αυτά απομακρύνονται, φυγοκεντρικός. Τέλος, στους μικτούς υδροστροβίλους, η κυκλοφορία του νερού μέσα στον υδροστροβίλο γίνεται εν μέρει παράλληλα προς τον άξονά του και εν μέρει κάθετα [1].



Σχήμα 3.2: Νομόγραμμα για την επιλογή του κατάλληλου υδροστροβίλου [2]

Η επιλογή του κατάλληλου τύπου υδροστροβίλου μπορεί να γίνει γραφικά από το νομόγραμμα του Σχ. 3.2 ακολουθώντας τα εξής βήματα:

- Με δεδομένη την παροχή και το ύψος υδατόπτωσης μπορεί να υπολογιστεί η ισχύς στην έξοδο του υδροστροβίλου $P_{turbout}$ με χρήση του τύπου (3.1):

$$P_{turbout} = 10QH e_{turbine} \quad [\text{kW}] \quad (3.1)$$

Όπου $e_{turbine} = 65-80\%$: η απόδοση του υδροστροβίλου $Q[\text{m}^3/\text{sec}]$

: η παροχή

$H[\text{m}]$: : το υδραυλικό ύψος

- Ενώνεται με μία ευθεία γραμμή το σημείο στον αριστερό κατακόρυφο άξονα της ισχύος εξόδου του στροβίλου με το σημείο στον δεξιό κατακόρυφο άξονα που αντιστοιχεί στο ύψος υδατόπτωσης του συστήματος.
- Η επιθυμητή ταχύτητα περιστροφής του υδροστροβίλου επιλέγεται ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής της χρησιμοποιούμενης γεννήτριας και χαράσσεται μία ευθεία γραμμή κάθετη στην προηγούμενη με αφετηρία το σημείο στον κάτω

οριζόντιο άξονα της ταχύτητας περιστροφής του στροβίλου. Ο υδροστρόβιλος είτε θα είναι άμεσα συζευγμένος με τη γεννήτρια, οπότε οι δύο ταχύτητες περιστροφής ταυτίζονται, είτε θα παρεμβάλλεται ανάμεσα σε αυτόν και τη γεννήτρια ένα κιβώτιο ταχυτήτων ή ιμάντες. Ο μέγιστος επιτρεπόμενος λόγος επιτάχυνσης $\{(ταχύτητα\ περιστροφής\ γεννήτριας)/(ταχύτητα\ περιστροφής\ υδροστροβίλου)\}$ είναι 3:1.

- Έτσι, προσδιορίζεται η απαραίτητη ειδική ταχύτητα περιστροφής στον πάνω οριζόντιο άξονα, η οποία είναι αντιπροσωπευτική για κάθε τύπο και κατασκευή υδροστροβίλου.

Η ειδική ταχύτητα (ή ειδικός αριθμός στροφών) N_s είναι μία σταθερά, η οποία δίνεται από τον κατασκευαστή και περιγράφει τον υδροστρόβιλο, όταν αυτός περιστρέφεται και λειτουργεί με τη μέγιστη απόδοση σχεδίασης. Ανεξάρτητα από το μέγεθος, υδροστρόβιλοι ίδιου σχήματος έχουν την ίδια ειδική ταχύτητα, η οποία δίνεται από τον τύπο (3.2)

$$N_s = 1.2 N_{turb} \frac{P_{turbout}^{0.5}}{H^{1.25}} \quad (3.2)$$

Όπου N_{turb} [rpm] :πραγματική ταχύτητα περιστροφής του υδροστροβίλου.

3.2. Υδροστρόβιλοι Δράσεως

Ο υδροστρόβιλος δράσεως (ή υδροστρόβιλος πρόσπτωσης, impulse turbine) μετατρέπει τη δυναμική ενέργεια του νερού σε κινητική ενέργεια μίας δέσμης νερού, η οποία εκρέει από ένα ακροφύσιο και προσπίπτει πάνω στους κάδους ή τα πτερύγια του δρομέα [2].

Οι υδροστρόβιλοι δράσεως είναι οι παλαιότεροι τύποι υδραυλικών μηχανών που χρησιμοποιούνται για την μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας σε μηχανικό έργο, ενώ παράλληλα είναι και οι απλούστεροι από πλευράς σχεδιασμού, ευκολίας συντήρησης και ελέγχου. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε υδροηλεκτρικούς σταθμούς με μεγάλα υδραυλικά ύψη και χαμηλές παροχές, καθώς η μεγάλη ταχύτητα του νερού (λόγω μεγάλου υδραυλικού ύψους), επικεντρώνει τη διαθέσιμη υδραυλική ισχύ σε μια μικρή περιοχή ροής με αποτέλεσμα την αποδοτικότερη μετατροπή ισχύος. Είναι ανθεκτικοί σε άμμο και λοιπά σωματίδια που μπορεί να μεταφέρει το νερό. Επιπλέον, καθώς έχουν χαμηλή ειδική ταχύτητα ροής, ο σχεδιασμός τους δεν απαιτεί ιδιαίτερη πολυπλοκότητα και βαριά κατασκευή. Σε περίπτωση ανάγκης όμως, είναι δυνατόν να αυξηθεί η ειδική ταχύτητα ροής με την προσθήκη περισσότερων ακροφυσίων. Παράλληλα, επειδή λειτουργούν σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης και δεν κινδυνεύουν ιδιαίτερα από το φαινόμενο σπηλαίωσης, δεν απαιτείται ιδιαίτερος σχεδιασμός όσον αφορά την συναρμογή και ερμητικότητα του κελύφους. Το φαινόμενο της σπηλαίωσης παρουσιάζεται σε

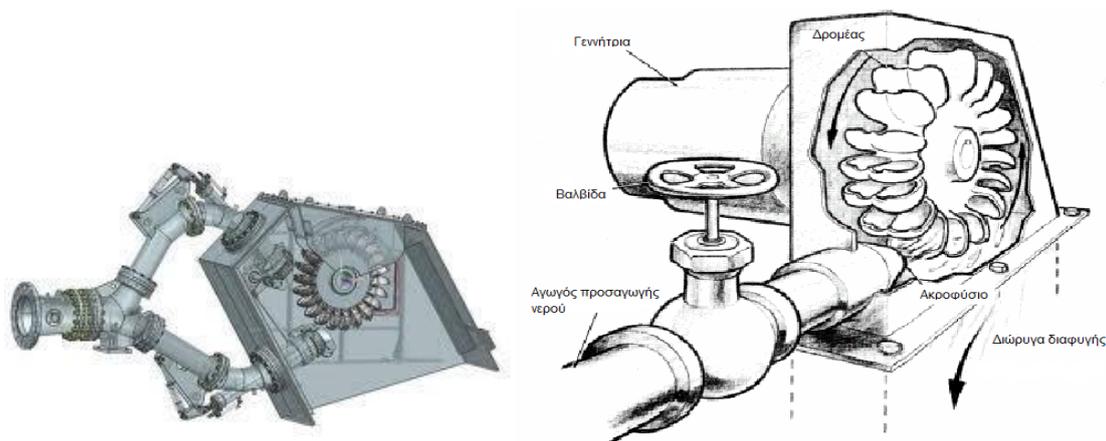
κάποιο μέρος του υδροστροβίλου όταν η πίεση είναι χαμηλότερη από την πίεση των ατμών του υγρού, καθώς τότε σχηματίζονται μικρές φυσαλίδες ατμού, οι οποίες συντρίβονται όταν αυξάνεται η πίεση απελευθερώνοντας κρουστικά κύματα που φθείρουν τις πτερωτές και τα περιβλήματα των στροβίλων. Τέλος, σημαντικό πλεονέκτημά τους έναντι των υδροστροβίλων αντιδράσεως, είναι η διατήρηση ενός αρκετά ικανοποιητικού βαθμού απόδοσης σε συνθήκες μερικής ροής.

Βασικό μειονέκτημα των υδροστροβίλων δράσεως είναι η ακαταλληλότητά τους για συστήματα χαμηλού λόγου ύψους προς ισχύ. Ωστόσο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα με χαμηλό ύψος υδατόπτωσης, αν η μεταφερόμενη ισχύς και η ταχύτητα περιστροφής είναι επίσης χαμηλές.

Στην κατηγορία των υδροστροβίλων δράσεως ανήκουν οι υδροστρόβιλοι Pelton, οι υδροστρόβιλοι Turgo και οι υδροστρόβιλοι εγκάρσιας ροής (crossflow).

3.2.1. Υδροστρόβιλος Pelton

Ο υδροστρόβιλος Pelton πήρε το όνομά του από έναν εκ των δημιουργών του και είναι ο πιο παλιός και γνωστός υδροστρόβιλος δράσεως. Χρησιμοποιείται κυρίως για μεσαία και μεγάλα ύψη υδατόπτωσης (20-200m) και για μεγάλο εύρος ισχύων.



Σχήμα 3.3: Τρισδιάστατη απεικόνιση ενός υδροστροβίλου Pelton

Σχήμα 3.4: Υδροστρόβιλος Pelton οριζόντιου άξονα [3]

Το τμήμα εισόδου του υδροστροβίλου Pelton αποτελείται από ένα ή περισσότερα ακροφύσια τροφοδοσίας, σκοπός των οποίων είναι η μετατροπή της δυναμικής ενέργειας του νερού σε

μηχανική, σχηματίζοντας το καθένα μία δέσμη κυκλικής διατομής. Κάθε δέσμη προσπίπτει στην πτερωτή, δίνοντας σε αυτή μία ώθηση κατά την περιφερειακή διεύθυνση, που δημιουργεί την κινητήρια ροπή. Η πτερωτή είναι τοποθετημένη κατά τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε η δέσμη του νερού, μετά την πρόσπτωσή της σε αυτήν, να πέφτει υπό την επίδραση της βαρύτητας στην ελεύθερη επιφάνεια της διώρυγας διαφυγής.

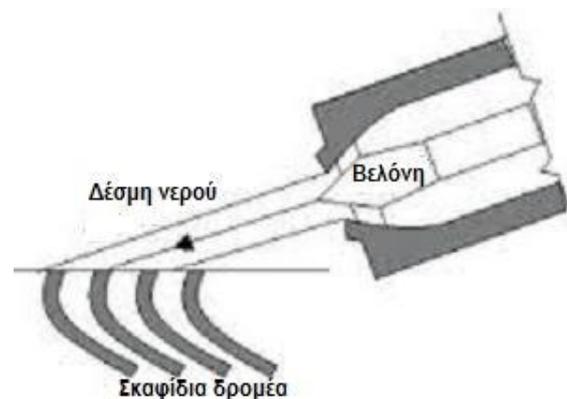
Ο άξονας της πτερωτής μπορεί να είναι οριζόντιος ή κατακόρυφος. Στην περίπτωση ύπαρξης περισσότερων δεσμών είναι προτιμότερη η κατακόρυφη διάταξη του άξονα, ώστε να μην παρενοχλείται η λειτουργία των ακροφυσίων από τα απόνερα των σκαφιδίων.

Τα σκαφίδια του υδροστροβίλου Pelton έχουν το σχήμα δύο κυπέλων ενωμένων στη μία πλευρά, δημιουργώντας εκεί μία αιχμηρή ευθύγραμμη προεξοχή, στην οποία προσπίπτει η δέσμη του νερού και χωρίζεται σε δύο ίσες δέσμες που ρέουν στο εσωτερικό των δύο πλευρών του σκαφιδίου. Το σκαφίδιο του Pelton είναι σχεδιασμένο ώστε να εκτρέπει τη δέσμη κατά 165° , η οποία είναι η μέγιστη δυνατή γωνία ώστε να μην επηρεάζεται το επόμενο σε σειρά σκαφίδιο από τα απόνερα του προπορευόμενου.

Το μέγεθος των σκαφιδίων που θα χρησιμοποιηθούν καθορίζεται από τη διάμετρο της δέσμης του νερού και ο αριθμός τους καθορίζει το μέγεθος και τη διάμετρο του δρομέα (runner pitch diameter pcd, η οποία είναι η διάμετρος μιας νοητής κυκλικής περιφέρειας που περνάει από τα μέσα των σκαφιδίων).

3.2.2. Υδροστρόβιλος Turgo

Ο υδροστρόβιλος Turgo είναι ένας υδροστρόβιλος δράσεως παρόμοιος με τον Pelton. Ωστόσο, στον Turgo η δέσμη προσπίπτει στο σκαφίδιο υπό γωνία (συνήθως 20°) ως προς το επίπεδο του δρομέα.



Σχήμα 3.5: Τα πτερύγια του δρομέα και η δέσμη του νερού σε έναν στρόβιλο Turgo

Το νερό προσπίπτει στον δρομέα από τη μία πλευρά του σκαφιδίου και εξέρχεται από την άλλη, οπότε δεν υπάρχει κίνδυνος παρεμβολής των απόνερων του σκαφιδίου με τη δέσμη, όπως στον στρόβιλο Pelton. Για τον λόγο αυτό, ο Turgo μπορεί να διαχειριστεί μεγαλύτερες παροχές και κατά συνέπεια να παράγει την ίδια ισχύ με δρομέα μικρότερης διαμέτρου, καθώς και να αναπτύξει μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Η ειδική ταχύτητα περιστροφής N_s τυποποιημένων υδροστροβίλων της κατηγορίας αυτής είναι της τάξεως των 50-60 ανά δέσμη τροφοδοσίας. Οι στρόβιλοι Turgo έχουν αρκετά καλή απόδοση σε συνθήκες μερικού φορτίου και ουσιαστικά, καλύπτουν μία περιοχή ανάμεσα στους υδροστρόβιλος Pelton με πολλά ακροφύσια και τους υδροστροβίλους Francis με υψηλή τιμή υδραυλικής πτώσης, όταν είναι αναγκαία η αποδοτικότερη λειτουργία σε μερικά φορτία.

Παρά τα προαναφερόμενα πλεονεκτήματά τους, όμως, οι υδροστρόβιλοι αυτού του τύπου είναι δυσκολότεροι στην κατασκευή, υφίστανται σημαντικά αξονικά φορτία κατά τη λειτουργία τους (που σημαίνει ότι χρειάζονται κατάλληλα ρουλεμάν στην άκρη του άξονα) και τα σκαφίδια τους είναι πιο ευαίσθητα από αυτά του Pelton.



(α)



(β)



(γ)

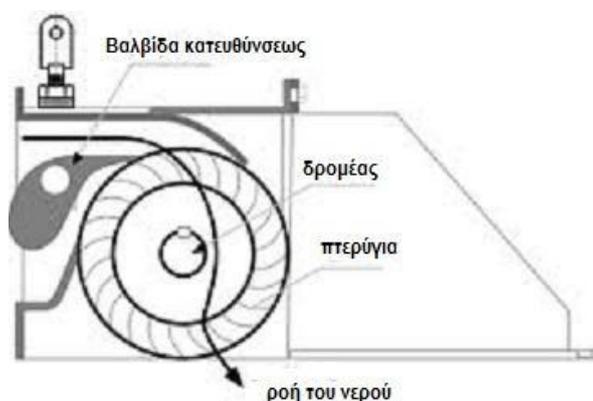
Σχήμα 3.6: (α) Δρομέας υδροστροβίλου Turgo με εξωτερική στεφάνη, (β),(γ) Δρομέας υδροστροβίλου Turgo χωρίς εξωτερική στεφάνη, (δ) Δρομέας του υδροστροβίλου Turgo που χρησιμοποιήθηκε

Ο υδροστρόβιλος Turgo μπορεί να είναι από την αρχή εξολοκλήρου κατασκευασμένος και να έχει τη μορφή του σχήματος 3.6 (α) ή να αποτελείται από χωριστά κατασκευασμένους δρομέα και σκαφίδια που μετά συναρμολογούνται μεταξύ τους και να έχει τη μορφή των εικόνων 3.6 (β) και (γ) (η δεύτερη μορφή συναντάται συχνότερα στα pico-υδροηλεκτρικά συστήματα). Οι υδροστρόβιλοι Turgo μπορούν να τροφοδοτούνται από περισσότερα του ενός ακροφύσια, όπως και οι Pelton, αλλά όχι με περισσότερα από 4.



Σχήμα 3.7: Υδροστρόβιλος Turgo με τέσσερα ακροφύσια

3.2.3. Υδροστρόβιλος Εγκάρσιας Ροής

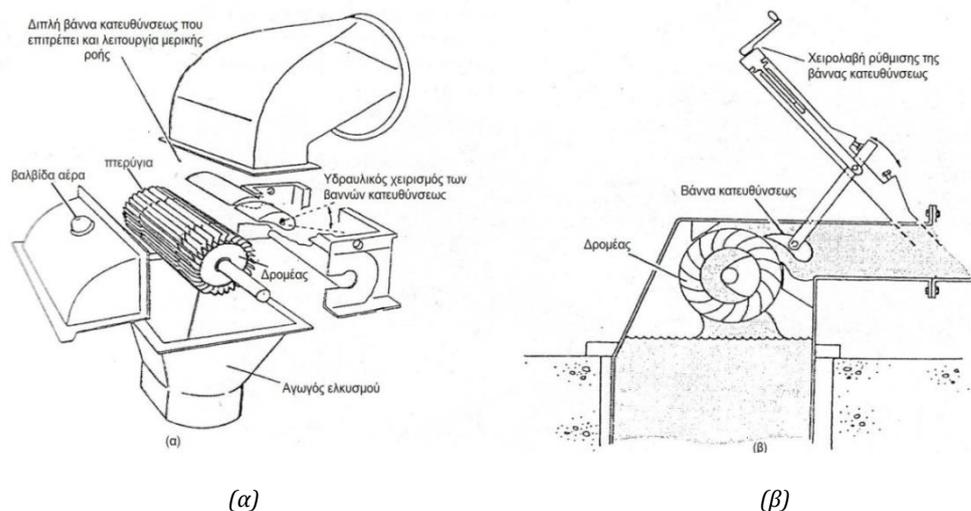


Σχήμα 3.8: Υδροστρόβιλος Crossflow

Ο υδροστρόβιλος εγκάρσιας ροής (ή αλλιώς Crossflow ή Banki ή Mitchell) είναι ένας υδροστρόβιλος δράσεως, που μπορεί να διαχειριστεί μεγαλύτερες παροχές νερού και χρησιμοποιείται σε υδροηλεκτρικά έργα μικρότερου υδραυλικού ύψους από τον υδροστρόβιλο Pelton.

Σε γενικές γραμμές, όσο αφορά τη δομή του, ο υδροστρόβιλος εγκάρσιας ροής χρησιμοποιεί ένα ορθογωνικής διατομής ακροφύσιο μεγαλύτερου μήκους, που οδηγεί το νερό καμπυλωτά σε ένα κυλινδρικού σχήματος δρομέα. Το νερό επιβραδύνεται σε δύο στάδια, συναντώντας τα πτερύγια

του δρομέα δύο φορές, καθώς διέρχεται σε αυτόν οριζόντια. Η σχεδίαση μεγαλύτερου μήκους, όσο αφορά τον δρομέα και το ακροφύσιο εισόδου, αυξάνει τη χωρητικότητα για παροχή του υδροστροβίλου, επιτρέποντας έτσι την αξιοποίηση μικρότερων υψών υδατόπτωσης.



Σχήμα 3.9: (α) Λίγο πιο εξελιγμένη διάταξη υδροστροβίλου Crossflow με απόδοση μέχρι και 80%, (β) Πιο απλή διάταξη υδροστροβίλου Crossflow με λίγο χαμηλότερη απόδοση

Η κατασκευή ενός υδροστροβίλου εγκάρσιας ροής μπορεί να είναι πιο εξεζητημένη και να καλύπτει μεγαλύτερο εύρος ροής με μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης, αλλά και πιο απλή και φθηνή αν συμβιβαστεί κανείς με έναν βαθμό απόδοσης γύρω στο 65% -70%. Στην πρώτη περίπτωση, έχουμε καλύτερη διαχείριση των διακυμάνσεων της ροής και διατήρηση σταθεράς πίεσης με τη βαλβίδα αέρος. Πιο αναλυτικά, η διάταξη του υδροστροβίλου Crossflow του σχήματος 3.18(α) έχει ως εξής:

Το ακροφύσιο για τον υδροστροβίλο εγκάρσιας ροής είναι ορθογώνιο και το πλάτος του ταιριάζει με το πλάτος του δρομέα. Η βάννα κατευθύνσεως (control vane) που τοποθετείται στο ακροφύσιο, οδηγεί την απαιτούμενη ποσότητα ροής στον δρομέα, επιτυγχάνει την απαραίτητη αυξομείωση της διατομής ανάλογα με τη μεταβολή της ροής και μπορεί να ελεγχθεί είτε χειροκίνητα, είτε αυτόματα με οδηγό. Ο δρομέας είναι το κεντρικό στέλεχος του συστήματος, έχει σχήμα κυλινδρικό και τα κύρια εξαρτήματά του είναι ο άξονας, τα πτερύγια και τα έδρανα περιστροφής. Τα πτερύγια τοποθετούνται στην περιφέρεια του τροχού και η λειτουργία τους είναι να μεταβάλλουν με ομαλό τρόπο την κατεύθυνση της εισερχόμενης από το ακροφύσιο ροής. Αύξηση του ενεργού υδραυλικού ύψους μπορεί να επιτευχθεί με τον αγωγό απαγωγής (ή ελκυσμού ή διέλευσης, draught tube), ο οποίος και πρέπει να είναι πάντα γεμάτος με νερό. Τέλος, η βαλβίδα αέρα μπορεί να λειτουργεί με πλωτήρα ή ελατήριο και χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της στάθμης του νερού μέσα στο κέλυφος του στροβίλου. Όταν ο υδροστροβίλος περιστρέφεται, ο αέρας μέσα στο κέλυφος παρασύρεται έξω, έτσι ώστε να αναπτυχθεί κενό, και μία στήλη αναρρόφησης (suction head) ανέρχεται μέσα στον αγωγό ελκυσμού.

Ο υδροστρόβιλος εγκάρσιας ροής χρησιμοποιείται σε πολλά micro-υδροηλεκτρικά συστήματα, λόγω των εύκολων τεχνικών κατασκευής του και της δυνατότητάς του να λειτουργεί σε μεγάλο εύρος υψών υδατόπτωσης και παροχών. Η περιοχή βέλτιστης απόδοσής του είναι σε μεσαία υδραυλικά ύψη, όπου δεν αναπτύσσει μεγάλες ταχύτητες περιστροφής και ο δρομέας δεν είναι πολύ μικρός. Ωστόσο, για τα μεγέθη ισχύος των pico-υδροηλεκτρικών, οι υδροστρόβιλοι αυτοί τείνουν να έχουν μεγάλα μεγέθη και να στέφονται σε σχετικά μικρές ταχύτητες. Ακόμα και για υδροστρόβιλους ισχύος 10kW, αποδόσεις υψηλότερες του 70% είναι δύσκολο να επιτευχθούν, αν και έχουν αναφερθεί στην περίπτωση βελτιστοποιημένων σε εργαστήρια υδροστρόβιλων Crossflow [12].

3.3. Υδροστρόβιλοι Αντιδράσεως

Οι υδροστρόβιλοι αντίδρασης χρησιμοποιούν την πίεση και την ταχύτητα του νερού για να αναπτύξουν μηχανική ισχύ. Το ρεύμα του νερού «περνάει συνεχώς» μέσα από ολόκληρη την περιφέρεια του υδροστρόβιλου και εξέρχεται αξονικά. Με τον τρόπο αυτό, το νερό παρέχει σταθερή ώθηση στον δρομέα (αντίθετα με τους υδροστρόβιλους δράσεως όπου υπάρχει μια σειρά από διαδοχικές κρούσεις επάνω στους κάδους του δρομέα) και η ροή διαμέσου της πτερωτής γίνεται με παράλληλη μεταβολή της πίεσης του νερού. Με σκοπό την επίτευξη της ομοιόμορφης τροφοδοσίας και λειτουργίας της πτερωτής, το τμήμα εισόδου περιβάλλει την πτερωτή και έχει τη μορφή σπειροειδούς κελύφους. Επίσης, οι υδροστρόβιλοι αυτής της κατηγορίας είναι εφοδιασμένοι στην έξοδό τους με έναν αγωγό απαγωγής, καθώς δημιουργεί ένα «ύψος αναρρόφησης», που συμβάλλει μαζί με το υδραυλικό ύψος στην παραγωγή ενέργειας πάνω στον στρόβιλο.



(α)



(β)

Σχήμα 3.10: Παραδείγματα υδροηλεκτρικών συστημάτων με υδροστροβίλους αντίδρασης που συνδέονται στον ίδιο άξονα με τη γεννήτρια

Οι υδροστροβίλοι αντιδράσεως είναι καταλληλότεροι για συστήματα με μικρά έως μεσαία υδραυλικά ύψη και μεγαλύτερες τιμές παροχής. Ειδικά, για εφαρμογές μικρού υδραυλικού ύψους, οι υδροστροβίλοι αυτοί προσφέρουν μικρότερες διαμέτρους στροβίλου και μεγαλύτερες ταχύτητες περιστροφής, αν και πρέπει να διαχειριστούν μεγάλες τιμές παροχής. Λόγω των μεγάλων ταχυτήτων στις οποίες μπορούν να περιστραφούν, οι υδροστροβίλοι αντιδράσεως προσφέρουν τη δυνατότητα για άμεση σύζευξή τους με τη γεννήτρια χωρίς την παρεμβολή κάποιου κιβωτίου ταχυτήτων, που θα αύξανε το κόστος και τις απώλειες του συστήματος. Ένα πρόσθετο πλεονέκτημά τους είναι ότι η λειτουργία τους μπορεί να αντιστραφεί και να χρησιμοποιηθούν και ως αντλίες όταν αυτό απαιτείται, για λόγους ενεργειακής αποθήκευσης. Επίσης, μπορούν να επιτύχουν μεγάλες τιμές βαθμού απόδοσης.

Ωστόσο, ο βαθμός απόδοσής τους μειώνεται πολύ σε συνθήκες μερικής ροής και χρειάζεται πιο πολύπλοκος και ακριβός μηχανισμός ελέγχου των αλλαγών της διεύθυνσης των πτερυγίων, ώστε η ροή να είναι πάντα κάθετη σε αυτά. Παράλληλα, οι υδροστροβίλοι αντίδρασης παρουσιάζουν προβλήματα λόγω του φαινομένου σπηλαίωσης, των μεγάλων αυξομειώσεων της πίεσης του νερού, το οποίο προκαλεί ζημιές στα πτερύγια. Τέλος, επιβάλλεται σε αυτούς η στεγανοποίηση μεταξύ του δρομέα και της στέγασης του στροβίλου, διότι λόγω διαρροής μπορεί να δημιουργηθεί μεγάλη απώλεια ισχύος. Συνεπώς, μπορεί οι επιδόσεις τους να υποβαθμιστούν, καθώς η άμμος και τα κατακάθια λάσπης (που μπορεί να μεταφέρει το νερό) προκαλούν μεγαλύτερη τριβή στη στεγάνωση, σε σχέση με τους υδροστροβίλους δράσεως [2].

Στην κατηγορία των υδροστρόβιλων αντιδράσεως ανήκουν ο υδροστρόβιλος Francis, ακτινικής και μικτής ροής, οι υδροστρόβιλοι αξονικής ροής, όπως ο Kaplan (τύπου προπέλας) και ο υδροστρόβιλος διαγώνιας ροής τύπου Deriaz. Αυτοί που χρησιμοποιούνται περισσότερο στα μικρο-υδροηλεκτρικά συστήματα είναι ο στρόβιλος Francis και ο Kaplan.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ

4.1. Σύγχρονες γεννήτριες μονίμων μαγνητών

Οι σύγχρονες γεννήτριες μονίμων μαγνητών, αν και χρησιμοποιήθηκαν και στο παρελθόν ως ανεμογεννήτριες, δεν είχαν ευρεία χρήση, καθώς η ποιότητα των μαγνητών δεν ήταν ικανοποιητική. Με τη βελτίωση, όμως, των μαγνητικών υλικών, και ιδιαίτερα με την ανάπτυξη των μαγνητών νεοδυμίου (NdFeB) τη δεκαετία του 80', οι μηχανές μονίμων μαγνητών ήρθαν και πάλι στο προσκήνιο [13].

Η χρήση μονίμων μαγνητών αντί ηλεκτρομαγνητών (ηλεκτρικής διέγερσης) στο δρομέα της γεννήτριας έχει διάφορα πλεονεκτήματα:

- πιο απλή κατασκευή, καθώς δε χρειάζονται ψήκτρες για τη μεταβίβαση της ενέργειας στο δρομέα [14].
- καλύτερη απόδοση αφού δεν υπάρχουν απώλειες διέγερσης ούτε απώλειες στις ψήκτρες
- αυτονομία, καθώς δεν απαιτείται ηλεκτρική τροφοδοσία από το δίκτυο ή από μπαταρία, κάτι σημαντικό για εφαρμογές σε απομονωμένες αγροτικές εγκαταστάσεις
- λιγότερες απαιτήσεις σε συντήρηση, λόγω της απουσίας ψηκτρών

Ένα άλλο πλεονέκτημα των γεννητριών μονίμων μαγνητών είναι ότι ο συντελεστής ισχύος δε μειώνεται όταν αυξάνονται οι πόλοι, όπως συμβαίνει στις γεννήτριες επαγωγής λόγω αύξησης της αυτεπαγωγής διαρροής (leakage inductance). Γι' αυτό το λόγο, οι γεννήτριες μονίμων μαγνητών είναι κατάλληλες για λειτουργία με πολλούς πόλους και χαμηλή ταχύτητα περιστροφής ως ανεμογεννήτριες άμεσης κίνησης (direct-drive).

Από την άλλη, οι γεννήτριες μονίμων μαγνητών έχουν το μειονέκτημα ότι η τάση εξόδου μπορεί να ελεγχθεί μόνω μέσω των στροφών της γεννήτριας και όχι μέσω της τάσης διέγερσης, αφού για δεδομένες στροφές έχουμε συγκεκριμένη τάση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η τάση εξόδου της γεννήτριας να μεταβάλλεται καθώς μεταβάλλονται οι στροφές [15].

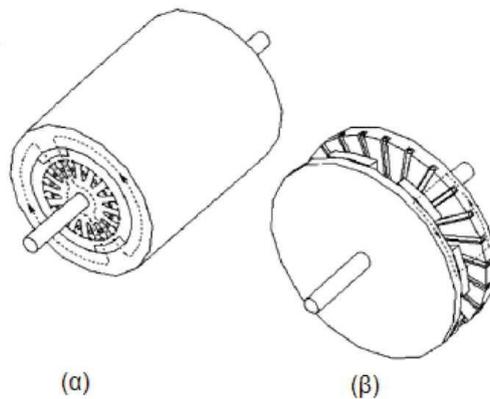
4.2. Σύγκριση γεννητριών αξονικής και ακτινικής ροής

Διακρίνουμε δύο βασικά είδη μηχανών μονίμων μαγνητών:

- 1) Τις μηχανές ακτινικής ροής (RFPM)
- 2) Τις μηχανές αξονικής ροής (AFPM)

Για λόγους συντομίας, σε αυτό το σύγγραμμα οι μηχανές μονίμων μαγνητών ακτινικής ροής θα αναφέρονται απλά ως μηχανές ακτινικής ροής και οι μηχανές μονίμων μαγνητών αξονικής ροής θα αναφέρονται ως μηχανές αξονικής ροής.

Η βασική δομική τους διαφορά, που παρατηρείται άμεσα στα σχήμα 4.1, είναι ότι η πρώτη έχει κυλινδρική δομή, ενώ η δεύτερη δισκοειδή. Στην πρώτη περίπτωση η ροή ταξιδεύει στην ακτινική διεύθυνση, ενώ στη δεύτερη στη διεύθυνση του άξονα της γεννήτριας.



Σχήμα 4.1: Μηχανή μονίμων μαγνητών α) ακτινικής ροής, β) αξονικής ροής

Οι μηχανές αξονικής ροής άργησαν ιδιαίτερα να χρησιμοποιηθούν, κυρίως για τους παρακάτω λόγους [5]:

- Ανάπτυξη υψηλής ελκτικής δύναμης μεταξύ στάτη και δρομέα
- Δυσκολίες που είχαν να κάνουν με την κατασκευή του πυρήνα της μηχανής
- Υψηλό κόστος κατασκευής
- Δυσκολία στην τελική συναρμολόγηση

Συγκρίνοντας όμως σήμερα τις δύο μηχανές μπορούμε να βρούμε αρκετά πλεονεκτήματα της μηχανής αξονικής ροής:

- 1) Δυνατότητα αύξησης της πυκνότητας ισχύος. Αυτό μπορεί εύκολα να συμβεί περιορίζοντας το υλικό του πυρήνα.
- 2) Ο λόγος της διαμέτρου του πυρήνα προς το μήκος του άξονα περιστροφής είναι πολύ μεγάλος. Έτσι οι μηχανές αξονικής ροής αερίζονται και ψύχονται πιο εύκολα, χωρίς εξωτερικό μηχανισμό.
- 3) Λόγω της δισκοειδούς της δομής μπορούμε πιο εύκολα να ρυθμίσουμε το μήκος διακένου.

- 4) Μεγαλώνοντας την εξωτερική διάμετρο του πυρήνα έχουμε τη δυνατότητα εύκολης εγκατάστασης μεγαλύτερου αριθμού πόλων και, άρα, λειτουργίας της μηχανής σε χαμηλές ταχύτητες περιστροφής (ισχύει η σχέση $n=120*f/p$). Αυτό καθιστά τη γεννήτρια αξονικής ροής κατάλληλη για αιολικά συστήματα χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων.
- 5) Τέλος, πολλοί δίσκοι μπορούν να συνδυαστούν για την επίτευξη υψηλότερης ισχύος ή ροπής.

Συμπερασματικά, οι μηχανές αξονικής ροής είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για κάποιες εφαρμογές ειδικού σκοπού, όπου οι ιδιότητές τους τους δίνουν ξεκάθαρα πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών μηχανών ακτινικής ροής.

Αποτελέσματα από ποσοτικές μελέτες όπου συγκρίνονται μηχανές αξονικής και ακτινικής ροής έχουν παρουσιαστεί σε άλλες διπλωματικές ([5]). Παρατίθενται χαρακτηριστικά τα αποτελέσματα μιας μελέτης που έχει γίνει στο [16].

Συγκρίνονται μία μικρή γεννήτρια αξονικής ροής και μία ακτινικής που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε αιολικές εφαρμογές. Η γεννήτρια αξονικής ροής δεν περιλαμβάνει πυρήνα σιδήρου σε αντίθεση με τη μηχανή ακτινικής ροής. Και οι δύο είναι σχεδιασμένες ώστε να δίνουν την ίδια ροπή, στις ίδιες στροφές και με την ίδια τάση εξόδου. Τα αποτελέσματα συνοπτικά έδειξαν τα εξής:

Αξονική ροή: Η κατασκευή είναι αρκετά απλή και φθηνή. Είναι σχετικά ελαφριά και πραγματοποιείται καλή απαγωγή θερμότητας δίχως εξοπλισμό αερισμού. Τέλος, η απόδοση της μηχανής παραμένει σταθερά υψηλή για ταχύτητες ανέμων από 3-10 m/s, κάτι που ενδιαφέρει πολύ στην περίπτωση μας καθώς στις εφαρμογές που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί η γεννήτρια που μελετάμε, θα συναντώνται και αρκετά χαμηλές ταχύτητες ανέμου (3-5 m/s).

Ακτινική Ροή: Η κατασκευή είναι αρκετά πιο πολύπλοκη κυρίως λόγω του τορροειδούς τυλίγματος που χρησιμοποιήθηκε και πιο ακριβή. Είναι βαρύτερη και επιτυγχάνει υψηλή απόδοση μόνο κοντά στις ονομαστικές συνθήκες (10 m/s). Αυτό την καθιστά ακατάλληλη καθώς οι μικρές ανεμογεννήτριες πολύ συχνά υφίστανται ανέμους αρκετά χαμηλότερους από αυτούς για τους οποίους σχεδιάστηκαν.

Μια ακόμα σύγκριση μεταξύ των δύο διαφορετικών τοπολογιών έχει γίνει στο [17]. Στη μελέτη αυτή ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής παράγει πολλές μηχανές αξονικής και ακτινικής ροής αφού του έχουν δοθεί συγκεκριμένες παράμετροι. Συγκρίνονται δηλαδή εικονικές μηχανές αξονικής ροής με αύλακες και ακτινικής ροής. Τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται είναι το κόστος προς ροπή και η ροπή προς όγκο.

Ως προς το πρώτο κριτήριο η μηχανή ακτινικής ροής είναι προτιμότερη. Με λίγα λόγια σε μια μηχανή ακτινικής ροής αύξηση της ροπής έχει μικρότερο κόστος απ' ό,τι στη μηχανή αξονικής ροής με αύλακες. Ως προς το δεύτερο κριτήριο, όμως, η μηχανή αξονικής ροής με αύλακες υπερτερεί της ακτινικής. Μια αύξηση του όγκου στις μηχανές αξονικής ροής θα δώσει πολύ μεγαλύτερη αύξηση ροπής απ' ό,τι στις μηχανές ακτινικής ροής. Το ερώτημα είναι ποιο κριτήριο μας ενδιαφέρει.

Βλέπουμε, λοιπόν, ότι ανάλογα με την εφαρμογή, τη δομή της μηχανής και τα κριτήρια που θέλουμε να ικανοποιούνται άλλοτε προκρίνονται οι μηχανές αξονικής ροής και άλλοτε οι μηχανές ακτινικής ροής και τα διάφορα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των δύο μηχανών πρέπει να ζυγιστούν καλά πριν κάνουμε την τελική μας επιλογή.

4.3. Οι γεννήτριες αξονικής ροής

4.3.1. Βασικά χαρακτηριστικά και τοπολογίες

Υπάρχουν αρκετά είδη και διατάξεις μηχανών αξονικής ροής, τα οποία παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:

- a) Μηχανές μονής πλευράς (Μονός δρομέας-Μονός στάτης)
 - Με πυρήνα σιδήρου με αύλακες
 - Με πυρήνα σιδήρου δίχως αύλακες
 - Χωρίς πυρήνα σιδήρου

- b) Μηχανές διπλής πλευράς
 - 1) Διπλός δρομέας- Μονός στάτης (εσωτερικός)
 - Με πυρήνα σιδήρου στο στάτη και με αύλακες
 - Με πυρήνα σιδήρου στο στάτη δίχως αύλακες
 - Χωρίς πυρήνα σιδήρου

 - 2) Διπλός στάτης-Μονός δρομέας (εσωτερικός)
 - Με πυρήνα σιδήρου στο στάτη και με αύλακες
 - Με πυρήνα σιδήρου στο στάτη δίχως αύλακες
 - Χωρίς πυρήνα σιδήρου

3) Πολλαπλών δίσκων

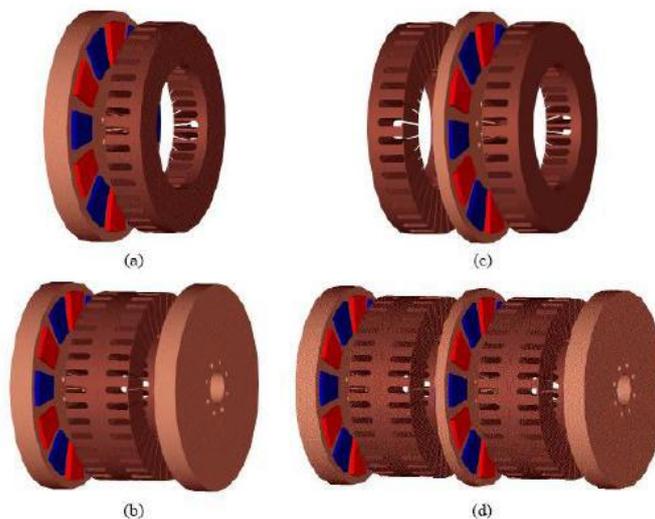
Πριν προχωρήσουμε καλό είναι να κάνουμε μια αναφορά σε δύο από τα χαρακτηριστικά που επαναλαμβάνονται σε κάθε είδος. Τις αύλακες και τον πυρήνα. Είδαμε ότι υπάρχουν μηχανές με ή χωρίς πυρήνα και εφόσον υπάρχει πυρήνας μηχανές με ή χωρίς αύλακες.

Αύλακες: Το πλεονέκτημα είναι ότι μειώνουν το διάκενο, φέρνοντας πιο κοντά το σίδηρο στους μαγνήτες, ενισχύοντας έτσι το μαγνητικό πεδίο. Έτσι έχουμε μεγαλύτερη ροπή με τους ίδιους μαγνήτες. Άμεσο δηλαδή αποτέλεσμα της ύπαρξης αυλάκων είναι η μείωση του όγκου των μαγνητών και άρα και του κόστους της μηχανής, αφού το κόστος των μαγνητών είναι αρκετά υψηλό. Οι αύλακες, εκτός των άλλων, προσφέρουν και μηχανική υποστήριξη στο τύλιγμα το οποίο περνάει από αυτές.

Το μειονέκτημα είναι η δημιουργία ροπής ευθυγράμμισης (Cogging Torque), η οποία οφείλεται στα δόντια (teeth). Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται καθώς οι μαγνήτες έλκονται περισσότερο από το σίδηρο όταν περνούν μπροστά από τις αύλακες από ότι όταν περνούν από το διάκενο μεταξύ των αυλάκων. Αν αφήσουμε ελεύθερο το σύστημα θα κινηθεί ώστε να ευθυγραμμιστεί κάπου. Αυτό μας δυσκολεύει γενικά στην εκκίνηση της γεννήτριας, ιδιαίτερα όταν σε αιολικές εφαρμογές έχουμε να αντιμετωπίσουμε χαμηλούς ανέμους. Στην περίπτωση του υδροηλεκτρικού, επειδή η γεννήτρια λειτουργεί σε σταθερές στροφές η ροπή ευθυγράμμισης δεν αποτελεί πρόβλημα. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί σε μείωση της απόδοσης, δονήσεις στη μηχανή

και δημιουργία θορύβου. Επίσης έχουμε και ελκτική δύναμη μεταξύ δρομέα και στάτη που μπορεί να παραμορφώσει τους δίσκους της γεννήτριας.

Σχέδια μηχανών που περιλαμβάνουν και αύλακες φαίνονται παρακάτω:



Σχήμα 4.2: Διάφορες τοπολογίες μηχανών με αύλακες

Πυρήνας: Ανυπαρξία πυρήνα σημαίνει ανυπαρξία απωλειών υστέρησης και δινορρευμάτων. Οι απώλειες στους μαγνήτες και στους δίσκους του δρομέα είναι αμελητέες. Επίσης, η απουσία σιδήρου έχει σαν αποτέλεσμα να μην υπάρχει ροπή ευθυγράμμισης και μαγνητικός κορεσμός με αποτέλεσμα η σχέση ροπής-ρεύματος να είναι γραμμική και η κυματομορφή της τάσης σχεδόν ημιτονοειδής. Παράλληλα, δεν υπάρχουν ελκτικές δυνάμεις μεταξύ στάτη και δρομέα, γεγονός που επιτρέπει την πιο εύκολη εκκίνηση της μηχανής αλλά και την πιο εύκολη συναρμολόγησή της.

Στην περίπτωση της υδρογεννήτριας, όμως, η ροπή ευθυγράμμισης και η δυσκολία στην εκκίνηση δεν μας απασχολούν διότι η γεννήτρια λειτουργεί σε σταθερές στροφές. Η ύπαρξη πυρήνα σημαίνει πιο ισχυρό μαγνητικό πεδίο, καθώς ο πυρήνας είναι ουσιαστικά αυτός που ενισχύει το πεδίο. Επομένως, απαιτείται λιγότερο μαγνητικό υλικό για την ενίσχυση του πεδίου, με αποτέλεσμα το χαμηλότερο κόστος της μηχανής [18].

4.3.2. Η επιλεγμένη τοπολογία: διπλός δρομέας - μονός στάτης με πυρήνα σιδήρου

Η γεννήτρια που κατασκευάσαμε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας είναι μια σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών αξονικής ροής, διπλού δρομέα – μονού στάτη με πυρήνα σκόνης σιδήρου.

Τα κριτήρια βάσει των οποίων επιλέχθηκε η συγκεκριμένη τοπολογία συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ	ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΠΟΥ ΙΚΑΝΟΠΟΙΕΙΤΑΙ
Γεννήτρια μονίμων μαγνητών	Δεν υπάρχουν ψήκτρες για τη διέγερση	<ul style="list-style-type: none"> • Απλή κατασκευή • Ελαφριά και συμπαγής κατασκευή • Λιγότερες απώλειες • Λίγες απαιτήσεις σε συντήρηση
	Δεν απαιτείται ηλεκτρική παροχή ή μπαταρίες για τη διέγερση της γεννήτριας	<ul style="list-style-type: none"> • Αυτονομία • Λιγότερες απώλειες
Γεννήτρια αξονικής ροής	Δισκοειδής κατασκευή	<ul style="list-style-type: none"> • Απλή κατασκευή • Συμπαγής κατασκευή
	Χρήση λιγότερου σιδήρου και λιγότερου μαγνητικού υλικού	<ul style="list-style-type: none"> • Χαμηλό κόστος
	Εύκολη ψύξη χωρίς εωτερικό μηχανισμό	<ul style="list-style-type: none"> • Λίγες απαιτήσεις σε συντήρηση
Διπλός δρομέας - μονός στάτης με πυρήνα σιδήρου	Ισχυρό μαγνητικό πεδίο	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλότερη απόδοση
	Λιγότερο μαγνητικό υλικό	<ul style="list-style-type: none"> • Χμηλότερο κόστος

Πίνακας 4.1: Πλεονεκτήματα της επιλεγμένης τοπολογίας βάσει συγκεκριμένων κριτηρίων

Απλή κατασκευή: δυνατότητα κατασκευής της ανεμογεννήτριας σε μια απλή βιοτεχνία ή εργαστήριο χωρίς εξειδικευμένα εργαλεία, από ανθρώπους χωρίς ιδιαίτερη προηγούμενη κατασκευαστική εμπειρία.

Ελαφριά και συμπαγής κατασκευή - Εύκολη συναρμολόγηση: δυνατότητα συναρμολόγησης χωρίς εξειδικευμένα μηχανήματα

Χαμηλό κόστος: Υδρογεννήτρια οικονομικά προσβάσιμη από ομάδες ανθρώπων με λιγότερες ευκαιρίες

Καλή απόδοση: Σε εφαρμογές χαμηλού κόστους επιδιώκουμε μεγάλες αποδόσεις ώστε να μην έχουμε πολλές απώλειες και άρα η γεννήτρια μας να δουλεύει όσο το δυνατόν πιο αποδοτικά.

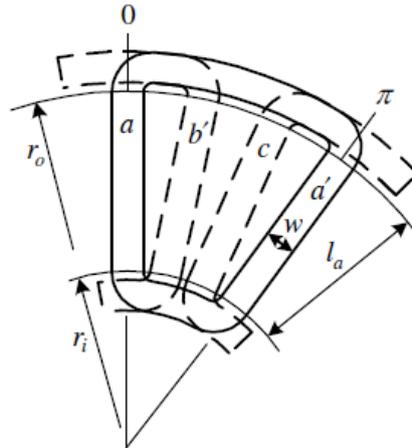
Αυτονομία: Σημαντική παράμετρος για εφαρμογές σε απομονωμένες, αγροτικές εγκαταστάσεις, όπου πιθανώς δεν υπάρχει εύκολη πρόσβαση σε υλικά και τεχνικούς.

Λίγες απαιτήσεις σε συντήρηση: Καταλληλότητα για εφαρμογές σε απομονωμένες αγροτικές εγκαταστάσεις με μειωμένη πρόσβαση σε υλικά και τεχνικούς συντήρησης. Δυνατότητα λειτουργίας από ανθρώπους χωρίς εξειδικευμένες γνώσεις.

4.4. Τα τυλίγματα

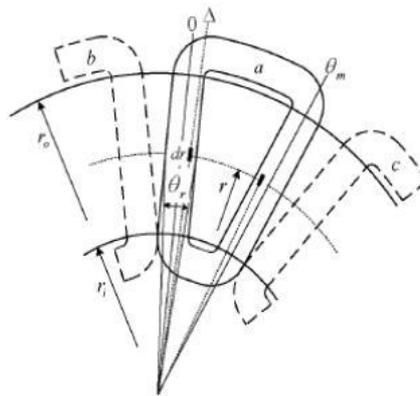
Οι διάφοροι τύποι τυλιγμάτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι οι εξής [18]:

1. **Επικαλυπτόμενο τύλιγμα.** Είναι διανεμημένο σε ιδεατές αύλακες όπως φαίνεται και στο σχήμα. Το ένα πηνίο τοποθετείται πάνω στο άλλο και γι' αυτό το τύλιγμα ονομάζεται επικαλυπτόμενο. Για να συμβεί αυτό οι άκρες του τυλίγματος πρέπει να λυγίσουν με αποτέλεσμα να γίνονται πιο μακριές.



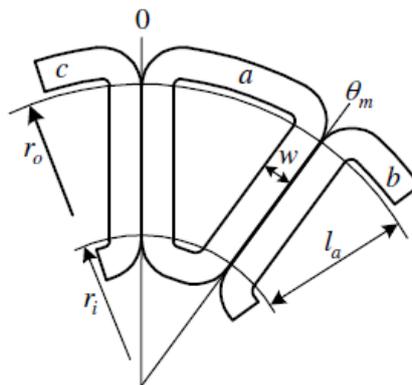
Σχήμα 4.3: Επικαλυπτόμενο τύλιγμα

2. Συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα μονής στρώσης. Τα πηνία σε αυτήν την περίπτωση είναι μη επικαλυπτόμενα. Σε κάθε ιδεατή αύλακα έχω μια πλευρά πηνίου ενώ τα πηνία έρχονται σε επαφή μόνο στην εσωτερική ακτίνα του στάτη.



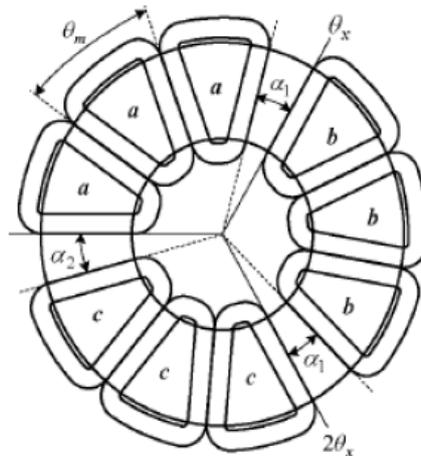
Σχήμα 4.4: Συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα μονής στρώσης.

3. Συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα διπλής στρώσης. Όπως και πριν τα πηνία είναι μη επικαλυπτόμενα. Σε κάθε, όμως, ιδεατή αύλακα συναντάμε δύο πλευρές διαφορετικών πηνίων. Οι δύο πλευρές εφάπτονται μεταξύ τους τόσο στην εσωτερική όσο και στην εξωτερική ακτίνα.



Σχήμα 4.5: Συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα διπλής στρώσης.

4. Συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα χωρισμένο σε ομάδες φάσεων. Όλα τα πηνία που ανήκουν στην ίδια φάση τοποθετούνται σε διπλανές θέσεις και σχηματίζουν μια ομάδα φάσης.



Σχήμα 4.6: Συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα χωρισμένο σε ομάδες φάσεων.

Στο συγκεντρωμένο τύλιγμα, τα άκρα τυλίγματος δεν χρειάζεται να λυγίσουν, αντίθετα με ότι συμβαίνει στο επικαλυπτόμενο, με αποτέλεσμα να είναι μικρότερο το συνολικό μήκος των πηνίων. Αυτό προσφέρει και ορισμένα πλεονεκτήματα [18]:

- Μικρότερο συνολικό όγκο χαλκού που χρειάζεται για τα πηνία
- Λιγότερες απώλειες χαλκού (χάρη στο μικρότερο όγκο χαλκού)
- Αυξημένη απόδοση
- Χαμηλότερο κόστος (χάρη στο μικρότερο αριθμό πηνίων και την απλούστερη δομή του τυλίγματος)
- Ευκολότερη κατασκευή του στάτη

Το μειονέκτημα των συγκεντρωμένων τυλιγμάτων είναι η ανάπτυξη χαμηλότερης ηλεκτρομαγνητικής ροπής λόγω του χαμηλού συντελεστή τυλίγματος. Αυτή η δυσκολία θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και να ξεπεραστεί με κατάλληλη σχεδίαση, όπως είναι η αύξηση του αριθμού των πόλων και η εύρεση της βέλτιστης αριθμητικής αναλογίας πόλων - πηνίων, λαμβάνοντας υπόψη το συντελεστή τυλίγματος.

Σύμφωνα δε με το [19], όσο αυξάνεται ο αριθμός των πόλων τόσο αυξάνεται και η απόδοση του συγκεντρωμένου τυλίγματος έναντι του επικαλυπτόμενου. Έτσι, η χρήση συγκεντρωμένου τυλίγματος θα λέγαμε ότι επιβάλλεται σε γεννήτριες με μεγάλο αριθμό πόλων.

Στο [19] συγκρίνονται τα διάφορα είδη τυλιγμάτων που αναφέραμε παραπάνω και αποδεικνύεται πως το συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσης αναπτύσσει υψηλότερη ροπή από τα υπόλοιπα. Αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς η πεπλεγμένη ροή είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση αυτή. Επίσης, όπως αναφέραμε και παραπάνω η μάζα του χαλκού που χρησιμοποιείται είναι σημαντικά μικρότερη από ότι με το επικαλυπτόμενο τύλιγμα και τέλος η κυματομορφή της τάσης είναι πιο ημιτονοειδής σε σχέση με αυτή που προκύπτει με χρήση επικαλυπτόμενου τυλίγματος. Πρέπει όμως εδώ να σημειώσουμε ότι το τύλιγμα αυτό έχει μεγαλύτερα άκρα σε σχέση με το συγκεντρωμένο μονής στρώσης.

Στην εφαρμογή μας επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε το συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα διπλής στρώσης για τα πλεονεκτήματα που συγκεντρώνει.

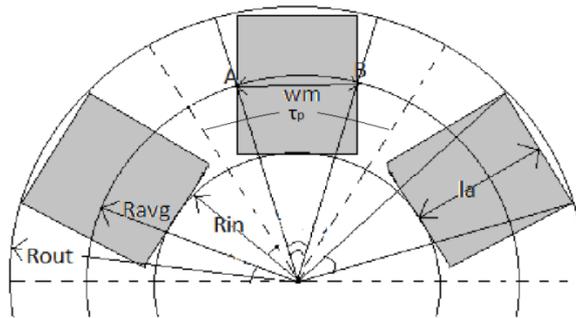
4.5. Θεωρητική Ανάλυση

4.5.1. Μαγνητική Ροή - ΗΕΔ - Ηλεκτρομαγνητική ροπή

Έστω γεννήτρια αξονικής ροής με τραπεζοειδείς μαγνήτες και πηνία. Το πολικό βήμα τ , καθώς και το πλάτος του μαγνήτη w_m δεν είναι σταθερά αλλά εξαρτώνται από την ακτίνα στην οποία αναφερόμαστε [18]. Για το πολικό βήμα μπορούμε να γράψουμε:

$$\tau_p(r) = \frac{2\pi r}{p} \quad (4.1)$$

όπου r η ακτίνα αναφοράς και p ο αριθμός των πόλων.



Σχήμα 4.7: Οι διάφορες ακτίνες αναφοράς και το πολικό βήμα σε μια γεννήτρια με ορθογώνιους μαγνήτες

Ένας πολύ σημαντικός συντελεστής για τη σχεδίαση της γεννήτριας είναι ο λόγος πλάτους μαγνήτη προς πλάτος πολικού βήματος:

$$a_i(r) = \frac{w_m(r)}{\tau_p(r)} = \frac{B_{avg}}{B_{mg}} \quad (4.2)$$

Η πυκνότητα μαγνητικής ροής στο διάκενο έχει ημιτονοειδή μορφή αν ο λόγος αυτός ισούται με $a_i = 2/\pi$.

Έστω τώρα ότι θέλουμε να υπολογίσουμε τη μαγνητική ροή ανά πόλο Φ_f :

$$\Phi_f = \int_{r_{in}}^{r_{out}} B dS$$

Όπου $dS = \frac{2\pi r}{p} dr$ η στοιχειώδης επιφάνεια ανά πόλο.

Θεωρώντας $B = B_{avg}$ έχουμε:

$$\Phi_f = \int_{r_{in}}^{r_{out}} a_i B_{mg} \frac{2\pi r}{p} dr = a_i B_{mg} \frac{\pi}{p} (r_{out}^2 - r_{in}^2) \quad (4.3)$$

Η ΗΕΔ μπορεί να υπολογιστεί παραγωγίζοντας τη θεμελιώδη συνιστώσα κυματομορφής της μαγνητικής ροής[8]:

$$\Phi_{f1} = \Phi_f \sin \omega t \rightarrow E_f = k_w N_\phi \frac{d\Phi_{f1}}{dt} = 2\pi f k_w N_\phi \Phi_f \cos \omega t$$

Και η ενεργός τιμή της ΗΕΔ προκύπτει:

$$E_f = \pi \sqrt{2} f k_w N_\phi \Phi_f = \pi \frac{\sqrt{2}}{2} p k_w N_\phi \frac{n}{60} \Phi_f \rightarrow$$

$$E_f = \frac{\pi p n q N_c k_w \Phi_f}{60 \sqrt{2}} \quad (4.4)$$

όπου:

- $N_\phi = q \cdot N_c$ ο αριθμός των ελιγμάτων ανά φάση, όπου N_c τα ελίγματα ανά πηνίο και q τα πηνία ανά φάση
- k_w ο συντελεστής τυλίγματος

Σύμφωνα με το [8] η ηλεκτρομαγνητική δύναμη F_x στο δρομέα μπορεί να υπολογιστεί από το γινόμενο της μαγνητικής και ηλεκτρικής φόρτισης και της ενεργούς επιφάνειας των μαγνητών $S = \pi(r_{out}^2 - r_{in}^2)$.

Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση (line current density) στην εσωτερική ακτίνα r_{in} είναι:

$$A = \frac{m_1 N_\phi I_a}{\pi r_{in}} \quad (4.5)$$

Έτσι, η μέση ηλεκτρομαγνητική ροπή σύμφωνα με το [18] ισούται με:

$$T_d = F_x r_{in} = 2\pi B_{avg} A (r_{out}^2 - r_{in}^2) r_{in} = 2\pi B_{avg} A r_{out}^3 (k_d - k_d^3) \quad (4.6)$$

όπου k_d είναι ο λόγος εσωτερική προς εξωτερική ακτίνα που ισούται με:

$$k_d = \frac{r_{in}}{r_{out}} \quad (4.7)$$

Από τη σχέση (4.6) βλέπουμε ότι η ηλεκτρομαγνητική ροπή στις μηχανές αξονικής ροής είναι ανάλογη με την εξωτερική ακτίνα στον κύβο.

4.5.2. Ανάλυση του τυλίγματος

4.5.2.1. Πυκνότητα ρεύματος

Ένα στοιχείο το οποίο είναι πολύ σημαντικό όσον αφορά το τύλιγμα και επηρεάζει όλη τη δομή και το μέγεθος της γεννήτριας είναι η μέγιστη πυκνότητα ρεύματος που μπορεί να υποστεί το τύλιγμα. Συνηθισμένες τιμές της είναι $J_{max} = 4 - 5 \text{ A/mm}^2$ για μηχανές μονίμων μαγνητών. Στην περίπτωση, όμως, μιας μηχανής αξονικής ροής μπορούμε να φτάσουμε μέχρι και τα 6 A/mm^2 , μιας και όπως έχουμε αναφέρει οι μηχανές αυτές έχουν πολύ καλό αερισμό σε σχέση με άλλες.

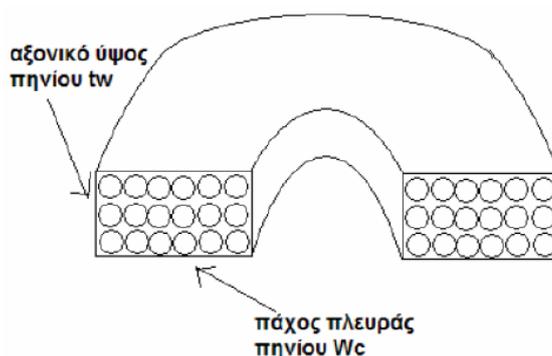
Πιο συγκεκριμένα μπορούμε να γράψουμε:

$$J_{max} = \frac{I_{amax}}{sc} \quad (4.8)$$

Όπου,

- I_{amax} το μέγιστο ρεύμα της γεννήτριας
- sc εμβαδόν διατομής μιας σπείρας ενός πηνίου

Όπως θα δούμε αργότερα το εμβαδόν διατομής μιας σπείρας του πηνίου sc παίζει σημαντικό ρόλο, ιδιαίτερα σε μεγάλες ισχύεις όπου τα ρεύματα είναι αρκετά υψηλά και άρα το εμβαδό αυτό πρέπει να 'ναι αρκετά μεγάλο ώστε να οδηγήσει σε μικρότερη αντίσταση του χαλκού και άρα λιγότερες απώλειες στο τύλιγμα.



Σχήμα 4.8: Το αξονικό ύψος, το πάχος πλευράς και τα ελίγματα ενός πηνίου.

Τα χάλκινα ελίγματα δεν καταλαμβάνουν ολόκληρη τη διατομή του πηνίου, εξαιτίας της κυκλικής διατομής τους και της μόνωσης που διαθέτουν. Για αυτό, ορίζεται ο συντελεστής πλήρωσης του πηνίου, k_f , που είναι ίσος με την επιφάνεια του χαλκού που βρίσκεται στη διατομή ενός πηνίου προς τη συνολική επιφάνεια της διατομής:

$$k_f = \frac{S_{copper}}{w_c \cdot t_w} = \frac{N_c \cdot sc}{w_c \cdot t_w} \quad (4.9)$$

όπου N_c ο αριθμός των ελιγμάτων του πηνίου, w_c το πάχος πηνίου και το t_w το αξονικό ύψος πηνίου, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.8. Αυτή είναι η θεωρητική σχέση για τον υπολογισμό του k_f . Στο κεφάλαιο της διαστασιολόγησης θα μελετηθεί περισσότερο αυτός ο συντελεστής και το πώς υπολογίζεται τελικά η τιμή του.

Το εμβαδόν διατομής μιας σπείρας μπορεί τώρα να εκφραστεί:

$$sc = \frac{k_f \cdot w_c \cdot t_w}{N_c} \quad (4.10)$$

Άρα η πυκνότητα ρεύματος γράφεται:

$$J_{max} = \frac{N_c I_{a,max}}{k_f w_c t_w}$$

4.5.2.2. Αντίσταση και αυτεπαγωγή τυλίγματος

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε την τιμή της αντίστασης και της αυτεπαγωγής του τυλίγματος, καθώς και τη συνολική μάζα του χαλκού που θα χρησιμοποιηθεί. Αυτό θα βοηθήσει πολύ αργότερα στην εκτίμηση τόσο του κόστους, όσο και του βάρους της γεννήτριας. Ιδιαίτερα η αντίσταση του τυλίγματος και κατ' επέκταση οι απώλειες που θα προκαλεί θα παίζει σημαντικό ρόλο αργότερα στη βελτιστοποίησή μας. Επίσης, ας μην ξεχνάμε ότι η αγορά του χαλκού θα γίνει με βάση το βάρος του.

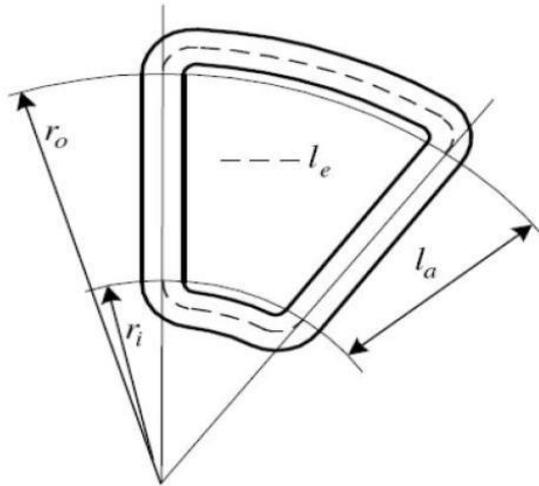
Για το συγκεντρωμένο τύλιγμα, το οποίο επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε, το μέσο μήκος ελίγματος l_{avg} υπολογίζεται από τη σχέση:

$$l_{avg} = 2l_a + l_{ec} \quad (4.11)$$

όπου,

- $l_a = R_{out} + R_{in}$ το ενεργό μήκος της γεννήτριας
- $l_{ec} = 2(R_{out} + R_{in}) \cdot \frac{\theta_m - 0.6\theta_{re}}{p}$ τα άκρα του τυλίγματος
- $\theta_m = \frac{\pi p}{Q}$ η ηλεκτρική γωνία βήματος πηνίου (Q ο συνολικός αριθμός πηνίων της γεννήτριας)

- θ_{re} η ηλεκτρική γωνία πάχους πλευράς πηνίου, της οποίας χρησιμοποιούμε τη μέγιστη τιμή $\theta_{re} = \frac{k_d}{1+k_d} \cdot \theta_m$ [5]



Σχήμα 4.9: Κάτοψη του πηνίου όπου φαίνονται και τα άκρα τυλίγματος.

Γνωρίζοντας το συνολικό μήκος ενός ελίγματος μπορούμε πλέον να βρούμε την αντίσταση ενός πηνίου με N_c ελίγματα:

$$R_c = N_c \cdot \rho_t \cdot \frac{l_{avg}}{sc} = N_c \cdot \rho_t \cdot \frac{2l_a + l_{ec}}{sc} \quad (4.12)$$

όπου, ρ_t η ειδική θερμοκρασία στην οποία λειτουργεί η γεννήτρια.

Η αυτεπαγωγή μιας φάσης του τυλίγματος L_s έχει υπολογιστεί στο [18] και είναι:

$$L_s = \frac{q \cdot l_{avg}^2 \cdot N_c^2}{t_w} \cdot 10^{-7} \cdot K_n \quad (4.13)$$

όπου, K_n η σταθερά του Nagaoka:

$$K_n = \frac{1}{1 + 0.9 \cdot \frac{l_{avg}}{2\pi t_w} + 0.32 \cdot \frac{2\pi w_c}{l_{avg}} + 0.84 \cdot \frac{w_c}{t_w}}$$

Πρόκειται ουσιαστικά για έναν συντελεστή διόρθωσης καθώς κατά τη λειτουργία της γεννήτριας τα πηνία μαγνητίζονται καθιστώντας το πεδίο μη ομοιόμορφο.

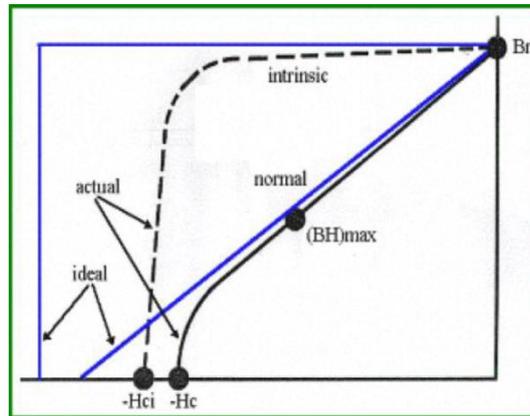
Τέλος, η μάζα χαλκού που θα χρησιμοποιηθεί υπολογίζεται απλά από τον τύπο της πυκνότητας:

$$m_{cu} = 3N_{\phi} l_{avg} s c \rho_{cu}$$

όπου, ρ_{cu} η πυκνότητα του χαλκού.

4.5.3. Το μαγνητικό κύκλωμα

Πολύ σημαντικό ρόλο στην ανάλυσή μας παίζει και η ανάλυση του μαγνητικού κυκλώματος της γεννήτριας. Πρωτεύοντα ρόλο στο κύκλωμα αυτό έχει ο μαγνήτης, οπότε πρέπει να δούμε από τι χαρακτηρίζεται ένας μόνιμος μαγνήτης.



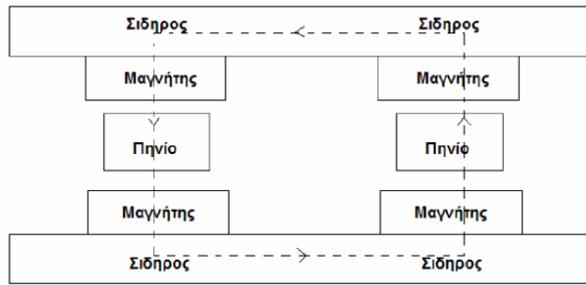
Σχήμα 4.10: Γενική μορφή της καμπύλης απομαγνήτισης.

Ένας μόνιμος μαγνήτης χαρακτηρίζεται σχεδόν πλήρως από την καμπύλη απομαγνήτισής του, που φαίνεται παραπάνω. Στην καμπύλη αυτή μας ενδιαφέρει το μέγεθος της παραμένουσας μαγνήτισης B_r (Tesla) περισσότερο, καθώς και η συνεχούσα δύναμη H_c (kA/m). Γενικά, ο μαγνήτης πρέπει να λειτουργεί στο σημείο εκείνο που θα μπορεί να αποδώσει τη μέγιστη ενέργεια $(BH)_{max}$. Το σημείο αυτό είναι στο γόνατο της καμπύλης απομαγνήτισης και το πεδίο μπορεί να υπολογιστεί εκεί ίσο με $B = B_r/2$. Με λίγα λόγια μπορούμε να υποθέσουμε για την πυκνότητα μαγνητικής ροής στην επιφάνεια των μαγνητών:

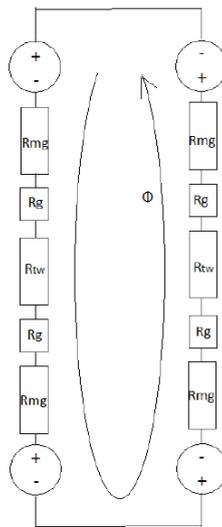
$$B_{mg} = \frac{B_r}{2} \quad (4.14)$$

Φυσικά κάθε μόνιμος μαγνήτης έχει δικές του χαρακτηριστικές ανάλογα με το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένος και το πόσο ισχυρός είναι (βαθμός του μαγνήτη), οι οποίες θα μας δώσουν και τις απαραίτητες πληροφορίες οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν κατά την προσομοίωση του μαγνήτη αυτού.

Μια πλάγια όψη της γεννήτριας καθώς και το αντίστοιχο μαγνητικό κύκλωμα που προκύπτει από αυτή φαίνεται στα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 4.11: Η πλάγια όψη της γεννήτριας που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή του κυκλώματος.



Σχήμα 4.12: Το μαγνητικό κύκλωμα της γεννήτριας.

Η ανάλυση του μαγνητικού κυκλώματος έχει γίνει στο [20] από όπου προκύπτει η σχέση:

$$B_{mg} = \frac{B_r}{1 + \mu_{rrec} \frac{g + 0.5t_w}{h_m} k_{sat}} \quad (4.15)$$

όπου:

- $k_{sat} = 1 + \frac{l_{Fe}}{2\mu_r(g + 0.5t_w)}$: ο συντελεστής κορεσμού. (αν δεν υπάρχει πυρήνας $k_{sat}=1$)
- μ_r η διαπερατότητα του υλικού του πυρήνα. Στο μείγμα σκόνης σιδήρου που φτιάξαμε υπολογίζουμε ότι είναι κοντά στο $\mu_r = 30$ [21].
- μ_{rrec} η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του μαγνήτη ίση με $\mu_{rrec} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B_r}{H_c}$ και μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού ίση με $4\pi \cdot 10^{-7}$.
- h_m το πάχος του μαγνήτη (αξονικό ύψος)
- g το αξονικό ύψος του διακένου ή απλά το διάκενο

Η ανάλυση αυτή είναι καλή, αν και υποθέτει ότι το πεδίο B_{mg} στην επιφάνεια του μαγνήτη διατηρείται σε όλο το αξονικό ύψος της γεννήτριας, υπόθεση που μάλλον βασίζεται στην ύπαρξη πυρήνα στη γεννήτρια.

Για το μαγνητικό κύκλωμα θεωρούμε τους μαγνήτες πηγές τάσης με τάση:

$$V = \frac{h_m B_r}{\mu_0 \mu_{rrec}}$$

η μαγνητική ροή Φ ρεύμα με μέτρο:

$$I = B \cdot S$$

και τα υλικά στα οποία ταξιδεύει η τελευταία (αέρας και μαγνήτης) αντιστάσεις:

$$R_{mg} = \frac{h_m}{S \mu_0 \mu_{rrec}}$$

$$R_g = \frac{g}{S \mu_0}$$

$$R_{tw} = \frac{t_w}{S \mu_0}$$

Εφαρμόζοντας, λοιπόν, έναν απλό νόμο του Ohm και κάνοντας τις παραπάνω παραδοχές για την πυκνότητα μαγνητικής ροής σε κάθε σημείο μπορούμε να γράψουμε και την παρακάτω σχέση η οποία απαιτεί επαλήθευση μέσω προσομοίωσης στον υπολογιστή πριν χρησιμοποιηθεί:

$$t_w = \frac{2}{B_{max}} \left\{ \frac{h_m}{\mu_{rrec}} (B_r - B_{mg}) - B_{mg} g \right\} \quad (4.16)$$

4.5.4. Μελέτη απωλειών και ισοδύναμο κύκλωμα

Στο σημείο αυτό γίνεται μελέτη των απωλειών σε μια μηχανή αξονικής ροής με μόνιμους μαγνήτες η οποία δεν έχει πυρήνα. Εξάγεται το ισοδύναμο κύκλωμα για τη μοντελοποίηση αυτών καθώς και το ισοζύγιο ενέργειας. Οι απώλειες μπορούν γενικά να χωριστούν σε απώλειες στο στάτη, απώλειες στο δρομέα και απώλειες περιστροφής.

4.5.4.1. Μελέτη απωλειών

Απώλειες στο στάτη:

-Απώλειες χαλκού: Οι απώλειες χαλκού αποτελούν τη μεγαλύτερη συνιστώσα απωλειών και είναι οι ωμικές απώλειες των τυλιγμάτων του στάτη:

$$P_{cu} = 3I_{ac}^2 R_{phase} \quad (4.17)$$

Καθότι στη μελέτη μας, όπως θα δούμε, ερχόμαστε αντιμέτωποι με μεγάλες τιμές ρεύματος, οι απώλειες χαλκού παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο και βασικό μας μέλημα είναι ο περιορισμός τους, τόσο για να επιτύχουμε την επιθυμητή απόδοση όσο και για να εξαλείψουμε φαινόμενα υπερθέρμανσης.

Στην παρούσα εργασία το επιδερμικό φαινόμενο έχει αγνοηθεί.

-Απώλειες δινορρευμάτων τυλίγματος: Συνήθως οι απώλειες δινορρευμάτων εμφανίζονται στον πυρήνα της γεννήτριας.. Απώλειες δινορρευμάτων εξακολουθούν, όμως, να υπάρχουν στο τύλιγμα, σε τέτοιο βαθμό που κρίνεται σκόπιμο να υπολογιστούν.

Προκαλούνται από τα εναλλασσόμενα μαγνητικά πεδία στο τύλιγμα, τα οποία δημιουργούνται όταν οι μόνιμοι μαγνήτες περνούν πάνω από τους αγωγούς του τυλίγματος. Σε περίπτωση που η μηχανή λειτουργεί σε σχετικά υψηλές συχνότητες, τα παραγόμενα δινορρεύματα προκαλούν σημαντικές απώλειες στη μηχανή. Οι απώλειες αυτές οδηγούν σε αύξηση της θερμοκρασίας του τυλίγματος και σε μείωση της απόδοσης της μηχανής. Το επιδερμικό φαινόμενο, που εμφανίζεται σαν αποτέλεσμα των απωλειών αυτών, μπορεί να περιοριστεί με χρήση πολύκλωνων αγωγών στο τύλιγμα.

Οφείλουμε να αναφέρουμε εδώ ότι μπορούμε να επιτύχουμε περιορισμό των δινορρευμάτων, με περιέλιξη και αντιμετάθεση των αγωγών του τυλίγματος. Σε περίπτωση όμως που οι σπείρες σε κάθε πηνίο είναι πολλές, αρκεί η περιέλιξη για να μειωθούν τα δινορρεύματα.

Στην εφαρμογή που μελετάμε, στην οποία έχουμε μεγάλο αριθμό πόλων (και άρα υψηλή συχνότητα), οι απώλειες αυτές δεν είναι αμελητέες και δίνονται από τον τύπο:

$$P_{eddy} = \frac{\pi I_{ac}^4 B_p^2 \omega_e^2 Q N_c N_p}{32 \rho_{cu}} \quad (4.18)$$

όπου:

- $N_p = 1$ ο αριθμός των παράλληλων κλώνων ανα αγωγό
- ω_e η ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα
- ρ_{cu} η ειδική αντίσταση του χαλκού

Όπως φαίνεται στον τύπο, οι απώλειες αυτές είναι ανάλογες της τέταρτης δύναμης της διατομής του χαλκού, γεγονός που αναδεικνύει τη σημασία των πολύκλωνων αγωγών.

-Απώλειες δινορρευμάτων πυρήνα: Οι απώλειες δινορρευμάτων που αναπτύσσονται στον πυρήνα υπολογίζονται με τον παρακάτω τύπο:

$$\Delta P_{1Fe} = \Delta_{p50} \left(\frac{f}{50}\right)^4 [k_{adt} B_{1t}^2 m_{1t} + k_{ady} B_{1y}^2 m_{1y}]$$

όπου,

- k_{adt}, k_{ady} είναι συντελεστές αύξησης των απωλειών λόγω της μεταλλουργικής και της κατασκευαστικής επεξεργασίας
- Δ_{p50} είναι οι συγκεκριμένες απώλειες του υλικού, μετρημένες σε W/kg για 1T στα 50 Hz,
- B_{1t} η μαγνητική επαγωγή στο δόντι,
- B_{1y} η μαγνητική επαγωγή στο ζυγό
- m_{1t} η μάζα του δοντιού
- m_{1y} η μάζα του ζυγού
- f η συχνότητα λειτουργίας.

Απώλειες στο δρομέα:

Απώλειες υπάρχουν και στο δρομέα. Συγκεκριμένα στους μόνιμους μαγνήτες υπάρχουν απώλειες οι οποίες οφείλονται σε αρμονικές υψηλής τάξης της πυκνότητας μαγνητικής ροής. Δίχως πυρήνα οι απώλειες αυτές είναι πολύ μικρές και δε λαμβάνονται υπόψη στο παρόν κείμενο. Επιπλέον απώλειες προκαλεί και ο σίδηρος που συγκρατεί τους μαγνήτες, αλλά και αυτές είναι πολύ μικρές οπότε δε λαμβάνονται υπόψη.

Απώλειες περιστροφής:

Οι απώλειες περιστροφής ή μηχανικές απώλειες αποτελούνται από δύο συνιστώσες: Τις απώλειες τριβών στα ρουλεμάν και τις απώλειες ανεμισμού. Οι τελευταίες είναι πολύ μικρές και αγνοούνται. Για τις απώλειες τριβών σε μικρές μηχανές δίνεται ο τύπος [18]:

$$P_{rot} = 0.06 k_{fb} (m_r + m_{sh}) n \quad (4.19)$$

όπου:

- k_{fb} συντελεστής τριβών με τιμές 1-3 m²/s²
- m_r η μάζα του δρομέα σε kg
- m_{sh} η μάζα του άξονα σε kg
- n οι στροφές της γεννήτριας

4.5.4.2. Ισοζύγιο ενέργειας - Ισοδύναμο κύκλωμα

Είσοδος της γεννήτριας είναι η αεροδυναμική ή μηχανική ισχύς την οποία θα συμβολίζουμε με P_{mech} ή P_{air} . Είναι η ισχύς που μπορεί να απορροφήσει η φτερωτή από τον άνεμο. Αφαιρώντας τις απώλειες περιστροφής προκύπτει η εσωτερική ή ηλεκτρομαγνητική ισχύς:

$$P_{HM} = P_{mech} - P_{rot}$$

Στη συνέχεια αφαιρώντας τις απώλειες του τυλίγματος (δινორρευμάτων και ωμικές) και του πυρήνα προκύπτει η ηλεκτρική ισχύς (ισχύς εξόδου):

$$P_{\eta\lambda} = P_{HM} - P_{eddy} - P_{cu} = P_{mech} - P_{rot} - P_{eddy} - P_{cu} - P_{core}$$

Η απόδοση στη συνέχεια υπολογίζεται από τον τύπο:

$$n = \frac{P_{\eta\lambda}}{P_{\eta\lambda} + P_{cu} + P_{eddy} + P_{rot}} \quad (4.20)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο : ΤΡΟΠΟΙ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΕΝΟΣ MICRO-ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

5.1. Λειτουργία μεταβλητών στροφών ενός micro-υδροηλεκτρικού

Μία λειτουργία, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα πλέον λόγω της ανάπτυξης των ηλεκτρονικών ισχύος είναι η λειτουργία μικρών υδροστροβίλων υπό μεταβλητές στροφές, ενώ τροφοδοτούν δίκτυο σταθερής συχνότητας. Η τεχνική αυτή παρουσιάζει ενδιαφέρον στην περίπτωση των αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών έργων (όπως αυτά που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές αντλησιοταμίευσης) όπου και εφαρμόστηκε πρώτα. Το ενδιαφέρον λειτουργίας μικρών υδροστροβίλων με μεταβλητές στροφές συνήθως περιορίζεται στην περίπτωση υδροστροβίλων αξονικής ροής (αν και αυτό δεν είναι απόλυτο) όταν ο δρομέας έχει σταθερά πτερύγια ή όταν η διαθέσιμη υδραυλική πτώση παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση. Στην πρώτη περίπτωση αυξάνεται το εύρος λειτουργίας του υδροστροβίλου, ο οποίος είναι απλούστερος και μικρότερου κόστους λόγω της απλής ρύθμισης που διαθέτει. Στην ειδική περίπτωση κατά την οποία η διαθέσιμη υδραυλική πτώση παρουσιάζει έντονη διακύμανση (όπως συμβαίνει σε τεχνητές δεξαμενές ρύθμισης της πλημμυρικής παροχής) ο αξονικής ροής υδροστροβίλος, θα λειτουργεί υπό μεγάλα χρονικά διαστήματα σε περιοχές μικρού βαθμού απόδοσης, άρα με μειωμένη παραγωγή ενέργειας. Με την υιοθέτηση της τεχνικής λειτουργίας με μεταβλητές στροφές (μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής για μεγαλύτερες τιμές της υδραυλικής πτώσης) η ταχύτητα περιστροφής του υδροστροβίλου συνεχώς προσαρμόζεται στην τιμή της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης, ώστε να λειτουργεί υπό την μέγιστη κάθε φορά τιμή του ολικού βαθμού απόδοσης. Ωστόσο, μπορεί η αύξηση της παραγόμενης ενέργειας να υπερκαλύπτεται από την αύξηση του κόστους του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού και γι'αυτό πρέπει πάντα να ελέγχεται η οικονομική βιωσιμότητα της εφαρμογής αυτής.

Για την επίτευξη μεταβλητών στροφών του υδροστροβίλου και τροφοδοσία του δικτύου με σταθερή συχνότητα, η πλέον συνηθισμένη διάταξη είναι αυτή που περιλαμβάνει γεννήτρια άμεσα συζευγμένη με τον υδροστρόβιλο. Άρα, η συχνότητα f του ηλεκτρικού ρεύματος που παράγει η γεννήτρια είναι μεταβαλλόμενη και ουσιαστικά ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής της. Στη συνέχεια παρεμβάλλεται ένας μετατροπέας AC-DC και DC-AC μέσω του οποίου το εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα συχνότητας f μετατρέπεται σε συνεχές και στη συνέχεια σε εναλλασσόμενο συχνότητας σταθερής και ίσης προς τη συχνότητα f του τροφοδοτούμενου ηλεκτρικού δικτύου [9].



Σχήμα 5.1: Σχηματική διάταξη για τη λειτουργία υδροστροβίλου με μεταβλητές στροφές [9]

5.2. Εισαγωγή στους δυνατούς τρόπους σύνδεσης ενός micro - υδροηλεκτρικού συστήματος

Ανάλογα με τις συνθήκες υλοποίησης του συστήματος αλλά και τις απαιτήσεις τροφοδότησης, μία υδροηλεκτρική μονάδα παραγωγής μπορεί να τροφοδοτήσει ένα dc σύστημα βασιζόμενο σε μπαταρίες, είτε ένα ac σύστημα με ή χωρίς τη συμβολή μπαταριών. Το dc σύστημα είναι αυτόνομο, ενώ στην περίπτωση του ac συστήματος, η υδρογεννήτρια μπορεί να συνδεθεί στο υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο ή σε περίπτωση που αυτό δεν είναι οικονομικά ωφέλιμο (όπως όταν βρίσκεται σε πολύ μεγάλη απόσταση από αυτό) μπορεί να τροφοδοτήσει μόνη της ή σε συνδυασμό με άλλες πηγές ένα αυτόνομο δίκτυο. Το είδος της χρησιμοποιούμενης γεννήτριας εξαρτάται από τον τρόπο σύνδεσης αλλά και από το είδος και το μέγεθος των φορτίων.

5.3. DC σύνδεση - Σύστημα βασισμένο σε μπαταρίες

Στην περίπτωση μίας απομονωμένης εγκατάστασης που αφορά κυρίως τα φορτία μίας οικίας προτιμάται η χρήση ενός αυτόνομου dc συστήματος με μπαταρίες. Η διάταξη είναι απλή και φθηνή και το υδροηλεκτρικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί και να λειτουργήσει σε συνδυασμό και με άλλες πηγές, όπως φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες αλλά και εφεδρική ντηζελογεννήτρια. Η τυπική διάταξη ενός αυτόνομου dc συστήματος φαίνεται στο σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2: Τυπική διάταξη ενός dc αυτόνομου συστήματος που τροφοδοτείται από ένα micro-υδροηλεκτρικό

Η γεννήτρια που χρησιμοποιείται μπορεί να είναι σύγχρονη με τύλιγμα διέγερσης ή μονίμων μαγνητών, γεννήτρια επαγωγής αλλά και γεννήτρια συνεχούς ρεύματος. Στην τελευταία περίπτωση, που εφαρμοζόταν κυρίως τα προηγούμενα χρόνια, ο ανορθωτής δεν χρειάζεται. Η σύγχρονη γεννήτρια με τύλιγμα διέγερσης και η γεννήτρια επαγωγής που μπορεί να χρησιμοποιηθούν είναι αυτοδιεγερόμενες. Στην περίπτωση της γεννήτριας επαγωγής, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί συστοιχία πυκνωτών για τη διέγερσή της. Επίσης, η σύγχρονη γεννήτρια με τύλιγμα διέγερσης σπάνια χρησιμοποιείται σε αυτόν τον τύπο σύνδεσης γιατί τα συστήματα αυτά είναι συνήθως πολύ μικρά και η γεννήτρια είναι οικονομικά ασύμφορη.

Η έξοδος της γεννήτριας ανορθώνεται από έναν τριφασικό ανορθωτή γέφυρας και γίνεται ίση με την τάση της συστοιχίας των μπαταριών. Μεταξύ όμως του ανορθωτή και των συσσωρευτών παρεμβάλλεται ο ελεγκτής φόρτισης προκειμένου να ελέγξει τη φόρτιση και εκφόρτιση των μπαταριών. Οι μπαταρίες πέραν του ότι δεν πρέπει να φορτίζονται όταν είναι ήδη φορτισμένες μέχρι ενός σημείου και αντίστοιχα να εκφορτίζονται όταν δεν είναι φορτισμένες, πρέπει να ακολουθούν ιδιαίτερους αλγορίθμους για τη φόρτιση και την εκφόρτισή τους. Αυτή τη λειτουργία εκτελεί ο ρυθμιστής φόρτισης, ο οποίος όταν παρατηρήσει ότι οι μπαταρίες είναι φορτισμένες θα διοχετεύσει την περισσευούμενη ισχύ σε ένα απορριπτικό φορτίο (όπου η ισχύς θα μετατραπεί σε θερμότητα), ενώ όταν παρατηρήσει ότι η φόρτισή τους έχει πέσει κάτω από ένα επίπεδο θα διοχετεύσει την παραγόμενη ισχύ και πάλι σε αυτές. Ο ελεγκτής φόρτισης δεν

αποσυνδέει τον υδροστρόβιλο από τις μπαταρίες, καθώς αυτό μπορεί να προκαλέσει υπερβολική αύξηση της τάσης ή ανεπιθύμητη υπερτάχυνση της γεννήτριας. Στη συνέχεια, η τάση των συσσωρευτών αντιστρέφεται και λαμβάνει κατάλληλη τιμή (μέτρου και συχνότητας) με τη βοήθεια ενός αντιστροφέα πηγής τάσης. Σε κάποιες περιπτώσεις, σε μία εγκατάσταση υπάρχουν dc και ac φορτία. Αν συμβαίνει αυτό, τα dc φορτία (όπως φώτα) μπορούν να τροφοδοτηθούν κατευθείαν από τις μπαταρίες. Συσκευές που λειτουργούν με συνεχές ρεύμα υπάρχουν και είναι διαθέσιμες, αλλά συνήθως είναι ακριβές, δυσεύρετες και κάποιες φορές όχι πολύ καλής ποιότητας [2].

Ένα ακόμα στοιχείο που χρησιμοποιείται σε αυτά τα συστήματα αλλά δε φαίνεται στο σχήμα 5.2, είναι ο dc διακόπτης που τοποθετείται ανάμεσα στις μπαταρίες και τον αντιστροφέα και επιτρέπει την αποσύνδεση του αντιστροφέα από τις μπαταρίες για πιθανή επισκευή, ενώ παράλληλα προστατεύει την καλωδίωση μεταξύ αντιστροφέα και μπαταριών έναντι ηλεκτρικών σφαλμάτων [22].

Η τάση στην είσοδο της συστοιχίας μπαταριών κυμαίνεται συνήθως από 12V έως 48V. Αν η απόσταση μεταφοράς της ηλεκτρικής ισχύος δεν είναι μεγάλη, μία τάση εισόδου ίση με 12V αρκεί, αλλά αν η απόσταση είναι μεγαλύτερη και το επίπεδο ισχύος υψηλότερο, προτιμάται συστοιχία μπαταριών με τάση εισόδου 24V.

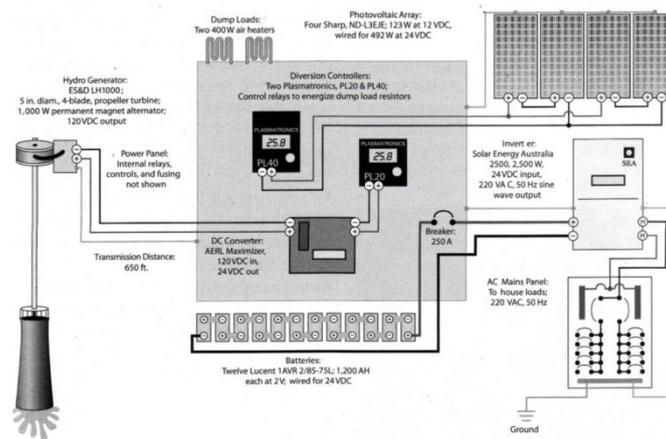
Η σύνδεση της υδρογεννήτριας απευθείας σε συσσωρευτές έχει ως αποτέλεσμα η τάση στην έξοδό της να παραμένει σταθερή και ίση περίπου με την τάση των συσσωρευτών και να λειτουργεί σε σταθερές στροφές. Αν κριθεί απαραίτητη η λειτουργία του υδροστρόβιλου υπό μεταβλητές στροφές για μεγαλύτερη απόδοση του συστήματος, πρέπει να παρεμβληθεί ένας dc/dc μετατροπέας ανάμεσα στον ανορθωτή και τις μπαταρίες. Ο μετατροπέας αυτός θα διατηρεί σταθερή την τάση εξόδου του (ίση με την τάση στους ακροδέκτες των συσσωρευτών), ενώ η τάση στην είσοδό του, που είναι ίση με την τάση εξόδου της γεννήτριας, θα μεταβάλλεται και θα μπορεί να προσαρμόζεται με κατάλληλο έλεγχο από το μετατροπέα, ώστε να λειτουργεί ο υδροστρόβιλος στις στροφές που αντιστοιχούν στην μέγιστη απόδοση κάθε χρονική στιγμή.

Οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται συνήθως σε τέτοια συστήματα είναι μολύβδου-οξέος (lead-acid batteries) με μεγάλο κύκλο εκφόρτισης (deep-cycle), ώστε να έχουν τη δυνατότητα να εκφορτιστούν τουλάχιστον σε ποσοστό 50% της χωρητικότητας αποθήκευσής τους επαναλαμβανόμενα. Οι μπαταρίες εμβάπτισης μολύβδου σε οξύ κατασκευάζονται σε μεγάλους αριθμούς για πολλές χρήσεις και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας και η τεχνολογία τους είναι

πολύ οικεία στους κατασκευαστές. Υπάρχουν, όμως, κάποιοι περιορισμοί στη χρήση τους, όπως είναι το βάρος τους και η δυσκολία στη μεταφορά και η απαίτηση για συχνή συντήρηση και αναπλήρωση του νερού που χάνεται κατά τη λειτουργία. Ωστόσο, τα πλεονεκτήματά τους υπερέχουν και είναι η ανθεκτικότητα και η σχετικά μεγάλη διάρκεια ζωής τους, καθώς και η εμπορική διαθεσιμότητα της τεχνολογίας. Επίσης, υπάρχουν και οι μπαταρίες VRLA που χρησιμοποιούν την ίδια βασική ηλεκτροχημική τεχνολογία με τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος, αλλά αυτές φράσσονται με μία βαλβίδα ρύθμισης της πίεσης, ώστε ουσιαστικά είναι φραγμένες και δεν απαιτούν την προσθήκη νερού στις κυψέλες. Αυτή η κατηγορία μπαταριών έχει λίγο μικρότερο χρόνο ζωής και είναι πιο ακριβή και λιγότερο ανθεκτική, αλλά χρειάζεται λιγότερη συντήρηση και οι κυψέλες των μπαταριών μπορούν να συσσωματώνονται πιο στενά λόγω της ερμητικά κλειστής κατασκευής και του ακινητοποιημένου ηλεκτρολύτη [2].

Σημαντική είναι η επιλογή σωστού μεγέθους της συστοιχίας των μπαταριών, ώστε να εξασφαλίζει την ύπαρξη του απαιτούμενου χρόνου αυτονομίας, ανάλογα και με τις άλλες πηγές που μπορεί να χρησιμοποιούνται ή τη ύπαρξη εφεδρικής γεννήτριας για τη φόρτισή τους. Επίσης, καλό είναι να λαμβάνεται υπόψη και η πιθανότητα αύξησης των αναγκών τροφοδότησης στο κοντινό μέλλον, καθώς είναι καλύτερο και αποδοτικότερο να αγοράζονται όλες οι μπαταρίες της συστοιχίας μαζί. Βέβαια, όταν συμβαίνει αυτό και δημιουργείται μία μεγάλη αποθηκευτική διάταξη, πρέπει να υπάρχει και η αντίστοιχη δυνατότητα πλήρους φόρτισής της από τις μονάδες παραγωγής. Τέλος, ένα σημείο στο οποίο πρέπει να δοθεί προσοχή κατά τη λειτουργία του συστήματος για τη διατήρηση του μεγάλου χρόνου ζωής και της σωστής λειτουργίας των μπαταριών είναι η σωστή φόρτισή τους. Ιδανικά πρέπει να φορτίζονται πλήρως (100%) μία φορά τη βδομάδα ή και πιο συχνά. Είναι σημαντικό να μη φορτίζονται μερικώς πολλές φορές και να μένουν σε αυτήν την κατάσταση, γιατί έτσι φθείρονται.

Ένα παράδειγμα πρακτικής εφαρμογής της dc σύνδεσης περιγράφεται στο [2] και το σύστημα παραγωγής φαίνεται στο σχήμα 5.3.



Σχήμα 5.3: DC υβριδικό αυτόνομο σύστημα με υδροηλεκτρικό και φωτοβολταϊκά [2]

Στην περίπτωση αυτή, έχει δημιουργηθεί ένα αυτόνομο dc σύστημα με πηγές τροφοδοσίας φωτοβολταϊκά πάνελ και ένα micro-υδροηλεκτρικό με υδροστρόβιλο τύπου προπέλας άμεσα συζευγμένο με μία σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών για να τροφοδοτήσει μία κατοικία στην Αυστραλία, η οποία απέχει 9,3 μίλια από το κοντινότερο σημείο σύνδεσης στο κεντρικό δίκτυο. Ο πίνακας ισχύος (power panel) απαρτίζεται από διακόπτες και ασφάλειες που δεν φαίνονται στο σχήμα, από έναν DC/DC μετατροπέα που υποβιβάζει την ανορθωμένη τάση εξόδου της υδρογεννήτριας από 120V σε 24V και δύο ελεγκτές φόρτισης, οι οποίοι ρυθμίζουν την κατεύθυνση της παραγόμενης ισχύος είτε προς τις μπαταρίες είτε προς τα απορριπτικά φορτία. Κάθε πηγή παραγωγής καταλήγει στον δικό της ελεγκτή. Η έξοδος από τη συστοιχία των μπαταριών με τάση 24Vdc αντιστρέφεται και καταλήγει στον κεντρικό πίνακα της εγκατάστασης.

5.4. AC σύνδεση

Μία άλλη επιλογή, και ιδίως για συστήματα στο μέγεθος παραδείγματος χάριν ενός οικισμού, είναι η ac σύνδεση, που χρησιμοποιείται και από τα δίκτυα ηλεκτροδότησης. Στην περίπτωση της ac σύνδεσης το υδροηλεκτρικό μπορεί να τροφοδοτεί το κύριο δίκτυο, να είναι δηλαδή διασυνδεδεμένο, ή να τροφοδοτεί ένα αυτόνομο δίκτυο είτε ως μοναδική πηγή, είτε στα πλαίσια ενός μικροδικτύου. Συνηθέστερη είναι η περίπτωση σχηματισμού ενός αυτόνομου δικτύου, καθώς τα τροφοδοτούμενα φορτία βρίσκονται κατά κύριο λόγο σε απομονωμένες περιοχές. Το βασικό πλεονέκτημα της ac σύνδεσης είναι ότι στον ίδιο ζυγό μπορούν να συνδεθούν πολλές διαφορετικές πηγές, οι οποίες μπορεί να βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές · γεγονός που καθιστά την ac σύνδεση κατάλληλη για ένα μεγάλο μικροδίκτυο. Επιπλέον, τα υψηλά επίπεδα τάσης οδηγούν σε χαμηλότερες απώλειες. Στην περίπτωση της ac σύνδεσης μπορούν να

χρησιμοποιηθούν σύγχρονη γεννήτρια με τύλιγμα διέγερσης ή μονίμων μαγνητών, γεννήτρια επαγωγής και γεννήτρια επαγωγής με διπλή τροφοδότηση. Η γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης χρησιμοποιείται πιο σπάνια στα πλαίσια ενός micro-υδροηλεκτρικού συστήματος και κυρίως σε συνδυασμό με κάποια άλλη πηγή.

5.4.1. Διασυνδεδεμένο σύστημα

Όταν ένα micro-υδροηλεκτρικό σύστημα συνδέεται στο υπάρχον κύριο δίκτυο ηλεκτροδότησης συνδέεται στη χαμηλή τάση, καθώς η ονομαστική ισχύς τους είναι μικρότερη ή ίση των 100kW. Το υδροηλεκτρικό μπορεί να συνδεθεί είτε μόνο του στο δίκτυο είτε στα πλαίσια ενός διασυνδεδεμένου μικροδικτύου. Τότε, ρυθμίζεται με βάση το κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησης και πρέπει να εξασφαλίζεται η συγχρονισμένη με αυτό λειτουργία διατηρώντας την ανταλλαγή ισχύος στα συμφωνημένα. Το υδροηλεκτρικό (ή το μικροδίκτυο στο οποίο συνδέεται) θα πρέπει να λειτουργεί ικανοποιητικά ως προς τις απαιτήσεις που θέτει το κεντρικό δίκτυο και να αποσυνδέεται από αυτό σε περίπτωση που παρουσιαστεί κάποιο παρατεταμένο σφάλμα. Επίσης, πρέπει να αποσυνδέεται από το κεντρικό δίκτυο όταν συμβεί σε αυτό κάποια βλάβη και σταματήσει η λειτουργία του, ώστε να πραγματοποιηθούν με ασφάλεια οι εργασίες επισκευής του. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σύγχρονη γεννήτρια με τύλιγμα διέγερσης ή μονίμων μαγνητών, καθώς και γεννήτρια επαγωγής, αρκεί να λαμβάνονται μέτρα για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος της. Η σύνδεση μίας σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών στο δίκτυο γίνεται μέσω AC/DC/AC μετατροπέα.

Η μελέτη γίνεται για λειτουργία υδροστροβίλου υπό μεταβλητές στροφές με στόχο την επίτευξη βέλτιστης απόδοσης. Ο μετατροπέας που βρίσκεται από την πλευρά της γεννήτριας είναι υπεύθυνος για τη λειτουργία του συστήματος στο σημείο βέλτιστης απόδοσης, με συντελεστή ισχύος όσο γίνεται κοντά στη μονάδα και για την ελαχιστοποίηση των αρμονικών παραμορφώσεων της τάσης. Η ρύθμιση του σημείου λειτουργίας γίνεται με τον έλεγχο της ταχύτητας και της ροπής, η οποία ελέγχεται μέσω του ρεύματος. Ο μετατροπέας που βρίσκεται από την πλευρά του δικτύου είναι υπεύθυνος για τη μεταφορά της ισχύος στο δίκτυο, ελέγχοντας την τάση στο dc σημείο σύνδεσης, και για την καλή ποιότητα των ρευμάτων που εγχέονται στο δίκτυο. Υπάρχει δυνατότητα έγχυσης αέργου ισχύος στο δίκτυο, αν αυτό απαιτείται.

5.5. Επιλογή καταλληλότερης σύνδεσης για ένα υδροηλεκτρικό σύστημα

Η επιλογή καταλληλότερης σύνδεσης για ένα υδροηλεκτρικό σύστημα έγινε με βάση την ανάλυση στο [2]. Τα micro (<100kW) και pico (<10kW) υδροηλεκτρικά συστήματα εγκαθίστανται συνήθως σε μικρούς οικισμούς και δυσπρόσιτες περιοχές, απομακρυσμένες από το κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησης. Για το λόγο αυτό, συνήθως προτιμάται η ανάπτυξη αυτόνομων συστημάτων έναντι της δυσκολότερης και δαπανηρής λύσης της σύνδεσης με το κεντρικό δίκτυο, η οποία επίσης δεν συμπεριλαμβάνεται στη σύγκριση που γίνεται στο παρόν κεφάλαιο. Ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες, τη δυνατότητα παραγωγής ενέργειας με υδροηλεκτρικό σύστημα και τις απαιτήσεις σε τροφοδοσία των καταναλωτών, αλλά και με πολύ βασικό κριτήριο αυτό του οικονομικού κόστους γίνεται η επιλογή του τρόπου σύνδεσης.

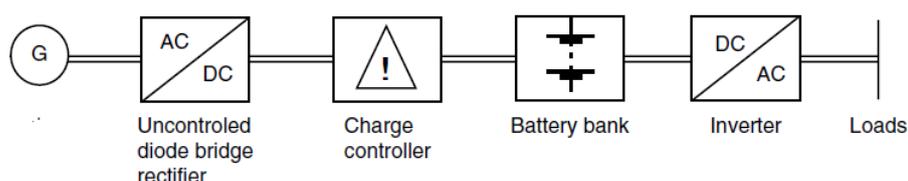
DC σύνδεση – Αυτόνομο σύστημα βασισμένο σε μπαταρίες

Χρησιμοποιείται κυρίως όταν η παραγόμενη κάθε στιγμή ισχύς δεν αρκεί για να καλύψει την αντίστοιχη ζήτηση και για μικρά δίκτυα, κάθε στιγμή παράγεται ισχύς που αντιστοιχεί στη μέση ζήτηση και η ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται σε μπαταρίες.

Οι μπαταρίες μπορούν εν συνεχεία μέσω ενός μεγαλύτερου αντιστροφέα να τροφοδοτήσουν φορτία ισχύος μεγαλύτερης της παραγόμενης, δίνοντας κατά αυτόν τον τρόπο τη δυνατότητα για σχεδιασμό ενός υδροηλεκτρικού συστήματος με μικρότερη απαιτούμενη παροχή νερού, μικρότερη εγκατάσταση και ηλεκτρολογικό εξοπλισμό. Για το λόγο αυτό, ένα τέτοιο σύστημα είναι και πιο φθηνό, καθώς και πιο απλό στην εγκατάσταση και τη λειτουργία του. Επιπλέον, οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται (συνήθως μολύβδου-οξέως μεγάλου κύκλου εκφόρτισης ή νικελίου-καδμίου) έχουν 1 με 2 μέρες αυτονομία(μικρότερος απαιτούμενος χρόνος αυτονομίας σε σχέση με άλλες ανανεώσιμες μορφές ενέργειας), οπότε είναι δυνατή η διακοπή της λειτουργίας του στροβίλου για συντήρηση χωρίς διακοπή της τροφοδοσίας των φορτίων.

Στην περίπτωση της dc σύνδεσης και όσον αφορά το ηλεκτρολογικό κομμάτι έχουμε να επιλέξουμε το επίπεδο dc τάσης 12, 24 ή 48 V καθώς και τη γεννήτρια που θα χρησιμοποιήσουμε (αν θα είναι γεννήτρια συνεχούς ρεύματος-οπότε δε χρειαζόμαστε ανορθωτή-, σύγχρονη γεννήτρια, σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών ή γεννήτρια επαγωγής). Επιπλέον, θα χρειαστούμε έναν ανορθωτή, έναν ελεγκτή φόρτισης μπαταριών, έναν αντιστροφέα, απορριπτικά φορτία καθώς και μία προστασία από κάποια υπερτάχυνση του υδροστροβίλου. Σε περίπτωση λειτουργίας του υδροστροβίλου με μεταβλητές στροφές, θα πρέπει αντί του ανορθωτή να χρησιμοποιηθεί ένας AC/DC μετατροπέας, ο οποίος θα κάνει τον έλεγχο συχνότητας.

Λαμβάνοντας υπόψη το μικρό μέγεθος αυτών των συστημάτων, η χρήση σύγχρονης γεννήτριας ηλεκτρικής διέγερσης κρίνεται ασυμφορή και επομένως οι πιο πιθανές συνδεσμολογίες είναι οι παρακάτω:



Σχήμα 5.4: Τυπικές διατάξεις σύνδεσης ενός υδροηλεκτρικού συστήματος σε ένα dc αυτόνομο σύστημα, όταν χρησιμοποιεί σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών

Στην περίπτωση της γεννήτριας επαγωγής, για εκκίνησή της μετά από κάποια διακοπή της λειτουργίας του υδρ ηλεκτρικού, οι πυκνωτές μπορούν να φορτιστούν μέσω των μπαταριών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο : ΤΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΣΚΟΝΗΣ ΣΙΔΗΡΟΥ

Οι πυρήνες του στάτη στις μηχανές αξονικής ροής μονίμων μαγνητών κατασκευάζονται με ελάσματα σιδήρου ή με πούδρα σιδήρου. Τα μαλακά μαγνητικά μείγματα με πούδρα σιδήρου απλοποιούν τη διαδικασία κατασκευής και μειώνουν το κόστος των συγκεκριμένων μηχανών.

6.1. Μαλακά μαγνητικά συνθετικά σκόνης σιδήρου

Η μεταλλουργία σκόνης σιδήρου(iron powder) χρησιμοποιείται για την παραγωγή σιδηρομαγνητικών πυρήνων για μικρές ηλεκτρικές μηχανές ή για πυρήνες με περίπλοκα σχήματα. Τα στοιχεία των μαλακών μαγνητικών συνθετικών είναι σκόνη σιδήρου, διηλεκτρικό όπως υποξική ρητίνη και συμπληρωματικό(ίνες γυαλιού ή άνθρακα) για μηχανική ενίσχυση. Τα συνθετικά με πούδρα σκόνης για σιδηρομαγνητικούς πυρήνες ηλεκτρικών μηχανών και άλλων συσκευών συνήθως είναι διηλεκτρομαγνητικά ή μαγνητοδιελεκτρικά [20].

Τα διηλεκτρομαγνητικά και τα μαγνητοδιελεκτρικά είναι ένας όρος που αναφέρεται σε υλικά που αποτελούνται από τα ίδια βασικά στοιχεία: ένα σιδηρομαγνητικό υλικό(συνήθως σκόνη σιδήρου) και ένα διηλεκτρικό(συνήθως υποξική ρητίνη). Ο βασικός σκοπός του διηλεκτρικού υλικού είναι η μόνωση και η ένωση των σιδηρομαγνητικών σωματιδίων. Στην πράξη, τα συνθετικά που περιέχουν έως και 2%(της μάζας τους) διηλεκτρικά υλικά αναφέρονται ως διηλεκτρομαγνητικά. Αυτά με μεγαλύτερο περιεχόμενο σε διηλεκτρικό αναφέρονται ως μαγνητοδιελεκτρικά.

Πλέον, παράγονται μαλακά μαγνητικά συνθετικά, τα οποία είναι επιφανειακά μονωμένη μεταλλική σκόνη με εξαιρετική δυνατότητα συμπίεσης [20].

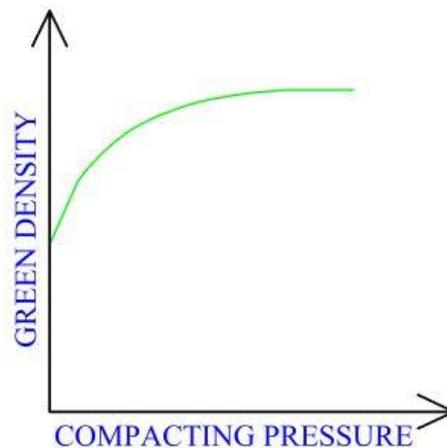
6.1.2. Η διαδικασία κατασκευής πυρήνων στάτη με μείγμα σκόνης σιδήρου

Είναι πολύ πιο δύσκολο να κατασκευαστούν πυρήνες με ελάσματα για τις μηχανές αξονικής ροής σε σχέση με τις μηχανές ακτινικής ροής. Τα μαλακά μαγνητικά συνθετικά με πούδρα σιδήρου απλοποιούν τη διαδικασία κατασκευής του πυρήνα στάτη, διότι δίνουν τη δυνατότητα για περίπλοκα σχήματα με σχεδίαση σε 3 διαστάσεις. Επίσης, το κόστος για μαζική παραγωγή μηχανών αξονικής ροής είναι πολύ μικρότερο με συνθετικά σκόνης σιδήρου.

Στη μαζική παραγωγή οι πυρήνες κατασκευάζονται μέσω μιας μεταλλουργικής διαδικασίας με μια μικρή ποσότητα λιπαντικού ή κάποιου συνδετικού υλικού(διηλεκτρικού). Η μεταλλουργική διαδικασία σε γενικές γραμμές αποτελείται από 4 βασικά βήματα:

- 1) Την παραγωγή της σκόνης
- 2) Την ανάμειξη της με τα άλλα υλικά
- 3) Τη συμπίεση
- 4) Τη θερμοσυσσωμάτωση.

Η συμπίεση γίνεται κυρίως με μηχανικές ή υδραυλικές πρέσσες και σκληρά εργαλεία. Οι πιέσεις που υπόκεινται αυτά τα συνθετικά έχουν εύρος από 70 έως 800 MPa με 150 έως 500 MPa να είναι οι συνηθέστερες. Η εξωτερική διάμετρος του πυρήνα είναι οριοθετημένη από την δύναμη της πρέσσας. Συχνά, ο πυρήνας του στάτη χωρίζεται σε μικρότερα κομμάτια. Τα περισσότερα προϊόντα που εξάγονται από τη μεταλλουργική διαδικασία της πούδρας σιδήρου πρέπει να έχουν διατομή μικρότερη από 2000mm². Ανάλογα με τη χωρητικότητα της πρέσσας, μπορούν να συμπιεστούν και κομμάτια διατομής 6500 mm². Το παρακάτω σχήμα 6.1 παρουσιάζει την επίδραση της συμπίεσης στην πυκνότητα δύο διαφορετικών μαλακών μαγνητικών συνθετικών πούδρας.



Σχήμα 6.1: Η επίδραση της συμπίεσης στην πυκνότητα των μαλακών μαγνητικών συνθετικών πούδρας σιδήρου.

Η θερμοκρασία για την συσσωμάτωση αυτών των υλικών είναι περίπου 500°C για 30 λεπτά, αλλά η θερμοκρασία και ο χρόνος διαφέρει από υλικό σε υλικό. Μετά τη διαδικασία αυτή, η μηχανική αντοχή του υλικού είναι αρκετά μικρότερη από την αντίστοιχη των ατσάλινων ελασμάτων.

Τα πηνία του στάτη υπόκεινται σε θερμική διαστολή. Η μαγνήτιση εξαρτάται και από τη διαφορά στη θερμοκρασία του τυλίγματος και του πυρήνα. Αυτό το πρόβλημα γίνεται σοβαρότερο στους πυρήνες πούδρας σιδήρου σε σχέση με τους πυρήνες με ελάσματα από τη στιγμή που η μηχανική αντοχή είναι αρκετά μικρότερη.

6.2. Ιστορικό εφαρμογών με σκόνη σιδήρου

Στα μέσα της δεκαετίας του '90, η μεταλλουργία της σκόνης σιδήρου ήταν μια τεχνολογία που είχε εδραιωθεί και χρησιμοποιούνταν ευρέως για την παραγωγή μαλακών μαγνητικών

συνθετικών σε εφαρμογές συνεχούς ρεύματος [24]. Η ποικιλία συνδυασμών συνθετικών με σκόνη, παραμέτρων συμπίεσης και μεθόδων τήξης παρήγαγε προϊόντα με μεγάλο εύρος διαφορετικών μαγνητικών ιδιοτήτων. Ο παρακάτω πίνακας 6.1 συνοψίζει το εύρος των μαγνητικών ιδιοτήτων αυτών των προϊόντων. Τα στοιχεία που παρουσιάζονται δείχνουν ότι οι υψηλές τιμές πυκνότητας του υλικού αυξάνουν την τιμή της επαγωγής κορεσμού. Επίσης, η βάση της σκόνης καθώς και η διαδικασία παραγωγής της επηρεάζουν τις κατασκευαστικές ιδιότητες (διαπερατότητα, συνεχούσα δύναμη και παραμένων μαγνητισμός) [25]. Αυτή η δυνατότητα της προσαρμογής των μαγνητικών ιδιοτήτων μαζί με τη δυνατότητα για την προσαρμογή του σχήματος, προσφέρουν ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα.

	Πυκνότητα (g/cm ³)	Μέγιστη διαπερατότητα	Συνεχούσα δύναμη(Oe)	Μέγιστη Επαγωγή(G)	Ειδική αντίσταση (microhm/cm)
Fe	6,8-7,2	1800-3500	1,5-2,5	10-13	10
Fe/P	6,8-7,4	2500-6000	1,2-2,0	10-14	30
Fe/Si	6,8-7,3	2000-6000	0,8-1,2	9-13	60
400 Series SS	6,7-7,2	1400-2100	1,5-2,0	9-11	50
50 Ni/50 Fe	7,2-7,6	5000-15000	0,2-0,5	9-14	45

Πίνακας 6.1: Εύρος μαγνητικών ιδιοτήτων συνθετικών με σκόνη σιδήρου [23].

Το ζήτημα όμως ήταν ότι η συντριπτική πλειονότητα των ηλεκτρικών συσκευών χρησιμοποιούσε και συνεχίζει να χρησιμοποιεί εναλλασσόμενο ρεύμα. Έτσι, οι αγορές στις οποίες απευθυνόταν ήταν αρκετά λίγες. Ο λόγος για τον οποίο η τεχνολογία μεταλλουργίας της σκόνης σιδήρου δεν εφαρμοζόταν και δεν συνεισέφερε στην παραγωγή ηλεκτρικών συσκευών εναλλασσόμενου ρεύματος ήταν οι μεγάλες απώλειες σε δινορεύματα που ανέπτυσαν αυτά τα υλικά όταν εκτίθονταν σε εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο [23]. Τα δινορεύματα οδηγούσαν σε μεγάλη παραγωγή θερμότητας στο υλικό. Οι απώλειες δινορευμάτων δίνονται από τον παρακάτω τύπο:

$$Eddy\ Current\ Loss = K_e \cdot d^2 \cdot B^2 \cdot \frac{f^2}{p} \quad (6.1)$$

όπου,

- K_e μια σταθερά
- d το πάχος του υλικού
- B η μαγνητική επαγωγή
- f η συχνότητα λειτουργίας
- p η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του υλικού

Έτσι, όσο το πάχος του υλικού αυξάνεται οι απώλειες δινορευμάτων αυξάνονται σε αναλογία με το τετράγωνο του πάχους των ελασμάτων ή του συνθετικού. Γι' αυτό το λόγο στις μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος χρησιμοποιούνταν ελάσματα. Με τη χρήση των ελασμάτων ελαχιστοποιούνται οι απώλειες δινορευμάτων διότι περιορίζονται στην επιφάνεια των λεπτών ελασμάτων. Ένα τυπικό πάχος ελάσματος είναι μεταξύ 0.18 και 0.50 χιλιοστά.

Γίναν προσπάθειες για κατασκευή ελασμάτων με σκόνη σιδήρου αλλά ήταν ανεπιτυχείς. Η διαδικασία συμπίεσης έχει ως κατώτατο όριο πάχους 2.4 χιλιοστά κάτι που υπερβαίνει κατά πολύ το επιθυμητό πάχος. Έτσι, οι απώλειες δινορευμάτων καταλήγαν να είναι αρκετά

μεγαλύτερες στην περίπτωση αυτή με αποτέλεσμα να μην μπορεί να εφαρμοστεί η τεχνολογία της μεταλλουργίας της σκόνης σιδήρου για συσκευές εναλασσομένου ρεύματος.

Η αρχή της χρήσης σκόνης σιδήρου σε εφαρμογές εναλασσομένου ρεύματος έγινε στην παραγωγή πυρήνων μετασχηματιστών, σε τροφοδοτικά εναλλαγής λειτουργίας και σε πηνία φόρτισης. Η διαδικασία ήταν η εξής: αρχικά, επικάλυψη της επιφάνειας σκόνης σιδήρου μεγάλης καθαρότητας και δυνατότητας συμπίεσης με φωσφορικό οξύ [23]. Μετά απ' αυτήν την αρχική μόνωση, η σκόνη αναμιγνύεται με ένα λιπαντικό συμπίεσης και με θερμοσκληρυντική ρητίνη. Αυτή η διαδικασία κατάφερε να ελαχιστοποιήσει τα δινορεύματα σε εφαρμογές εναλασσομένου ρεύματος υψηλών συχνοτήτων. Οι αδυναμίες ήταν ότι το τελικό στοιχείο ήταν αρκετά μαλακό και η επεξεργασία της σκόνης σιδήρου σε χαμηλές θερμοκρασίες μείωνε την μαγνητική της απόδοση.

6.2.1. Σκόνη σιδήρου με μονωτικό

Μια διαφορετική τεχνική που εξέλιξε αυτή τη διαδικασία ήταν η μόνωση της σκόνης σιδήρου με μια λεπτή στρώση από θερμοπλαστικό υψηλής απόδοσης. Αυτή η τεχνική σε συνδυασμό με τεχνικές συμπίεσης της σκόνης σε υψηλές θερμοκρασίες οδήγησε στην παραγωγή συνθετικών με μεγαλύτερη πυκνότητα σε σχέση με τις προηγούμενες προσπάθειες. Η μεγαλύτερη πυκνότητα οδήγησε σε υψηλότερη απόδοση. Επίσης, η χρήση του θερμοπλαστικού βοήθησε στη βελτίωση της μηχανικής αντοχής του παραγόμενου στοιχείου. Κάτι ακόμα που κατόρθωσε αυτή η τεχνική ήταν να διατηρήσει μια σταθερή τιμή στη διαπερατότητα για διαφορετικές συχνότητες. Αυτό βοήθησε στο να μειωθούν περαιτέρω οι απώλειες δινορευμάτων, ιδιαίτερα σε πολύ υψηλές συχνότητες. Στον παρακάτω πίνακα 6.2 φαίνεται συγκριτικά η πυκνότητα του υλικού που παράχθηκε και με την παραπάνω τεχνική σε σχέση με τα προηγούμενα.

Σκόνη σιδήρου παραγόμενη με τη συμβατική μεταλλουργική διαδικασία						
Πυκνότητα(g/cm³)	6,92	6,94	6,97	6,97	7,1	7,05
Συμπίεση(psi)	2250	2310	2750	3100	3250	4150
Θερμοκρασία(°F)	Θερμοκρασία δωματίου	75	125	175	225	225
Σκόνη σιδήρου με στρώση θερμοπλαστικού						
Πυκνότητα(g/cm³)	7,04	7,08	7,07	7,15	7,18	7,25
Συμπίεση(psi)	3448	3224	4343	4732	10670	16660
Θερμοκρασία(°F)	Θερμοκρασία δωματίου	150	250	350	450	550

Πίνακας 6.2: Σύγκριση της πυκνότητας του νέου συνθετικού με στρώση θερμοπλαστικού με τα προηγούμενα [23].

Με τη συγκεκριμένη τεχνική, λόγω των υψηλότερης πυκνότητας και της λεπτής μονωτικής στρώσης η συνεχούσα δύναμη του υλικού αυξήθηκε περίπου στα 5 Οε. Έτσι, μειώθηκαν οι απώλειες δινορευμάτων αλλά αυξήθηκαν οι απώλειες υστέρησης. Οι απώλειες υστέρησης ορίζονται ως η ενέργεια που απορροφάται από το υλικό όσο το εναλασσομένο πεδίο ακολουθεί την καμπύλη υστέρησης [26]. Ο τύπος που δίνει τις απώλειες υστέρησης είναι ο παρακάτω:

$$Hysteresis Loss = K_H \cdot Loop Area \cdot f \quad (6.2)$$

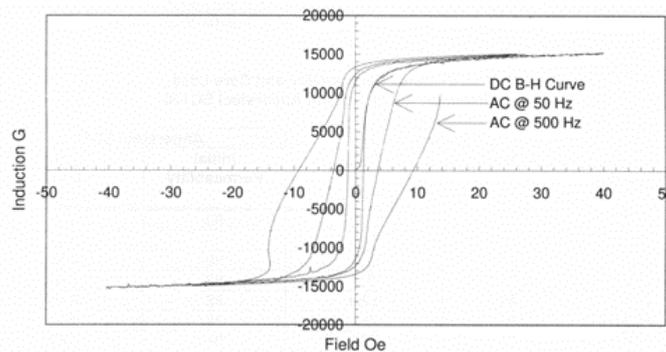
όπου,

- K_H : μια σταθερά
- f : η συχνότητα λειτουργίας
- Loop Area : η επιφάνεια του βρόχου υστέρησης για λειτουργία συνεχούς ρεύματος

Οι απώλειες υστέρησης επηρεάζονται από τη συνεχούσα δύναμη του υλικού. Υψηλότερες τιμές της συνεχούσας δύναμης καταλήγουν σε μεγαλύτερες απώλειες υστέρησης και χαμηλότερες οδηγούν σε λιγότερες απώλειες [26]. Οι συνολικές απώλειες πυρήνα μιας μαγνητικής συσκευής είναι το σύνολο των απωλειών δινορευμάτων και των απωλειών υστέρησης. Στη συμβατική εφαρμογή με ελάσματα από χάλυβα, οι απώλειες δινορευμάτων αυξάνονται δραματικά όσο αυξάνεται η συχνότητα. Επιπλέον, τα δινορεύματα επηρεάζουν την διαπερατότητα ενός υλικού το οποίο εκτίθεται σε εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Στην ουσία, πρόκειται για κυκλικά ρεύματα τα οποία δημιουργούν ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο είναι σε αντίθετη κατεύθυνση με το αρχικό. Όσο μεγαλύτερα τα δινορεύματα, τόσο μεγαλύτερο το αντίρροπο πεδίο. Το αποτέλεσμα είναι μικρότερο καθαρό μαγνητικό πεδίο, κυρίως στον πυρήνα του υλικού. Αυτό με τη σειρά του οδηγεί σε μια μικρότερη τιμή μαγνητικής επαγωγής. Η διαπερατότητα ενός μαγνητικού υλικού εκφράζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (6.3)$$

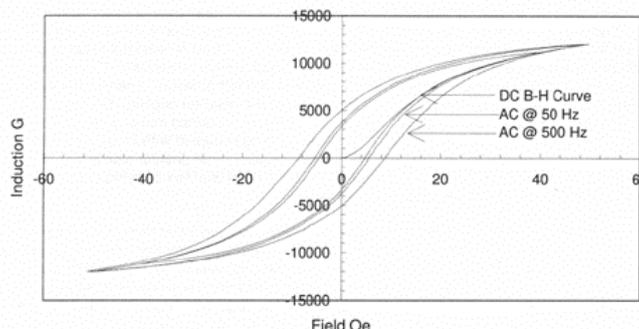
Στο σχήμα 6.2 φαίνονται οι βρόχοι υστέρησης για πυρήνα με ελάσματα χάλυβα σε λειτουργία συνεχούς ρεύματος, σε λειτουργία εναλλασσόμενου στα 50 Hz και στα 500 Hz. Είναι ξεκάθαρο ότι όσο αυξάνεται η συχνότητα τόσο «ανοίγει» η καμπύλη με αποτέλεσμα η επιφάνεια να αυξάνεται, άρα και οι απώλειες υστέρησης. Αυτό το «άνοιγμα» της καμπύλης οφείλεται στην ανάπτυξη δινορευμάτων, το οποίο οδηγεί σε μια μείωση της μαγνητικής απόδοσης στις ψηλές συχνότητες.



Σχήμα 6.2: Βρόχος υστέρησης για ελάσματα από χάλυβα

Το σχήμα 6.3 δείχνει τις αντίστοιχες καμπύλες μαγνήτισης για το Ancorsteel SC120, ένα συνθετικό βασισμένο σε σκόνη σιδήρου, που παράχθηκε με την παραπάνω τεχνική. Αυτό που διαπιστώνεται είναι ότι οι μαγνητικές ιδιότητες είναι υποδεέστερες σε σχέση με τα ελάσματα. Η μαγνητική διαπερατότητα είναι περίπου 4 φορές μεγαλύτερη στην περίπτωση των ελασμάτων ενώ οι απώλειες είναι μεγαλύτερες. Αυτό που παρατηρούμε, όμως, είναι ότι όσο αυξάνεται η συχνότητα, η επιφάνεια του βρόχου δεν μεγαλώνει τόσο όσο στην προηγούμενη περίπτωση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, το συγκεκριμένο υλικό σε συχνότητες μεγαλύτερες των 1000 Hz να

έχει μικρότερη επιφάνεια απ' ότι η περίπτωση με τα ελάσματα χάλυβα. Αυτό σημαίνει ότι το συγκεκριμένο υλικό αποτελεί καλύτερη λύση για εφαρμογή στις συγκεκριμένες συχνότητες. Έτσι, στα μέσα της δεκαετίας του '90 ήταν οι πρώτες φορές που συνθετικά με σκόνη σιδήρου αποτέλεσαν προτιμότερη λύση σε εφαρμογές εναλλασσόμενου ρεύματος.



Σχήμα 6.3: Βρόχος υστέρησης για το συνθετικό Ancorsteel SC120

Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τη διαπερατότητα και τις απώλειες πυρήνα του συνθετικού Ancorsteel SC120 που παράχθηκε με την παραπάνω τεχνική και ενός πυρήνα με ελάσματα χάλυβα για τιμή επαγωγής 10 Gauss.

Συχνότητα	Ελάσματα χάλυβα		Ancorsteel SC120	
	Αρχική διαπερατότητα	Απώλειες πυρήνα ($\mu\text{W}/\text{cm}^3$)	Αρχική διαπερατότητα	Απώλειες πυρήνα ($\mu\text{W}/\text{cm}^3$)
100	220	0,08	89	4,18
200	221	0,21	89	4,31
500	220	0,91	89	4,88
1000	211	3,2	88	6,47
2000	182	12,4	88	6,47
5000	112	96	79	48,1
10000	70	379	65	181

Πίνακας 6.3: Συγκριση διαπερατότητας και απωλειών σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων

Αυτό που πέτυχε η συγκεκριμένη μονωμένη σκόνη σιδήρου είναι ότι έδωσε τη δυνατότητα λειτουργίας μιας μηχανής σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων με σταθερή διαπερατότητα και χωρίς να αυξάνονται οι απώλειες του πυρήνα σε ψηλά επίπεδα. Ακόμα, προσφέρει τη δυνατότητα στον σχεδιαστή να εκμεταλλευτεί και τις τρεις διαστάσεις, καθώς σε αυτό το υλικό η ροή δεν έχει κάποιον περιορισμό ως προς την κατεύθυνσή της, κάτι που στους συμβατικούς πυρήνες με ελάσματα δεν μπορεί να συμβεί διότι η ροή περιορίζεται στην επιφάνεια του κάθε ελάσματος. Παρά αυτήν την εξέλιξη, η μεταλλουργία της σκόνης είχε αρκετά βήματα να προχωρήσει ακόμα για να εξαπλωθεί περισσότερο στις αγορές [23].

Τα υλικά που έχουν προέλθει από θερμοσυσσώματωση μετά τη μεταλλουργική επεξεργασία είναι κατάλληλα για εφαρμογές συνεχούς ρεύματος. Παρ' όλα αυτά, η χρησιμότητά τους σε εφαρμογές εναλλασσόμενου ρεύματος είναι πολύ περιορισμένη. Μία συνέπεια του εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου είναι η θερμότητα που εκλύεται από το μαγνητικό υλικό. Αυτή η θερμότητα μπορεί να ισοδυναμεί με το σύνολο των απωλειών υστέρησης και των απωλειών πυρήνα.

6.2.2. Συνθετικά σκόνης σιδήρου με πολυμερή και με κράμα σιλικόνης

Προς το τέλος της δεκαετίας του '90, τα μαγνητικά υλικά με βάση σκόνης σιδήρου χρησιμοποιούνταν όλο και περισσότερο σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, από συστήματα αντιμπλοκαρίσματος τροχών μέχρι και σε πηνία ανάφλεξης υψηλής συχνότητας. Η επιλογή του υλικού καθοριζόταν από τις απαιτήσεις των εφαρμογών καθώς και από τον διαθέσιμο εξοπλισμό συμπίεσης και θερμοσυσσωμάτωσης.

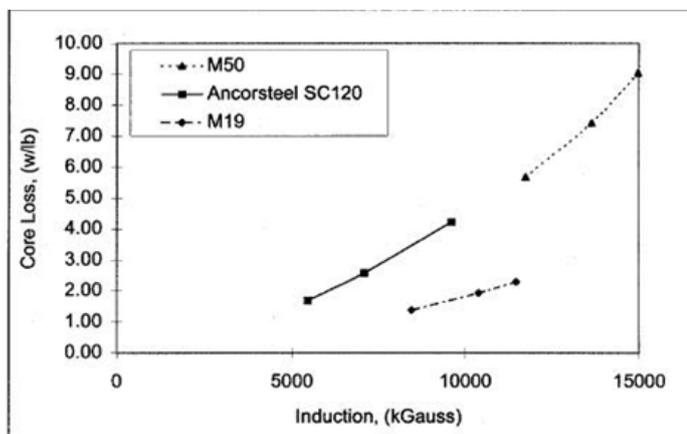
Ένα από τα μείγματα που χρησιμοποιήθηκαν αρκετά εκείνη την περίοδο ήταν σκόνη σιδήρου μαζί με κράμα σιλικόνης. Αυτό το κράμα, όμως, απαιτεί υψηλή θερμοκρασία για να ομογενοποιηθεί η σιλικόνη με τη σκόνη σιδήρου. Με την κατάλληλη επεξεργασία, αυτό το μείγμα αποκτά υψηλή τιμή μαγνητικής διαπερατότητας, χαμηλή συνεχούσα δύναμη και μεγάλη ειδική αντίσταση. Η υψηλή τιμή διαπερατότητας μπορεί να επιτευχθεί και με κράμα σιδήρου με φώσφορο, παρόλο που αυτό το κράμα έχει ψηλότερη συνεχούσα δύναμη και χαμηλότερη τιμή ειδικής μαγνητικής αντίστασης. Αυτά τα υλικά δεν χρησιμοποιήθηκαν σε εφαρμογές εναλλασσομένου ρεύματος χαμηλής συχνότητας λόγω των μεγάλων απωλειών πυρήνα [27].

Ένα δεύτερο μείγμα που είχε αρκετή απήχηση και σε εφαρμογές εναλλασσομένου ρεύματος ήταν σκόνη σιδήρου με πολυμερή μεγάλης μηχανικής αντοχής. Οι μαγνητικές ιδιότητες των συνθετικών σκόνης σιδήρου και πολυμερών εξαρτώνται από την ποσότητα και τον τύπο του πολυμερούς και το μέγεθος των σωματιδίων της σκόνης. Τα συγκεκριμένα συνθετικά αφού περάσουν το στάδιο της συμπίεσης παρουσιάζουν χαμηλές απώλειες δινορευμάτων. Χρησιμοποιήθηκαν σε ηλεκτρικές συσκευές εναλλασσομένου ρεύματος που απαιτούσαν ελαχιστοποίηση των δινορευμάτων. Η υψηλή τιμή της συνεχούσας δύναμης αποτέλεσε το βασικό μειονέκτημα του συγκεκριμένου μαγνητικού συνθετικού υλικού. Η υψηλή τιμή της συνεχούσας δύναμης αυξάνει τις απώλειες υστέρησης, οδηγώντας σε μειωμένη μαγνητική απόδοση σε χαμηλές συχνότητες (χαμηλότερες των 200 Hz). Συνεπώς, αυτά τα υλικά βρήκαν εφαρμογή σε συσκευές υψηλής συχνότητας λειτουργίας αλλά δεν κατάφεραν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά σε εφαρμογές μεγάλου όγκου στα 60 Hz.

Η ανάπτυξη των συνθετικών με πολυμερή αναμενόταν να εξαπλώσει τα προϊόντα σιδήρου σε εφαρμογές εναλλασσομένου ρεύματος μεγάλου όγκου. Η μεταλλουργία της σκόνης λόγω της δυνατότητας προσαρμογής του σχήματος και λόγω των υλικών υψηλής απόδοσης προσέφερε την ελπίδα ότι θα αποτελέσει μια «ιδανική» τεχνική για την παραγωγή τέτοιου είδους συσκευών. Αυτά τα συνθετικά χρησιμοποιούν πολυμερή με μεγάλη μηχανική δύναμη ώστε να μονώσουν τα σωματίδια της σκόνης και να ενισχύσουν τη μηχανική δύναμη του τελικού συμπιεσμένου προϊόντος. Για την επεξεργασία τους χρησιμοποιούνται τεχνικές συμπίεσης σε υψηλή θερμοκρασία. Η υψηλή θερμοκρασία είναι αυτή που ευθύνεται για την μεγάλη πυκνότητα και την μηχανική δύναμη του υλικού.

Υπήρξαν διαφορετικά τέτοιου είδους συνθετικά με διαφορετικά πλεονεκτήματα το καθένα. Το Ancorsteel SC 120 έχει σχετικά μικρή περιεκτικότητα σε πολυμερές και έχει την ψηλότερη πυκνότητα μετά τη συμπίεση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αποδίδει την υψηλότερη απόδοση στις εφαρμογές εναλλασσομένου ρεύματος χαμηλής συχνότητας. Το Ancorsteel TC 80 χρησιμοποιεί διανομή σε σωματίδια μικρότερου μεγέθους και οξειδώνει την σκόνη μετά την επικάλυψη των σωματιδίων με το πολυμερές. Αυτή η ενισχυμένη μόνωση μειώνει την απόδοση συνεχούς ρεύματος αλλά αποφέρει την καλύτερη απόδοση για ψηλές συχνότητες καθώς διατηρεί την τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας σταθερή μέχρι και στα 50 kHz.

Το σχήμα 6.4 παρουσιάζει τις απώλειες πυρήνα του Ancorsteel SC 120 συγκριτικά με τις αντίστοιχες των M50 και M19, τα οποία είναι ελάσματα χάλυβα. Οι απώλειες πυρήνα του Ancorsteel SC 120 είναι περίπου ίσες με αυτές των M50 ελασμάτων στα 60 Hz και λίγο μικρότερες στα 200 Hz. Σε σύγκριση με το M19 υλικό ελασμάτων, το Ancorsteel SC 120 εμφανίζει μεγαλύτερες απώλειες πυρήνα και στα 60 και στα 200 Hz. Από άλλα πειράματα υπάρχουν στοιχεία ότι τα συνθετικά σκόνης σιδήρου με πολυμερή εμφανίζουν μικρότερες απώλειες πυρήνα για λειτουργία στα 500 Hz.



Σχήμα 6.4 : Απώλειες πυρήνα του συνθετικού σκόνης σιδήρου Ancorsteel SC 120 και των ελασμάτων από χάλυβα M19 και M20.

Αυτά τα υλικά ενώ αποτέλεσαν μια καλή επιλογή για εφαρμογές με συχνότητα λειτουργίας μαγελύτερη από τα 200 Hz, δεν κατάφεραν να εξαπλωθούν ιδιαίτερα. Η συχνότητες που λειτουργούν οι περισσότερες εφαρμογές είναι σε λιγότερα Hz και αυτά τα υλικά δεν προσέφεραν κάποια πλεονεκτήματα στην απόδοση σε σχέση με τα ελάσματα από χάλυβα.

Η χαμηλή απόδοσή τους σε αυτές τις συχνότητες οφείλεται στις μεγάλες απώλειες υστέρησης αυτών των υλικών. Η συνεχούσα δύναμη αυτών των υλικών είναι περίπου 4.7 Oe. Η υψηλή τιμή της συνεχούσας δύναμης μεγαλώνει το βρόχο υστέρησης με αποτέλεσμα να μειώνει τη μαγνητική απόδοση στις χαμηλές συχνότητες. Ιδανικά, μια σκόνη σιδήρου που έχει χαμηλές απώλειες υστέρησης και χαμηλές απώλειες δινορευμάτων μπορεί να ανταγωνιστεί τα ελάσματα από χάλυβα σε εφαρμογές μεγάλου όγκου και χαμηλής συχνότητας.

6.2.3. Συμπεράσματα για τις ιδιότητες των υλικών

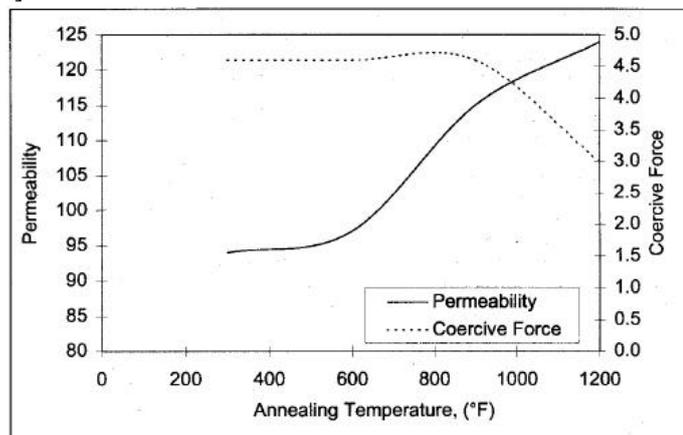
Ο παράγοντας που μεγαλώνει την τιμή της συνεχούσας δύναμης είναι η επεξεργασία του υλικού σε χαμηλές θερμοκρασίες. Για καθαρό σίδηρο, η συνεχούσα δύναμη ενός υλικού μετά από ανόπτηση με επαγωγή 12000 Gauss είναι περίπου 2 Oersted. Αλλά ακόμα και μικρή κατεργασία σε χαμηλές θερμοκρασίες μπορεί να αυξήσει τη συνεχούσα δύναμη περίπου μέχρι τα 4.5 Oersted. Αυτή η τιμή της συνεχούσας δύναμης αυξάνει αρκετά τις απώλειες υστέρησης στις χαμηλές συχνότητες.

Για τα συνθετικά που δεν προέρχονταν από θερμοσυσσωμάτωση, αυτή η αδυναμία έπρεπε να ξεπεραστεί. Μία λύση ήταν να ξανασχεδιαστεί η ηλεκτρική συσκευή με στόχο την ελαχιστοποίηση του διακένου, η οποία όμως, ήταν ανέφικτη πρακτικά. Δοκιμές δείχναν ότι συμπίεση στα 135 MPa αυξάνει τη συνεχούσα δύναμη περίπου στα 3.5 Oersted ενώ στα 685 MPa

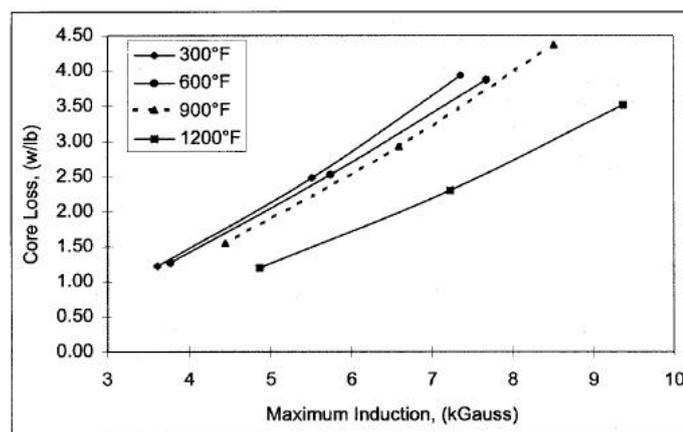
την αυξάνει περίπου στα 4.5 Oersted. Για συνθετικά που έχουν προέλθει από τήξη, τα στοιχεία δείχνουν ότι η συνεχούσα δύναμη είναι περίπου 2 Oersted.

Κάποιες άλλες δοκιμές έγιναν με σκοπό να διερευνηθούν οι επιπτώσεις στις μαγνητικές ιδιότητες ενός υλικού μετά από ανόπτηση σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Στους 650 °C η διαπερατότητα αυξήθηκε κατά 30% σε σχέση με την επεξεργασία στους 150 °C και η συνεχούσα δύναμη μειώθηκε από τα 4.7 Oersted στα 3 Oersted.

Το σχήμα 6.5 παρουσιάζει την επίδραση της θερμοκρασίας κατά την ανόπτηση στη διαπερατότητα και τη συνεχούσα δύναμη του υλικού. Το σχήμα 6.5 παρουσιάζει τις απώλειες πυρήνα για λειτουργία στα 60 Hz σε συνάρτηση με την επαγωγή και τη θερμοκρασία ανόπτησης. Η ανόπτηση στους 650°C μείωσε τις συνολικές απώλειες του πυρήνα κατά 30%. Η μείωση της συνεχούσας δύναμης και η αντίστοιχη μείωση των συνολικών απωλειών του πυρήνα οφείλονται στην αποκατάσταση και ανακρυστάλλωση που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της κατεργασίας αυτής [27].



Σχήμα 6.5: Η επίδραση της θερμοκρασίας στη διαπερατότητα και τη συνεχούσα δύναμη του υλικού κατά την ανόπτηση



Σχήμα 6.6: Απώλειες πυρήνα στα 60 Hz για συμπιεσμένους πυρήνες μετά από ανόπτηση σε διαφορετικές θερμοκρασίες

6.2.4. Η διαδικασία της ανόπτησης

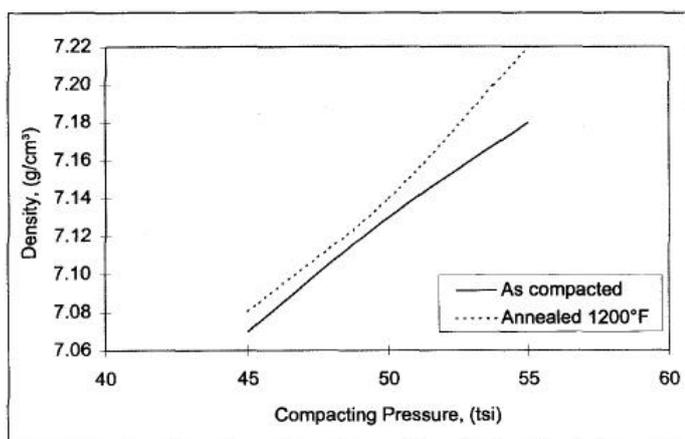
Ανόπτηση ονομάζεται στη μεταλλουργία η θερμική κατεργασία στην οποία υποβάλλεται ένα μέταλλο ή ένα κράμα, που έχει υποστεί σφυρηλάτηση ή ενδοτράχυνση, προκειμένου στη συνέχεια υποβαλλόμενο σε ψύξη να βελτιωθεί η ευκαμψία του και να γίνει λιγότερο εύθρυπτο. Η εφαρμογή της είναι πολύ κοινή σε διαδικασίες παραγωγής οι οποίες απαιτούν εκτεταμένη πλαστική παραμόρφωση, για να επιτρέψει μια παράταση της παραμόρφωσης, χωρίς να επέλθει θραύση ή να χρειαστεί υπερβολική κατανάλωση ενέργειας. Κατά τη διάρκεια αυτής της κατεργασίας είναι δυνατόν να υπάρξει αποκατάσταση και ανακρυστάλλωση. Συνήθως είναι επιθυμητή η απόκτηση λεπτοκρυσταλλικής δομής και συνεπώς η θερμική διεργασία τερματίζεται εγκαίρως, πριν επέλθει σημαντική ανάπτυξη του μεγέθους των κόκκων. Η επιφανειακή οξειδωση αποφεύγεται ή ελαχιστοποιείται εάν η θερμοκρασία της ανόπτησης παραμείνει σε σχετικά χαμηλά επίπεδα, (υψηλότερα όμως της θερμοκρασίας ανακρυστάλλωσης), ή εάν η διεργασία πραγματοποιηθεί σε μη οξειδωτική ατμόσφαιρα .

- 1) Η αποκατάσταση είναι το πρώτο στάδιο της ανόπτησης, κατά το οποίο το υλικό αφού θερμανθεί ,-συνήθως μέχρι το ένα τρίτο της θερμοκρασίας τήξης του υλικού- επιτυγχάνεται αναδιοργάνωση και αποδέσμευση των κρυσταλλικών διαταραχών που προκάλεσαν οι καταπονήσεις από την ενδοτράχυνση. Η ενδοτράχυνση ή εργοσκήρυση είναι μέθοδος αύξησης της αντοχής και της σκληρότητας ενός μεταλλικού υλικού(μετάλλου ή κράματος) με παραμόρφωση πέρα από το όριο διαρροής. Η παραμόρφωση πέρα από το όριο διαρροής οδηγεί σε δραματική αύξηση της πυκνότητας των διαταραχών στο εσωτερικό του υλικού. Σε ένα ανοπτημένο μεταλλικό υλικό η πυκνότητα διαταραχών είναι της τάξης των $10^{10}/m^2$, ενώ σε ένα υλικό που έχει υποστεί ψυχρή κατεργασία, η πυκνότητα διαταραχών είναι της τάξης των $10^{15}/m^2$. Καθώς μεγαλώνει η παραμόρφωση του υλικού, οι διαταραχές μετακινούνται (ολισθαίνουν), τέμνονται, αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και συσσωρεύονται σε ορισμένα σημεία, με αποτέλεσμα να εμποδίζει η μία την κίνηση της άλλης. Με την αύξηση της πυκνότητας των ατελειών, την αλλαγή της κατανομής τους και την παρεμπόδιση της κίνησης τους, το υλικό χάνει την ολκιμότητά του και γίνεται πιο σκληρό. Μακροσκοπικά, η ενδοτράχυνση παρατηρείται εύκολα, όταν πάρουμε ένα μεταλλικό σύρμα και προσπαθήσουμε να το λυγίσουμε μερικές φορές. Αφού το λυγίσουμε μία φορά και το ισιώσουμε, τη δεύτερη φορά πιθανότατα δεν θα λυγίσει στο ίδιο σημείο. Αν καταφέρουμε να το λυγίσουμε ξανά στο ίδιο σημείο, θα νοιώσουμε ότι είναι πιο δύσκαμπτο. Αυτό συμβαίνει επειδή το σημείο καμψής του σύρματος έχει πάθει ενδοτράχυνση. Εάν επαναλάβουμε το λύγισμα μερικές φορές ακόμα, το σύρμα γίνεται ολοένα και πιο δύσκαμπτο και στο τέλος σπάει. Έτσι, κατά τη διαδικασία της αποκατάστασης η πυκνότητα των διαταραχών μειώνεται λίγο με συνέπεια τη μικρή μείωση της σκληρότητας και τη μικρή βελτίωση της ολκιμότητας του υλικού.
- 2) Ένα άλλο στάδιο της ανόπτησης είναι η ανακρυστάλλωση. Κατά την ανακρυστάλλωση, το υλικό θερμαίνεται σε θερμοκρασία ψηλότερη από $0.4 T_m$, όπου T_m η θερμοκρασία τήξης. Η υψηλότερη θέρμανση επιτρέπει τον σχηματισμό νέων κόκκων(κρυστάλλων) που έχουν πολύ λίγες διαταραχές και η μικροδομή του υλικού γίνεται πιο σφαιρική. Επίσης, η πυκνότητα των διαταραχών μειώνεται δραστικά.
- 3) Η ανάπτυξη των κρυστάλλων είναι το στάδιο όπου η αύξηση του μεγέθους των κόκκων(κρυστάλλων) επιτυγχάνεται με διατήρηση του υλικού στη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης για μεγάλο χρόνο. Οι κόκκοι που δημιουργούνται αρχίζουν να μεγαλώνουν, καθώς σ' αυτούς ενσωματώνονται οι μικροί κόκκοι που τους περιβάλλουν. Έτσι, μειώνεται σημαντικά η σκληρότητα του υλικού, αλλά και η αντοχή του.

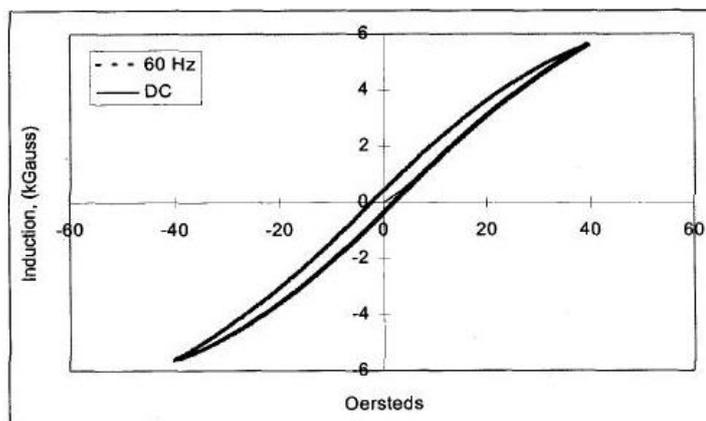
Με την ανόπτηση ένα μεταλλικό υλικό χάνει μεγάλο μέρος της σκληρότητας που απέκτησε με την ενδοτράχυνση και γίνεται πιο αγωγίμο στον ηλεκτρισμό. Επίσης, με την εξάλειψη κρυσταλλικών ατελειών, η πυκνότητα του υλικού αυξάνεται.

Η διαδικασία της ανόπτησης απέδειξε μέσα από πειραματικές μελέτες ότι είναι ικανή να αυξήσει τη μαγνητική διαπερατότητα και να μειώσει τη συνεχούσα δύναμη ώστε να μειώσει και τις απώλειες πυρήνα στη λειτουργία εναλλασσόμενου ρεύματος. Το θέμα, όμως, είναι ότι τα συνθετικά υλικά σκόνης σιδήρου - πολυμερών δεν μπορούν να αποφύγουν την αποσύνθεση των πολυμερών αν φτάσουν στη θερμοκρασία που απαιτεί η διεργασία της ανόπτησης. Επίσης, ούτε το φωσφορικό οξύ μπορεί να διατηρήσει την απόδοση του αν φτάσει σε αυτές τις θερμοκρασίες με αποτέλεσμα να δίνει μειωμένες ιδιότητες. Έτσι, αυτές οι έρευνες και οι πειραματικές μελέτες οδήγησαν στην ανάγκη ενός νέου τύπου μονωτικού υλικού το οποίο θα είναι συμβατό με τις γνωστές μεταλλουργικές τεχνικές και θα επιτρέπει μια τροποποιημένη πρακτική ανόπτησης σε μια ελάχιστη θερμοκρασία 650°C.

Μια οργανομεταλλική ένωση αναπτύχθηκε που πληρούσε τα παραπάνω κριτήρια. Αυτό το μονωτικό υλικό είναι συμβατό με τη σκόνη σιδήρου. Το συγκεκριμένο υλικό μονώνει τη σκόνη με μια τεχνική στρώσης υγρού. Η σκόνη σιδήρου, αφού μονωθεί, συμπιέζεται στους 205-260°C με λιπαντικό σε μια πρέσα. Η ποσότητα του μονωτικού υλικού που χρησιμοποιείται είναι περίπου 2% του όγκου του τελικού μίγματος. Η δυνατότητα συμπίεσης αυτού του υλικού φαίνεται στο σχήμα 6.7. Το συγκεκριμένο υλικό με ανόπτηση μπορεί να φτάσει περίπου σε πυκνότητα 7.22g/cm³. Η ανόπτηση έγινε στους 650°C. Το σχήμα 6.8 παρουσιάζει τους βρόχους υστέρησης σε λειτουργία συνεχούς ρεύματος και σε λειτουργία εναλλασσόμενου ρεύματος στα 60 Hz. Η συνεχούσα δύναμη του υλικού είναι μικρή και στις δύο περιπτώσεις και ο βρόχος σχετικά «κλειστός».

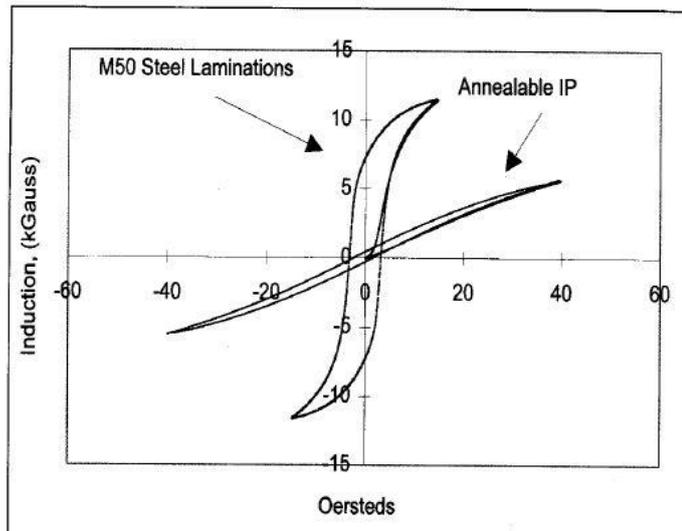


Σχήμα 6.7: Η πυκνότητα σε συνάρτηση με την πίεση του συνθετικού σκόνης σιδήρου με οργανομεταλλική ένωση



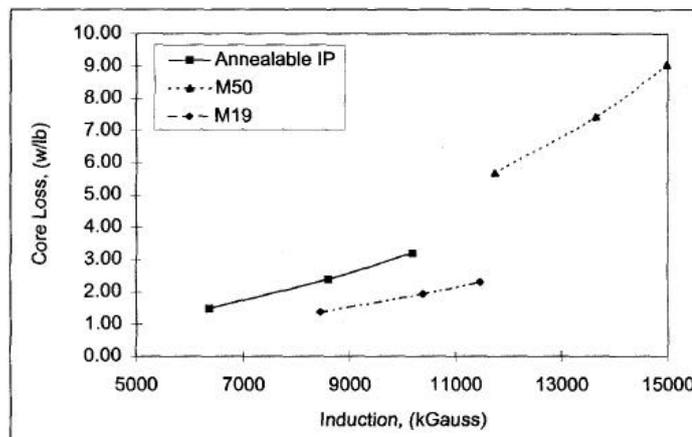
Σχήμα 6.8: Οι βρόχοι υστέρησης σε λειτουργία συνεχούς ρεύματος(DC) και σε λειτουργία εναλλασσομένου ρεύματος(AC) του νέου υλικού

Για να μετρηθούν οι μαγνητικές του ιδιότητες, γίναν κάποιες μετρήσεις σε λειτουργία συνεχούς ρεύματος(DC) και εναλλασσομένου(AC) στα 60 Hz και στα 200Hz για υλικό συμπιεσμένο σε 685Mpa(50tsi) και στη συνέχεια ανόπτηση στους 650°C. Συγκρίθηκε και με τα ελάσματα χάλυβα M50 και M19. Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.9, τα ελάσματα από χάλυβα έχουν μεγαλύτερη διαπερατότητα και αναπτύσσουν μεγαλύτερη μαγνητική επαγωγή σε DC λειτουργία. Η αιτία αυτής της μειωμένης απόδοσης του συνθετικού της σκόνης σιδήρου είναι η παρουσία του μονωτικού.

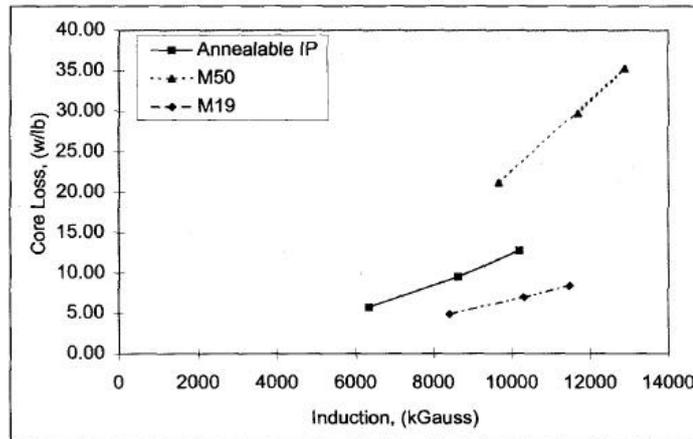


Σχήμα 6.9: Βρόχος υστέρησης για λειτουργία DC του υλικού M50(ελάσματα χάλυβα) και του «νέου» υλικού μονωμένης σκόνης σιδήρου

Στο σχήμα 6.10 παρουσιάζονται οι απώλειες του πυρήνα σε συνάρτηση με την επαγωγή στα 60 Hz των τριών υλικών και στο σχήμα 6.11 οι απώλειες των υλικών στα 200Hz. Όπως διαπιστώνεται το συνθετικό σκόνης έχει μικρότερες απώλειες από το υλικό M50 και στις δύο περιπτώσεις αλλά μεγαλύτερες από του M19 ακόμα και στα 200Hz.



Σχήμα 6.10: Απώλειες πυρήνα στα 60 Hz του «νέου» υλικού και των υλικών M19, M50



Σχήμα 6.11: Απώλειες πυρήνα στα 200 Hz του «νέου» υλικού και των υλικών M19, M50

Τα μειονεκτήματα αυτού του υλικού είναι η χαμηλή μηχανική αντοχή του πριν την ανόπτηση και η μικρή διαπερατότητα στη DC λειτουργία. Η μικρή διαπερατότητα στη DC λειτουργία είναι μια άμεση συνέπεια της μονωτικής οργανομεταλλικής ένωσης. Αυτή η οργανομεταλλική ένωση μειώνει τις απώλειες πυρήνα, παρόλα αυτά δημιουργεί μια πολύ ισχυρή μονωτική στρώση που δεν επιτρέπει τη μεταφορά της μαγνητικής ροής μεταξύ των σωματιδίων [27].

6.2.5. Τρόποι παραγωγής και επεξεργασίας μειγμάτων σκόνης σιδήρου

Η εξέλιξη των μονωμένων σωματιδίων σιδήρου που αποτελείται από καθαρή σκόνη σιδήρου και ένα μονωτικό ομοιόμορφα διαμοιρασμένο στη σκόνη δημιούργησε προοπτικές για τη χρήση του συγκεκριμένου υλικού στη θέση των ελασμάτων από χάλυβα. Η διαπερατότητα των συγκεκριμένων υλικών είναι μικρότερη σε σχέση με αυτή των ελασμάτων λόγω των διάκενων που δημιουργούνται από το μονωτικό μεταξύ των σωματιδίων [29]. Επιπρόσθετα, ο μαγνητικός κορεσμός έρχεται σε χαμηλότερες τιμές επαγωγής σε αυτά τα υλικά.

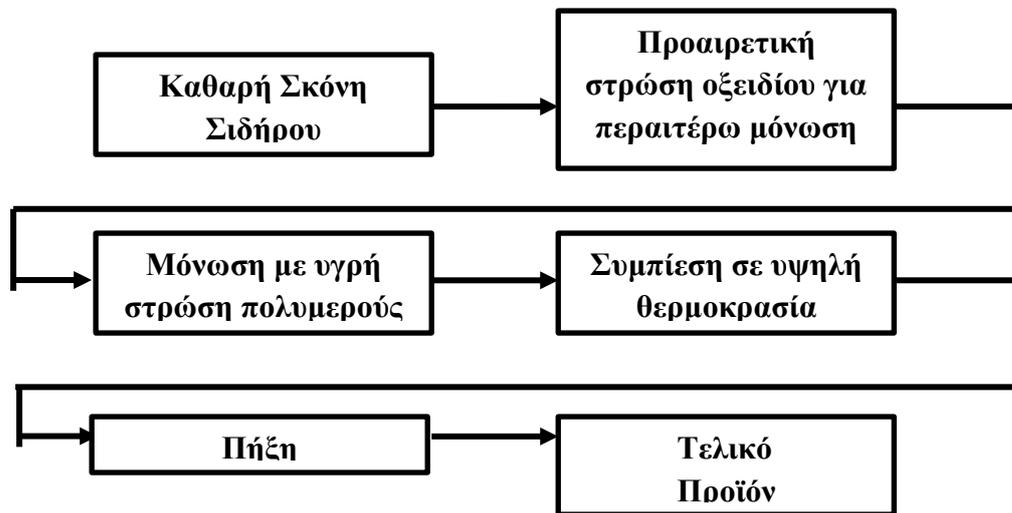
Παρόλα αυτά, τα συνθετικά σκόνης σιδήρου έχουν αρκετά πλεονεκτήματα που όταν ληφθούν υπόψη στη σχεδίαση ενός ηλεκτρομαγνητικού μέρους μπορούν να τα αναδείξουν ως την πιο αποτελεσματική λύση [30]. Τέτοια πλεονεκτήματα είναι η δυνατότητα για καλούπωμα πυρήνα σε πολύπλοκα σχήματα με ελάχιστη φθορά και απώλειες υλικού, η δυνατότητα για δημιουργία ειδικών συστημάτων υλικών για συγκεκριμένες ηλεκτρομαγνητικές εφαρμογές, η πολύ καλή απόκριση στις υψηλές συχνότητες και η ικανότητα τρισδιάστατης μαγνητικής ροής.

6.2.5.1. Οι τρεις κατηγορίες υλικών μονωμένης σκόνης σιδήρου

Τα υλικά μονωμένης σκόνης σιδήρου χωρίζονται σε τρεις γενικές κατηγορίες, στα υλικά με υγρή στρώση μονωτικού, τα συμβατικά συμπιεσμένα υλικά και τα συνθετικά υλικά μετά από ανόπτηση.

1. Υλικά με υγρή στρώση μονωτικού

Τα υλικά με υγρή στρώση μονωτικού παράγονται από τη διαδικασία που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 6.12.



Σχήμα 6.12: Στάδια παραγωγής για συνθετικό σκόνης σιδήρου με υγρή στρώση μονωτικού

Η διαδικασία περιλαμβάνει και κάποια στάδια που είναι προαιρετικά, τα οποία εκτελούνται μόνο αν είναι αναγκαία για κάποια συγκεκριμένη εφαρμογή. Αυτή η ευελιξία στη διαδικασία επιτρέπει στο υλικό να προσαρμοστεί ώστε να αυξήσει την απόδοσή του για συγκεκριμένες εφαρμογές. Η σκόνη σιδήρου για αυτά τα υλικά μονώνεται είτε εξαρχής είτε μετά από μία στρώση οξειδίου για περαιτέρω μόνωση, με ένα πολυμερές υψηλής απόδοσης. Το πολυμερές αυτό αναμειγνύεται σε ποσοστό έως και 1% του συνολικού βάρους. Αυτή η στρώση του πολυμερούς δημιουργεί μια μη αγωγίμη στρώση που περιβάλλει τα σωματίδια σιδήρου απομονώνοντάς τα, αποτρέποντας την ανάπτυξη δινορευμάτων, περιορίζοντας τις απώλειες πυρήνα στο σύνολο των απωλειών του κάθε σωματιδίου ξεχωριστά. Το πολυμερές έχει σχεδιαστεί συγκεκριμένα για συμπίεση με θερμή κατεργασία και για αποτελέσματα που στοχεύουν στη μεγάλη αντοχή και σκληρότητα του υλικού.

Μια σύνοψη των τυπικών μαγνητικών ιδιοτήτων των υλικών με υγρή στρώση σιδήρου φαίνεται στον παρακάτω πίνακα 6.4. Οι μαγνητικές ιδιότητες του συγκεκριμένου υλικού εξαρτώνται άμεσα από τη διαδικασία μόνωσης. Για παράδειγμα, η διαπερατότητα αυξάνει όσο η ποσότητα του πολυμερούς μειώνεται [28]. Αυτή η αύξηση στη διαπερατότητα είναι λόγω των μικρότερων διακένων. Επίσης, αλλάζει και η απόδοση στις υψηλές συχνότητες. Όσο αυξάνεται η ποσότητα του μονωτικού, η σταθερότητα της διαπερατότητας βελτιώνεται στις υψηλότερες συχνότητες.

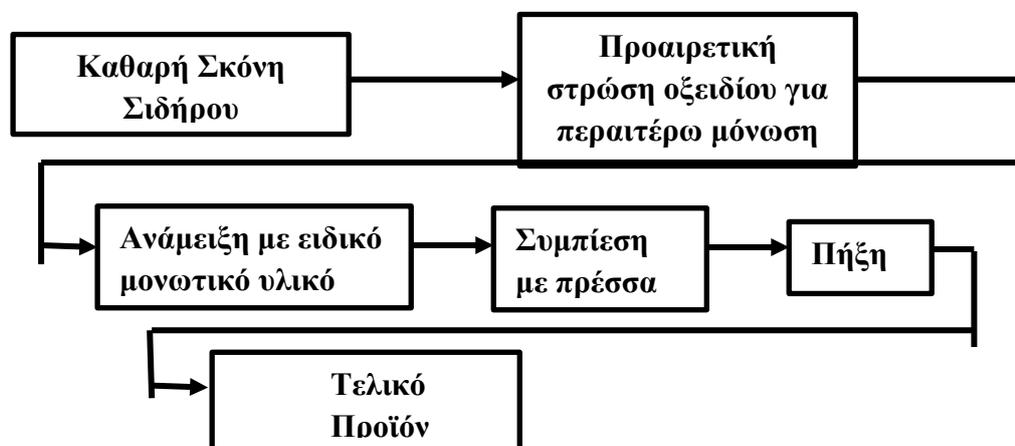
Συνοψίζοντας, τα υλικά μονωμένης σκόνης σιδήρου με υγρή στρώση μονωτικού παρέχουν μεγάλη μηχανική αντοχή και μεταλλική σκληρότητα για τα συνθετικά υλικά, έχουν αντεκτικότητα στη διάβρωση λόγω του πολυμερούς και είναι κατάλληλα για εφαρμοζόμενες θερμοκρασίες έως και 200°C και έχουν πολύ καλή απόδοση στις υψηλές συχνότητες. Μερικά από τα μειονεκτήματα αυτού του είδους υλικού είναι η θερμή συμπίεση, και η όχι καλή απόδοση στη χαμηλή συχνότητα.

Υλικό	Στρώση Πολυμερούς	Στρώση οξειδίου	Πυκνότητα 50 tsi (690 MPa) (σε g/cm ³)	μ	μ _{ma} _x	H _c στα 40 Oe (σε Oe)	B στα 40 Oe (σε KGauss)
SC 100	0,75	Όχι	7,20	100	400	4,8	10,9
SC 120	0,60	Όχι	7,30	120	425	4,7	11,2
SC 600	0,25	Όχι	7,40	140	600	4,7	12,7
TC 80	0,75	Ναι	7,15	80	210	4,7	7,7

2. Τα συμπιεσμένα υλικά

Για να ξεπεραστούν μερικοί από τους περιορισμούς που δημιουργούν τα υλικά με υγρή στρώση μονωτικού δημιουργήθηκαν διάφορα υλικά με διαφορετικές ιδιότητες που συμπιέστηκαν και μονώθηκαν με τους κλασικούς τρόπους. Αυτά τα υλικά χρησιμοποιούν μία στρώση οξειδίου μέσω μιας κατάλληλης κατεργασίας σε συνδυασμό με διάφορα λιπαντικά ή μονωτικά πολυμερή, τα οποία επιλέγονται με βάση τις ιδιότητες τους.

Αυτά τα υλικά έχουν ιδιότητες παρόμοιες με αυτές των υλικών που έχουν μονωθεί με υγρή στρώση αλλά έχουν το επιπλέον πλεονέκτημα της εκμετάλλευσης της κλασικής τεχνικής της συμπίεσης. Το βασικό μειοέκτημα είναι η μείωση της μηχανικής σκληρότητας και αντοχής του υλικού. Τα στάδια παραγωγής των υλικών φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 6.13.



Σχήμα 6.13: Στάδια παραγωγής για συνθετικό σκόνης σιδήρου με υγρή στρώση μονωτικού

Η ποσότητα των μονωτικών πολυμερών είναι συνήθως 0.5% του όγκου αλλά προσαρμόζονται και με βάση τις ανάγκες της εφαρμογής. Οι συνθήκες επεξεργασίας μπορούν επίσης να προσαρμοστούν. Για παράδειγμα, σε μια ψυχρή κατεργασία όπου η σκλήρυνση θα γίνει στους 150°C, θα επιτευχθεί χαμηλότερη πυκνότητα στα σημεία που θα δημιουργηθεί το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, ενώ σε μια θερμή κατεργασία η διαδικασία της σκλήρυνσης μπορεί να παραληφθεί και τα αντίστοιχα μέρη θα έχουν υψηλότερη πυκνότητα.

Ο πίνακας 6.5 δείχνει συγκριτικά αποτελέσματα σε σχέση με το πώς αλλάζουν τα υλικά και το πως οι διαφορετικές παράμετροι επηρεάζουν την πυκνότητα, τη σκληρότητα και τη μηχανική αντοχή του υλικού σε μία συγκεκριμένη πίεση. Τα συγκεκριμένα υλικά δημιουργήθηκαν με θερμή κατεργασία.

Υλικό	Θερμοκρασία Πρέσσας σε °C(°F)	Θερμοκρασία πήξης σε °C(°F)	Πυκνότητα στα 50 tsi (690MPa) σε g/cm ³	Μηχανική αντοχή στα 50 tsi (690MPa) Σε MPa(psi)
AP500LS	Θερμοκρασία δωματίου	480(900)	7,22	36(5257)
AP500HS Cured	Θερμοκρασία δωματίου	180(355)	7,15	96(13822)
AP500HS Warm	138(280)	Όχι	7,45	89(12969)

Press					
AP500 Perm	High	138(280)	480(900)	7,20	33(4850)

Πίνακας 6.5: Συγκρίσεις των ιδιοτήτων για συμπιεσμένα συνθετικά σκόνης σιδήρου με βάση τις διαφορετικές διαδικασίες παραγωγής [28].

Μια σύνοψη των τυπικών μαγνητικών ιδιοτήτων των συμπιεσμένων υλικών σκόνης σιδήρου βρίσκεται στον παραπάνω πίνακα 6.5. Ο συνδυασμός της στρώσης οξειδίου και του μονωτικού πολυμερούς δημιουργούν διάκενα ανάμεσα στα σωματίδια σιδήρου. Αυτό μειώνει την πυκνότητα και την διαπερατότητα του υλικού. Παρόλ' αυτά, η διαπερατότητα δεν είναι εξ ολοκλήρου εξαρτώμενη από τη συνάρτηση της πυκνότητας. Εξαρτάται και από το μέγεθος της παραμόρφωσης που δημιουργείται λόγω της ψυχρής κατεργασίας της σκόνης.

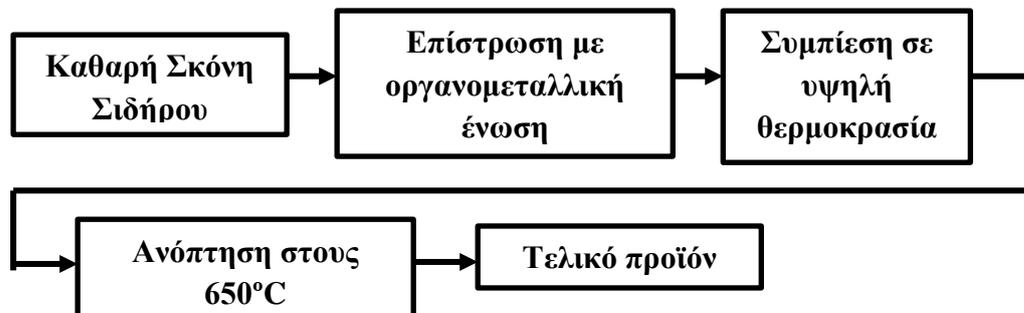
Τα υλικά με στρώση οξειδίου έχουν επιπλέον το πλεονέκτημα της καλής απόδοσης στις υψηλές συχνότητες. Οι συνολικές απώλειες του πυρήνα είναι μια συνάρτηση των απωλειών υστέρησης και των απωλειών λόγω δινορευμάτων. Στις χαμηλές συχνότητες οι απώλειες υστέρησης κυριαρχούν, ενώ στις υψηλές οι απώλειες δινορευμάτων. Στις υψηλές συχνότητες τα δινορεύματα που αναπτύσσονται που διατρέχουν τα σωματίδια σιδήρου οδηγούν σε μια μείωση στη διαπερατότητα. Η στρώση του οξειδίου έχει ως στόχο την αύξηση των διακένων μεταξύ των σωματιδίων, το οποίο με τη σειρά του μειώνει τις συνολικές απώλειες στις υψηλές συχνότητες. Έτσι, σ' αυτού του είδους τα υλικά, η διαπερατότητα δεν αλλάζει κατά πολύ στις υψηλές συχνότητες. Η σταθερότητα της διαπερατότητας εξαρτάται από το είδος της διάχυσης του μονωτικού στη σκόνη.

Στα μειονεκτήματα των συγκεκριμένων υλικών συμπεριλαμβάνονται η χαμηλή μηχανική σκληρότητα και αντοχή και η ανάγκη για συμπίεση σε μεγάλες θερμοκρασίες για τις περισσότερες εφαρμογές.

3.Συνθετικά υλικά μετά από ανόπτηση

Τα συνθετικά υλικά σκόνης σιδήρου που έχουν παραχθεί από ανόπτηση αναπτύχθηκαν για να ανταγωνιστούν το παραμένον πρόβλημα της αύξησης των απωλειών υστέρησης λόγω της ψυχρής κατεργασίας της σκόνης σιδήρου [27].

Η παραμόρφωση λόγω της ψυχρής κατεργασίας παύει να υφίσταται με την ανόπτηση του σιδήρου σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 538°C. Τα συνηθισμένα πολυμερή δεν μπορούν να αντέξουν αυτές τις θερμοκρασίες και γι' αυτό έχουν αναπτυχθεί συγκεκριμένα μονωτικά υλικά τα οποία μπορούν να αντέξουν τέτοιες θερμοκρασίες. Μια τέτοια διαδικασία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 6.14.



Σχήμα 6.14: Στάδια παραγωγής συνθετικού σκόνης σιδήρου με ανόπτηση [28].

Μια σύνοψη των τυπικών μαγνητικών ιδιοτήτων για ένα υλικό που έχει προέλθει από ανόπτηση φαίνεται στον παρακάτω πίνακα 6.4. Το συγκεκριμένο υλικό έχει μεγαλύτερη ποσότητα μονωτικού από το συνηθισμένο, το οποίο οδηγεί στη μείωση της μηχανικής αντοχής μετά την ανόπτηση. Αυτή η στρώση δημιουργεί ένα περίβλημα που απομονώνει πλήρως τα σωματίδια σιδήρου.

Υλικό	Στρώση μονωτικού(%)	Πυκνότητα στα 50tsi (690 MPa) (σε g/cm ³)	Μηχανική αντοχή 50tsi (690 MPa) σε MPa (psi)	μ	μ _{max}	H _c στα 40 Oe (σε Oe)	B στα 40 Oe (σε KGauss)
LCM	2,0	7,25	25(3600)	125	245	4,4	8,0

Πίνακας 6.6: Τυπικές μαγνητικές ιδιότητες συνθετικού σκόνης σιδήρου με ανόπτηση

Τα υλικά από ανόπτηση εμφανίζουν μικρότερη επιφάνεια στο εσωτερικό του βρόχου υστέρησης, το οποίο σημαίνει ότι οι απώλειες είναι μικρότερες. Τα βασικά μειονεκτήματα αυτών των υλικών είναι η χαμηλή μηχανική σκληρότητα και αντοχή λόγω των συγκεκριμένων μονωτικών και η χαμηλή μαγνητική απόδοση λόγω των μεγάλων διακένων. Η χρήση τους περιορίζεται σε εφαρμογές που απαιτούν ελάχιστες απώλειες πυρήνα για να μειωθεί η έκλυση θερμότητας.

6.3. Η σκόνη σιδήρου σε απλές εφαρμογές

Όσον αφορά τη κατασκευή πυρήνα στάτη με σκόνη σιδήρου εκτός βιομηχανίας, οι δυνατότητες είναι περιορισμένες. Για την παραγωγή του μείγματος δεν υπάρχει η δυνατότητα για συμπίεση που είναι ένα από τα βασικά στάδια παραγωγής μειγμάτων στη μεταλλουργική διαδικασία. Έτσι, το μείγμα που μπορούμε να επιτύχουμε με χύτευση της σκόνης σιδήρου θα έχει περιορισμένες μαγνητικές ιδιότητες σε σχέση με αυτές που μπορούν να επιτευχθούν στη βιομηχανία.

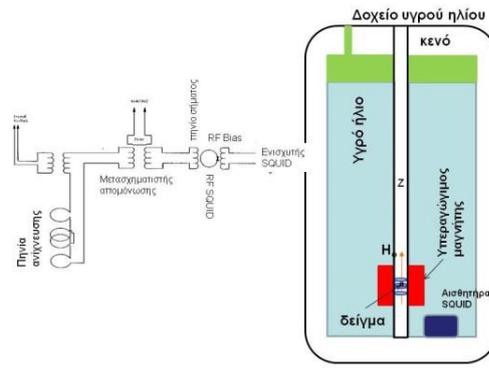
Για την κατασκευή των δύο γεννητριών, αγοράσαμε μία σκόνη σιδήρου αναμειγμένη με λιπαντικό και τη χυτεύσαμε μαζί με ρητίνη σε αναλογία περίπου 70% κατά βάρος. Την καμπύλη μαγνήτισης και το βρόχο υστέρησης τα μετρήσαμε στο ινστιτούτο νανοεπιστήμης και νανοτεχνολογίας «Δημόκριτος».

Η μέτρηση της μαγνητικής ροπής σαν συνάρτηση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου(αυξάνοντας το μαγνητικό πεδίο από 0 έως 50 kOe και από -50 kOe έως -500 έγινε με το μαγνητόμετρο SQUID(Quantum Design) στους 300K. Η μέτρηση έγινε σε συμπαγές δοκίμιο ακανόνιστου σχήματος και μάζας 12 mg.

6.3.1. Το μαγνητόμετρο SQUID(Superconducting Quantum Interference Device)

Μία σημαντική κατηγορία μαγνητόμετρων είναι αυτά που βασίζονται στον αισθητήρα SQUID(superconducting quantum interference device)

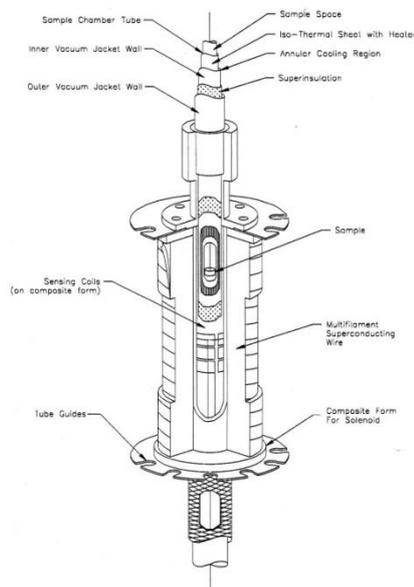
ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΟ SQUID



Σχήμα 6.15: Φωτογραφία του μαγνητόμετρου SQUID

Σχήμα 6.16: Σχηματικό διάγραμμα των σημαντικότερων εξαρτημάτων ενός μαγνητόμετρου SQUID. Το μαγνητόμετρο SQUID αποτελείται από (α) το πηνίο ανίχνευσης σε διάταξη δεύτερης παραγωγού, (β) το πηνίο σήματος και (γ) τον αισθητήρα SQUID.

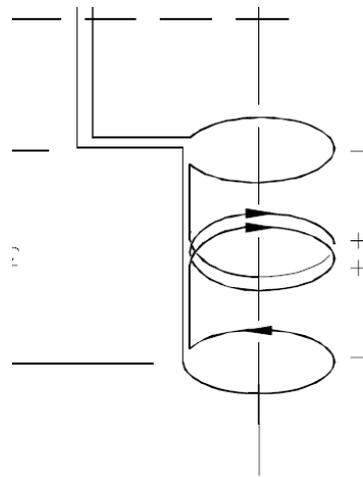
Το μαγνητόμετρο SQUID, εκτός των άλλων, είναι εφοδιασμένο με υπεραγωγίμο πηνίο το οποίο μπορεί να παράξει μαγνητικό πεδίο έως 55 kOe. Επιπλέον, διαθέτει σύστημα χαμηλής κατανάλωσης υγρού ηλίου για τη μεταβολή της θερμοκρασίας του δείγματος. Η περιοχή θερμοκρασιών που μπορούμε να εκτελέσουμε μετρήσεις είναι 1.8 – 350 K. (Στο επόμενο σχήμα 7.16 φαίνεται μία τομή του μαγνητόμετρου στην περιοχή του υπεραγωγίμου μαγνήτη και των πηνίων ανίχνευσης.)



Σχήμα 6.17: Προοπτική τομή του υπεραγωγίμου μαγνήτη, των πηνίων ανίχνευσης και των σωληνώσεων για τη μεταβολή της θερμοκρασίας του μαγνητόμετρου SQUID.

Το σημαντικότερο εξάρτημα του μαγνητόμετρου SQUID είναι ο αισθητήρας SQUID. Ουσιαστικά ο αισθητήρας SQUID είναι ένας μετατροπέας μαγνητικής ροής σε ηλεκτρική τάση με πολύ μεγάλη διακριτική ικανότητα. Στο μαγνητόμετρο που θα χρησιμοποιήσουμε ο αισθητήρας SQUID είναι rf. Εκτός από τους rf αισθητήρες SQUID υπάρχουν και οι DC που αποτελούνται από ένα υπεραγωγίμο δακτύλιο ο οποίος διακόπτεται σε δύο σημεία με επαφές Josephson.

Ο αισθητήρας rf-SQUID αποτελείται από ένα υπεραγώγιμο δακτύλιο και μία ασθενή επαφή (επαφή Josephson). Η επαφή Josephson είναι μία περιοχή του δακτυλίου με μέγεθος της τάξης του μήκους συσχέτισης του υπεραγωγού, στην οποία οι υπεραγώγιμες ιδιότητες είναι υποβαθμισμένες. Βάση του φαινομένου Josephson, το υπερέυμα που διαρρέει το δακτύλιο με τη ασθενή επαφή μπορεί να διαμορφωθεί με τη μαγνητική ροή που διαρρέει την επιφάνεια του δακτυλίου. Η μεταβολή του υπερέυματος με την εξωτερική μαγνητική ροή μοιάζει με την εικόνα συμβολής, με περίοδο μέγιστων το κβάντο μαγνητικής ροής, $\Phi_0 = 2.0 \cdot 10^{-7} \text{ Gauss cm}^2$. Αυτό το γεγονός έχει σαν συνέπεια -αν το μέγεθος του δακτυλίου είναι αρκούντως μικρό- να μπορούμε να ανιχνεύσουμε πολύ μικρές αλλαγές της μαγνητικής επαγωγής $B = 0.1 \Phi_0 / A$ (π.χ. για $A = 1 \text{ mm}^2$, $B = 0.1 \Phi_0 / A \approx 1 \cdot 10^{-6} \text{ Gauss} \approx 0.1 \text{ nT}$). Επειδή οι μαγνητικές μετρήσεις γίνονται σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο ο αισθητήρας SQUID δεν βρίσκεται σε άμεση επαφή με το δείγμα. Η μεταφορά του μαγνητικού σήματος στον αισθητήρα SQUID γίνεται μέσω του κυκλώματος ανίχνευσης (σχήμα 6.18). Η μαγνητική ροή μαγνητικού δείγματος ανιχνεύεται από τέσσερις σπείρες τυλιγμένες σε διάταξη δευτέρας παραγωγού (παρακάτω σχήματα).



Σχήμα 6.18: Διάταξη δεύτερης παραγωγού των πηνίων ανίχνευσης.

Αυτές οι σπείρες μαζί με τα πηνία της ανατροφοδότησης και του μετασχηματιστή αποτελούν το κύκλωμα ανίχνευσης. Το κύκλωμα ανατροφοδότησης χρησιμοποιείται για να επιτυγχάνεται μέγιστη σταθερότητα στην απόκριση του αισθητήρα SQUID. Ο μετασχηματιστής απομόνωσης χρησιμοποιείται για μείωση του θορύβου και σε συνδυασμό με την αντίσταση θερμάνσεως για να μειώνει το σήμα και να μην προκαλείται υπερφόρτωση του αισθητήρα SQUID. Αυτό το κύκλωμα δίνει τη δυνατότητα να γίνονται μετρήσεις δειγμάτων από 500 emu έως 10^{-6} emu .

Το κύκλωμα των πηνίων ανίχνευσης αποτελείται από υπεραγώγιμο καλώδιο. Επειδή σε ένα υπεραγώγιμο βρόγχο το ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό του καλωδίου είναι μηδέν (βασική ιδιότητα των υπεραγωγών στην κατάσταση Meissner ή την κρίσιμη κατάσταση) σύμφωνα με το νόμο του Faraday η μαγνητική ροή θα πρέπει να παραμένει σταθερή. Πράγματι,

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \Rightarrow \int (\nabla \times \mathbf{E}) \cdot d\mathbf{a} = - \int \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{a}$$

$$\mathbf{B} \cdot d\mathbf{a} \Rightarrow \frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0$$

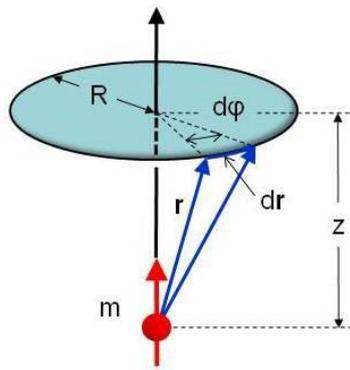
Στη δεύτερη σχέση το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα λαμβάνεται στο εσωτερικό του υπεραγωγίμου καλωδίου έτσι ώστε το ηλεκτρικό πεδίο να είναι μηδέν. Στις προηγούμενες σχέσεις λάβαμε υπόψη ότι ο βρόχος μένει ακίνητος και μόνο η μαγνητική επαγωγή μεταβάλλεται με το χρόνο. Η μαγνητική επαγωγή προέρχεται από δείγμα το οποίο θεωρούμε ως ένα σημειακό μαγνητικό δίπολο που κινείται με σταθερή ταχύτητα κατά μήκος του άξονα συμμετρίας των πηνίων ανίχνευσης. Συνεπώς κάθε αλλαγή της μαγνητικής επαγωγής που περνά μέσα από τον υπεραγωγίμο βρόχο θα επάγει ηλεκτρικό ρεύμα φοράς τέτοιας, ώστε η συνολική μαγνητική ροή που περνά από τα πηνία ανίχνευσης να παραμένει σταθερή. Η μαγνητική ροή βρόχου ρεύματος, αυτεπαγωγής L , ο οποίος διαρρέεται από ρεύμα I , σε εξωτερική μαγνητική επαγωγή \mathbf{B}_{ext} θα δίνεται από την εξίσωση:

$$\Phi = LI + \int \mathbf{B}_{ext} \cdot d\mathbf{a} = \text{σταθερά}$$

Αν φέρουμε από το άπειρο ένα μαγνητικό δίπολο κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του υπεραγωγίμου βρόχου που δεν διαρρέεται από ρεύμα, το ρεύμα που θα επαχθεί για να μην αλλάξει η μαγνητική ροή θα ισούται με:

$$I = -\frac{1}{L} \int \mathbf{B}_{ext} \cdot d\mathbf{a}$$

Με τη βοήθεια μετασχηματιστή απομόνωσης το συγκεκριμένο ρεύμα μεταφέρεται σε ένα υπεραγωγίμο πηνίο το οποίο με τη σειρά του δημιουργεί μαγνητικό πεδίο, ανάλογο με την ένταση της μαγνητικής ροπής του δείγματος, το οποίο εφαρμόζεται στο βρόχο με την επαφή RF Josephson (Σχήμα 7.15)



Σχήμα 6.19: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δακτυλίου και σημειακού διπόλου, το οποίο βρίσκεται στον άξονα του δακτυλίου.

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε τη μαγνητική ροή που προκαλεί ένα σημειακό μαγνητικό δίπολο που βρίσκεται στον άξονα συμμετρίας πηνίου ανίχνευσης. Η συνολική ροή θα ισούται με το αλγεβρικό άθροισμα των μαγνητικών ροών που περνούν από τις τέσσερις σπείρες του πηνίου ανίχνευσης. Η μαγνητική ροή που προκαλεί ένα σημειακό μαγνητικό δίπολο, που απέχει απόσταση z από το κέντρο της σπείρας, μπορεί να υπολογιστεί ως ακολούθως:

$$\Phi = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = \int (\nabla \times \mathbf{A}) \cdot d\mathbf{S} = 0$$

Άρα

$$\Phi = 0$$

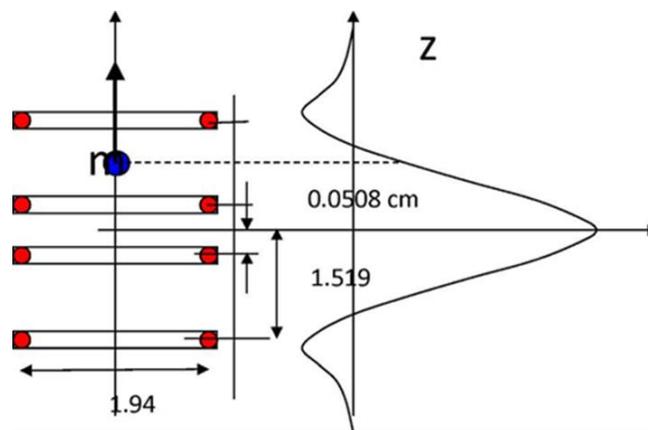
Αν \mathbf{e}_φ είναι το μοναδιαίο εφαπτομενικό διάνυσμα στην περιφέρεια της σπείρας(σχήμα 4) τότε θα ισχύουν $d\mathbf{r} = R \cdot d\varphi \mathbf{e}_\varphi$ και $\mathbf{m} \times \mathbf{r} = m \cdot r \sin \theta \mathbf{e}_\varphi = \mathbf{e}_\varphi m \cdot r \cdot \frac{R}{r}$. Άρα η μαγνητική ροή γίνεται:

$$\Phi = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{m r R^2}{r^4} \int_0^{2\pi} d\varphi = \frac{\mu_0 m R^2}{2 r^3} \Leftrightarrow \Phi = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{m R^2}{(R^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}}$$

Λαμβάνοντας υπόψη τη διάταξη των τεσσάρων δακτυλίων του πηνίου ανίχνευσης(δες σχήμα 3), η συνολική ροή θα δίνεται από τη σχέση $\Phi = \Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3 + \Phi_4$ ή :

$$\Phi(z) = \frac{\mu_0}{2} m R^2 \cdot \left(\frac{1}{(R^2 + (z - z_0)^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{1}{(R^2 + (z - z_1)^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{1}{(R^2 + (z - z_2)^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{1}{(R^2 + (z - z_0)^2)^{\frac{3}{2}}} \right)$$

Ουσιαστικά, η συνολική μαγνητική ροή που διαρρέει τα πηνία ανίχνευσης (όταν το δείγμα βρίσκεται στο κέντρο είναι ανόλογη της δεύτερης παραγώγου της κατανομής της μαγνητικής ροπής κατά μήκος του άξονα z. Για αυτό το λόγο η συγκεκριμένη διάταξη των πηνίων ανίχνευσης ονομάζεται βαθμιδόμετρο δεύτερης παραγώγου. Λόγω της παρουσίας της μαγνητικής ροής δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα στο κύκλωμα ανίχνευσης ανάλογο της συνολικής μαγνητικής ροής που διέρχεται από τα πηνία ανίχνευσης.



Σχήμα 6.20: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πηνίων ανίχνευσης(αριστερό σχήμα), και μεταβολή του σήματος SQUID συναρτήσει της θέσης του δείγματος(δεξί σχήμα).

Το συγκεκριμένο ηλεκτρικό ρεύμα με τη σειρά του δημιουργεί μαγνητικό πεδίο το οποίο «αισθάνεται» ο αισθητήρας SQUID, ο οποίος παράγει στην έξοδό του ηλεκτρική τάση ανάλογη με την μαγνητική ροή των πηνίων ανίχνευσης ή με άλλα λόγια:

$$V(z) \propto \Phi(z) \propto m f(z)$$

Στο σχήμα 6.20 φαίνεται η μορφή της καμπύλης $V(z)$ (συνάρτηση απόκρισης) για το βαθμιδόμετρο δεύτερης παραγώγου και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πηνίων ανίχνευσης. Η μαγνητική ροπή του δείγματος εξάγεται μετά από προσαρμογή με τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων μεταξύ της πειραματικής συνάρτησης απόκρισης και της θεωρητικής συνάρτησης $\Phi(z)$ που υπολογίσαμε παραπάνω [31].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΜΑΓΝΗΤΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζουμε το λογισμικό που χρησιμοποιήσαμε για τη μοντελοποίηση της προηγούμενης διαδικασίας στον υπολογιστή. Η ύπαρξη τόσων πολλών μεταβλητών στο πρόβλημα της διαστασιολόγησης και οι πολλές τιμές που μπορούν αυτές να λάβουν καθιστούν αναγκαία τη μοντελοποίηση της διαδικασίας. Έτσι, επιτυγχάνεται εύκολη και γρήγορη αλλαγή μεταβλητών, καθώς και βελτιστοποίησή τους, και δίνεται η δυνατότητα μελέτης ενός εύρους ισχύος γεννητριών.

Επίσης, περιγράφεται η βελτιστοποίηση της σχεδίασης για τις γεννήτριες αξονικής ροής που μελετάμε. Στόχος της βελτιστοποίησης είναι από τη μία να μεγιστοποιηθεί η απόδοση των γεννητριών και από την άλλη να ελαχιστοποιηθεί το κόστος κατασκευής τους. Αυτές τις δύο αντικρουόμενες επιθυμίες που έχει ένας σχεδιαστής θα προσπαθήσουμε να τις φέρουμε σε ισορροπία με το κριτήριο βελτιστοποίησης που θα χρησιμοποιήσουμε. Κάθε σχεδιαστής βέβαια, σύμφωνα και με τις δικές του προτεραιότητες, θα μπορούσε να ρυθμίσει αυτό το κριτήριο, όπως θα δούμε στη συνέχεια, ώστε να εξυπηρετεί περισσότερο το στόχο του ελάχιστου κόστους ή της βέλτιστης απόδοσης.

7.1. Το λογισμικό προσομοίωσης

7.1.1. Η διαστασιολόγηση σε Matlab(-Octave)

Πρόκειται για απλό λογισμικό που μοιάζει πολύ με τις γλώσσες Pascal και C, γλώσσες που γνωρίζει ο σύγχρονος μηχανικός. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε το συγκεκριμένο λογισμικό είναι, κυρίως, οι πολλές έτοιμες συναρτήσεις και toolboxes που περιλαμβάνει, κάνοντας εργασίες όπως η λύση πολυωνύμων, η εξαγωγή εξισώσεων ή ο μετασχηματισμός Fourier να φαίνονται απλές, αλλά και η δυνατότητα επικοινωνίας του με το FEMM, πρόγραμμα που παρουσιάζεται παρακάτω.

Έτσι, όλη η παραπάνω διαδικασία γράφεται σε κώδικα Matlab, ώστε όχι μόνο να αποφεύγονται οι χρονοβόρες πράξεις με το χέρι, αλλά και να μπορεί να γίνει επαναληπτική χρήση της διαστασιολόγησης ώστε να εξετάζουμε την επιρροή όλων των μεταβλητών στο πρόβλημα.

7.1.2. Το λογισμικό FEMM

Μετά τη διαδικασία της διαστασιολόγησης και της βελτιστοποίησης ορισμένων μεταβλητών απαιτείται η προσομοίωση της γεννήτριας σε κατάλληλο λογισμικό, ώστε να επαληθευθούν οι στόχοι της διαστασιολόγησης (ισχύς, ροπή, απόδοση, ονομαστικό ρεύμα και τάση κ.α.). Το λογισμικό αυτό βασίζεται στη μέθοδο ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis - FEA).

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το FEMM (Finite Element Method Magnetics) [<http://femm.foster-miller.com>]. Πρόκειται για ελεύθερο λογισμικό που χρησιμοποιεί τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων για να λύσει μαγνητικά και ηλεκτροστατικά προβλήματα σε δύο διαστάσεις. Δίνει τη δυνατότητα μέτρησης πολλών μεγεθών όπως η μαγνητική επαγωγή, η πεπλεγμένη ροή, η ένταση του μαγνητικού πεδίου κ.ά. Μπορεί να μετρήσει το ζητούμενο μέγεθος όπου ακριβώς θέλει ο χρήστης χωρίζοντας το πρόβλημα σε τρίγωνα για τα οποία υπολογίζει το διανυσματικό δυναμικό A . Το διανυσματικό δυναμικό έχει τη διεύθυνση του άξονα z και μέτρο που εξαρτάται από τις τιμές στους άξονες x και y όταν το πρόβλημα τίθεται στους δύο τελευταίους άξονες και μόνο. Γενικά ισχύει:

$$A = \nabla \times \mathbf{B}$$

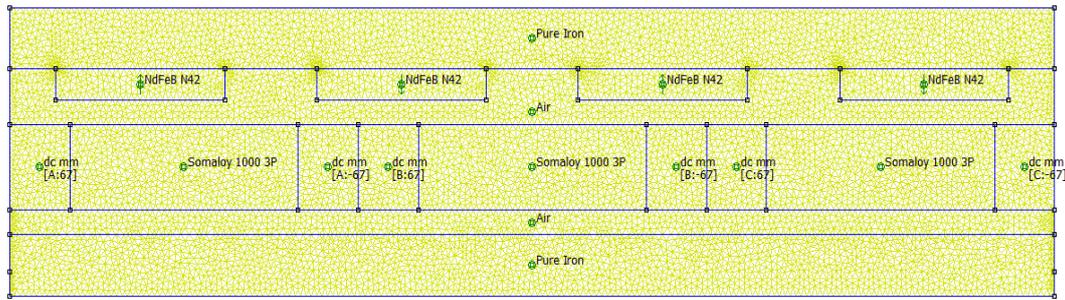
και από το θεώρημα Stokes βρίσκεται η μαγνητική ροή Φ :

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} dS = \int \nabla \times \mathbf{A} \cdot dS = \oint_C dl$$

7.1.3. Προσομοίωση της γεννήτριας με συνδυασμό Matlab-FEMM

Η διάταξη της γεννήτριας μπορεί να σχεδιαστεί στο FEMM στις δύο διαστάσεις ως εξής: Θεωρείται μια τομή της δισκοειδούς δομής της γεννήτριας σε όποια ακτίνα είναι επιθυμητή, αρκεί αυτή να είναι αντιπροσωπευτική. Συνήθως η τομή γίνεται στη μέση ακτίνα R_{avg} και τα αποτελέσματα είναι αρκετά αντιπροσωπευτικά. Για μεγαλύτερη ακρίβεια μπορούν να γίνουν τομές και στην εσωτερική και εξωτερική ακτίνα και να βρεθεί τελικά ο μέσος όρος του ζητούμενου μεγέθους. Όσο περισσότερες οι τομές τόσο μεγαλύτερη η ακρίβεια. Αφού έχει γίνει η τομή, θεωρείται το ευθύγραμμο ανάπτυγμα αυτής. Το ανάπτυγμα αυτό δεν εξετάζεται ολόκληρο καθώς μπορεί να είναι πολύ μεγάλο, αλλά μόνο ένα κομμάτι, π.χ. 4 πολικά βήματα και θεωρώντας ύστερα περιοδικές συνθήκες στα σύνορα. Με λίγα λόγια, το ίδιο το πρόγραμμα καταλαβαίνει ότι αριστερά και δεξιά της διάταξης υπάρχει η ίδια διάταξη και ας μη φαίνεται. Έτσι, γίνεται σωστή απεικόνιση και υπολογισμός των πεδίων δίχως να έχει σημασία ο αριθμός των επαναλήψεων που θα ήθελε ο σχεδιαστής να έχει η διάταξη.

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η τομή στη μέση ακτίνα (R_{avg}) μιας γεννήτριας αξονικής ροής με μαγνήτες νεοδυμίου N42, όπως αναπαρίσταται στο FEMM. Οι μικρές κίτρινες κουκίδες είναι τα τρίγωνα στα οποία έχει χωρίσει το πρόγραμμα τη διάταξη προκειμένου να λύσει το πρόβλημα.



Σχήμα 7.1: Τομή γεννήτριας στη μέση ακτίνα στο FEMM

Το μειονέκτημα του FEMM είναι η στατικότητα του. Δε μπορεί να δεχθεί μεταβλητές εισόδους. Ο σχεδιαστής πρέπει να γνωρίζει όλες τις διαστάσεις και με το χέρι να τις περάσει στο FEMM σχεδιάζοντας σημεία και γραμμές. Ο συνδυασμός Matlab - FEMM είναι ο κατάλληλος για τη λύση του προβλήματος αυτού, καθώς το ένα πρόγραμμα μπορεί δομικά να επικοινωνεί με το άλλο. Ότι ακριβώς κάνει ο σχεδιαστής με το χέρι στο FEMM γνωρίζοντας τις διαστάσεις της γεννήτριας μπορεί να γραφεί με κώδικα στο Matlab, με τη διαφορά ότι εκεί όλες οι διαστάσεις αναπαρίστανται από μεταβλητές. Η εντολή π.χ. `mi_addsegment(x1, y1, x2, y2)` προσθέτει μια γραμμή που ενώνει τα σημεία $(x1, y1)$ και $(x2, y2)$ του πλέγματος στο FEMM. Οι μεταβλητές μπορούν οποιαδήποτε στιγμή να αλλάξουν και να προκύψει μια νέα διάταξη. Με αυτή τη λογική γράφεται κώδικας στο Matlab για τη δημιουργία στο FEMM μιας μηχανής αξονικής ροής απροσδιόριστων διαστάσεων. Τώρα ο σχεδιαστής έχει τη δυνατότητα να μελετήσει στατικά όποια γεννήτρια θέλει.

Άλλο ένα πρόβλημα που παρουσιάζεται λόγω της στατικότητας του FEMM και λύνεται με τη χρήση του Matlab είναι πως δεν υπάρχει άμεσως τρόπος για να αντιληφθεί το FEMM την περιστροφή του δρομέα και, άρα, τη συνολική λειτουργία της γεννήτριας, ώστε να βρεθούν τάσεις, ρεύματα, ισχύς, απόδοση και άλλα μεγέθη που είναι απαραίτητα για την προσομοίωση της γεννήτριας.

Με χρήση και πάλι του Matlab και επιλέγοντας το επιθυμητό βήμα μετακίνησης (συνήθως 1 μηχανική μοίρα ή και λιγότερο ανάλογα με την ακρίβεια που επιζητείται), διαγράφουμε το πλάτος της διάταξης που αντιστοιχεί σε ένα βήμα από τη μία πλευρά και το σχεδιάζουμε στην άλλη. Με προσοχή πάντα στη διατήρηση της συμμετρίας της διάταξης ώστε να μην υπάρχει πρόβλημα στην περιοδικότητα. Η διαδικασία αυτή χωρίζεται σε στάδια και, ανάλογα με το κομμάτι που μεταφέρεται κάθε στιγμή, μπορεί να διαφέρει. Ολοκληρώνεται με την πλήρη μεταφορά ενός μαγνήτη, ενώ αρκεί η ολοκλήρωση μίας ηλεκτρικής περιόδου (2 πολικά βήματα) για να λάβει ο σχεδιαστής όλες τις απαραίτητες πληροφορίες. Παρ' όλα αυτά η μετακίνηση μπορεί να γίνει όσες φορές είναι επιθυμητό και με ό,τι χαρακτηριστικά επιθυμεί ο σχεδιαστής [5].

7.2. Βελτιστοποίηση διαστάσεων μαγνήτη

7.2.1. Κριτήρια και μεταβλητές βελτιστοποίησης

Το πρώτο που πρέπει να καθοριστεί είναι οι μεταβλητές που θα βελτιστοποιηθούν. Μπορεί η τιμή των μεταβλητών αυτών να είναι ήδη γνωστή στο σχεδιαστή αλλά να μη γνωρίζει αν είναι

βέλτιστη ή να είναι εντελώς άγνωστη και να πρέπει με κάποια διαδικασία να αποφασίσει. Παραδείγματα μεταβλητών που επιλέγονται να βελτιστοποιηθούν σε άλλες παρόμοιες εργασίες είναι: η εξωτερική ακτίνα της γεννήτριας, ο λόγος εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα, ο λόγος πλάτους μαγνήτη προς πλάτος πολικού βήματος, το πάχος του μαγνήτη, το πάχος του στάτη, το πάχος του σιδήρου, ο βαθμός του μαγνήτη, η διάμετρος του χαλκού και το μήκος του διακένου.

Θεωρώντας το μαγνήτη ως το πιο κρίσιμο υλικό της σχεδίασης, οι μεταβλητές που επιλέξαμε να βελτιστοποιήσουμε είναι οι διαστάσεις του μαγνήτη, w_m και l_a (πλάτος και μήκος μαγνήτη αντίστοιχα), με πεδίο ορισμού 20-100 mm. Τα πεδία ορισμού προέκυψαν μετά από βιβλιογραφική μελέτη για τις πιο συχνά εμφανιζόμενες τιμές των μεταβλητών και επεκτάθηκαν λίγο σαν δικλείδα ασφαλείας.

Όσον αφορά τα κριτήρια ως προς τα οποία γίνεται η βελτιστοποίηση, αυτά εξαρτώνται από το είδος της εφαρμογής. Όπως έχουμε πει, μελετάμε εφαρμογές χαμηλού κόστους και επίσης μας ενδιαφέρει η καλή αξιοποίηση των υλικών που χρησιμοποιούνται.

Έτσι, χρησιμοποιήθηκε συνδυαστικό κριτήριο βέλτιστης απόδοσης - ελάχιστου κόστους με βάρη που επιλέχθηκαν σύμφωνα με τη λογική ότι θέλουμε να μεγιστοποιήσουμε την απόδοση αλλά χωρίς το κόστος να υπερβαίνει τα 100€ /ανά αύξηση της απόδοσης κατά 0.1.

Τα βάρη που επιλέχθηκαν στο συνδυαστικό κριτήριο είναι σίγουρα υποκειμενικά και θα ήταν καλό ο κάθε σχεδιαστής, σύμφωνα με τις προτεραιότητές του, να επιλέξει τα ανάλογα βάρη.

Να σημειωθεί επίσης ότι η μελέτη του κόστους βασίζεται σε τρέχουσες τιμές των υλικών οι οποίες έχουν δοθεί από τις εταιρίες που τα εμπορεύονται.

7.2.2. Απόρριψη διατάξεων κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης

Στη διαδικασία της βελτιστοποίησης εισάγονται ορισμένοι περιορισμοί ώστε να μη λαμβάνονται υπόψιν οι διατάξεις που δεν τους ικανοποιούν. Οι περιορισμοί αυτοί εισάγονται στον κώδικα ως λογικές σχέσεις που όταν ικανοποιούνται, έχουν ως αποτέλεσμα την απόδοση πολύ μεγάλης τιμής στο κόστος και πολύ μικρής τιμής στην απόδοση, οπότε οι συγκεκριμένες διατάξεις αναπόφευκτα απορρίπτονται.

Επίσης, κάποιες μεταβλητές που δεν είναι εύκολο να υπολογιστούν θεωρητικά, αλλά μας ενδιαφέρει να προσεγγιστούν με μεγάλη ακρίβεια, παίρνουν αρχικά μία προσεγγιστική τιμή, στη διάρκεια της διαστασιολόγησης επαναπροσδιορίζονται και η σχεδίαση εκτελείται επαναληπτικά μέχρι η τιμή τους να συγκλίνει. Αν μετά από ένα αριθμό επαναλήψεων δεν έχει επιτευχθεί σύγκλιση, τότε η διάταξη απορρίπτεται.

7.2.2.1. Κατασκευαστικοί περιορισμοί

Ο πρώτος περιορισμός που λήφθηκε υπόψιν αφορά στην εσωτερική ακτίνα R_{in} της γεννήτριας και το πλάτος του μαγνήτη w_m . Στις περιπτώσεις που χρησιμοποιείται ορθογώνιος μαγνήτης, όπως συμβαίνει στην εργασία αυτή, υπάρχει περίπτωση να προκύψει σχεδιαστικά διάταξη, όπου οι μαγνήτες επικαλύπτονται στην εσωτερική ακτίνα. Για να είναι υλοποιήσιμη η σχεδίαση

θα πρέπει οι μαγνήτες οριακά να εφάπτονται στην εσωτερική ακτίνα, οπότε πρέπει να απορρίπτονται οι διατάξεις για τις οποίες ισχύει:

$$2 \cdot \pi \cdot R_{in} < w_m \cdot p$$

Ένας ακόμα κατασκευαστικός περιορισμός αφορά την κατασκευή των πηνίων. Τα πηνία τυλίγονται με το χέρι με ένα εργαλείο που επίσης κατασκευάζεται με το χέρι. Αυτό δημιουργεί ορισμένους περιορισμούς στο σχήμα πηνίου που μπορεί να παραχθεί. Πιο συγκεκριμένα, τα πηνία δε μπορεί να είναι πολύ λεπτά σε σχέση με το μήκος τους (πολύ «πλακέ») γιατί τότε δε θα μπορούν να βγουν από το εργαλείο διατηρώντας το σχήμα τους. Ο περιορισμός αυτός εκφράζεται μέσω του λόγου αξονικού ύψους πηνίου προς πάχος πλευράς πηνίου, t_w/w_c , που σύμφωνα με το [5] πρέπει να είναι: $\frac{t_w}{w_c} > 0,4$. Όμως, από την προηγούμενη εμπειρία στο εργαστήριο σε κατασκευές παρόμοιων γεννητριών, διαπιστώθηκε ότι το όριο του 0.35 είναι αρκετό για να εξασφαλίσει την κατασκευαστική λειτουργικότητα του πηνίου. Οπότε η συνάρτηση που προστέθηκε και οδηγεί στην απόρριψη των διατάξεων που την ικανοποιούν είναι:

$$\frac{t_w}{w_c} < 0,35$$

Τέλος, κατά τη διάρκεια των βελτιστοποιήσεων προέκυψε η ανάγκη για έναν περιορισμό στην ελάχιστη τιμή που μπορεί να πάρει η εσωτερική πλευρά του πηνίου w_{1in} . Συγκεκριμένα, αρκετές φορές η βελτιστοποίηση οδηγούσε σε διατάξεις που η μεταβλητή αυτή είχε αρνητική τιμή, δηλαδή οι πλάγιες πλευρές του πηνίου δεν κατέληγαν σε μία πλευρά ώστε να σχηματίζουν ένα τραπέζιο αλλά διασταυρώνονταν. Για την απόρριψη, λοιπόν, τέτοιων σχεδιάσεων χρησιμοποιήθηκε η σχέση:

$$w_{1in} < 5$$

που οδηγεί στην απόρριψη της διάταξης αν και εφόσον η εσωτερική πλευρά των πηνίων είναι μικρότερη από 5mm.

7.2.2.2. Έλεγχος μεταβλητών

Οι μεταβλητές που ελέγχονται και επαναπροσδιορίζονται κατά τη διάρκεια της διαστασιολόγησης είναι η απόδοση, η πρώτη αρμονική της πυκνότητας μαγνητικής ροής στο διάκενο, B_p , και η πυκνότητα μαγνητικής ροής λίγο πάνω από την επιφάνεια του μαγνήτη, B_{mg} .

Στο [18] αναφέρεται πως όταν δεν ελέγχεται η απόδοση (μέσω υπολογισμού των απωλειών της διάταξης που προκύπτει), η μετρούμενη ισχύς στην έξοδο της γεννήτριας μπορεί να είναι πολύ μικρότερη από την προσδοκώμενη ισχύ, λόγω των πολύ μεγάλων απωλειών κυρίως στο τύλιγμα, ειδικά σε μεγαλύτερες ισχύεις (>5 kW). Αυτό συμβαίνει γιατί με δεδομένο το $E_{f,cutin}$, το κάτω όριο τάσης το οποίο επιβάλλεται από τις μπαταρίες (αντίστοιχα από τον αντιστροφέα για AC σύνδεση), η ονομαστική ΗΕΔ, $E_{f,nom}$ της γεννήτριας παραμένει σταθερή ανεξαρτήτως της ισχύος που διαστασιολογείται. Αυτό με τη σειρά του έχει σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη πολύ ισχυρών

ρευμάτων στις μεγαλύτερες ισχύεις (της τάξης των 8 A) και άρα οδηγεί σε μεγάλες απώλειες στο τύλιγμα.

Η απόδοση, λοιπόν, δίνεται σαν είσοδος στην αρχή της διαστασιολόγησης, και αφού χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστούν οι υπόλοιπες παράμετροι της διάταξης, υπολογίζεται ξανά από την παρακάτω σχέση (7.1):

$$n = \frac{P_{\eta\lambda}}{P_{\eta\lambda} + P_{cu} + P_{eddy} + P_{rot}} \quad (7.1)$$

Σε περίπτωση που υπάρχει απόκλιση μεταξύ της απόδοσης που έχει οριστεί στην αρχή της διαστασιολόγησης και της υπολογισμένης απόδοσης μετά τη σχεδίαση, τότε επαναλαμβάνεται η σχεδίαση με τη νέα τιμή για την απόδοση. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να συγκλίνουν οι δύο τιμές (αυτή που ορίζεται στην αρχή της διαστασιολόγησης και αυτή που μετράται στο τέλος από τον τύπο) ή μέχρι να γίνουν 15 επαναλήψεις. Αν τότε δεν υπάρχει σύγκλιση, η διάταξη απορρίπτεται.

Αντίστοιχα, οι τιμές για το B_p , το B_{mg} , το B_{max} και το B_{avg} δίνονται σαν είσοδοι στην αρχή της διαστασιολόγησης και αφού αυτή ολοκληρωθεί, σχεδιάζεται η διάταξη στο femm και μετρώνται εκεί οι τιμές αυτών των μεγεθών. Σε περίπτωση που υπάρχει απόκλιση στις τιμές που δόθηκαν ως είσοδοι για τα B_p και B_{mg} , και στις μετρούμενες, τότε οδηγούμαστε σε εκ νέου διαστασιολόγηση με αρχικές τιμές για τα B_p , B_{mg} , B_{max} και B_{avg} αυτές που μετρήθηκαν. Αν μετά από 15 επαναλήψεις δεν υπάρχει σύγκλιση, η διάταξη απορρίπτεται.

7.2.3. Εύρεση βέλτιστου μαγνήτη

Βελτιστοποιήθηκε η σχεδίαση της γεννήτριας για μαγνήτες νεοδυμίου N36, N40, N42 και N45. Σκοπός της βελτιστοποίησης ήταν η εύρεση των βέλτιστων διαστάσεων μαγνήτη για κάθε μια από τις γεννήτριες, με βάση το εκάστοτε κριτήριο.

Το πεδίο ορισμού για το w_m και το l_a , όπως είπαμε, είναι 20-100 mm. Οι παραπάνω μεταβλητές μεταβάλλονται με βήμα 10mm για τα κριτήρια απόδοσης και κόστους, και με βήμα 1mm για το συνδυαστικό κριτήριο, αφού καταλήξαμε ότι δίνει τα βέλτιστα αποτελέσματα.

Πιο αναλυτικά, αρχικά επιλέγεται ο πρώτος τύπος μαγνήτη και δίνονται επαναληπτικά οι τιμές των w_m και l_a , με βάση τις οποίες σχεδιάζεται κάθε φορά μια διαφορετική γεννήτρια. Όλες οι διατάξεις που σχεδιάζονται, πριν την επιλογή της βέλτιστης, ελέγχονται με βάση τους περιορισμούς που αναφέραμε παραπάνω και, αναλόγως, απορρίπτονται ή όχι.

Για όλες τις διατάξεις που δεν απορρίπτονται υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης:

$$Output = efficiency * 1000 - totalcost$$

Οι βέλτιστες διαστάσεις μαγνήτη για κάθε μέγεθος γεννήτριας είναι αυτές που ορίζουν τη διάταξη η οποία μεγιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση. Στον πίνακα 6.1 συγκρίνεται ο βέλτιστος μαγνήτης που βρέθηκε στην προσομοίωση και ο κοντινότερος σε διαστάσεις εμπορικός. Η διαφορά στην απόδοση και στο κόστος δεν είναι μεγάλη, οπότε επιλέξαμε το μαγνήτη N42 με διαστάσεις 30mm και 30mm στο ύψος και στο μήκος αντίστοιχα.

Μαγνήτης	w_m	l_a	Κόστος	Απόδοση
Εμπορικός	30mm	30mm	140,16	0,768
Βέλτιστος	32mm	24mm	132,52	0,766

Πίνακας 7.1 Βέλτιστες διατάξεις για τους διαφορετικούς τύπους μαγνήτη νεοδυμίου

Όπως διαπιστώνεται, η διαφορά του βέλτιστου μαγνήτη με τον κοντινότερο εμπορικό δεν είναι μεγάλη, οπότε επιλέχθηκε ο δεύτερος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8ο : ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

8.1. Σχεδιασμός υδροηλεκτρικού συστήματος

8.1.1. Διαστασιολόγηση αγωγού πτώσης

Για τη διαστασιολόγηση του αγωγού πτώσης ακολουθήθηκε η μέθοδος που παρουσιάζεται στο [3] και τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα κατά την έναρξη της διαδικασίας ήταν:

- το υλικό του σωλήνα: πολυαιθυλένιο (PE), λόγω του μικρού κόστους και της λείας εσωτερικής επιφάνειάς του
- το ύψος υδατόπτωσης: $H=11,25m$
- η παροχή νερού: $Q=5l/sec= 18m^3/sec$ και
- το μήκος του αγωγού: $L=38,5m$

Για την επαναληπτική διαδικασία της διαστασιολόγησης του αγωγού χρησιμοποιούνται δείγματα και διαστάσεις εμπορικών σωλήνων PE άδρευσης από την ιστοσελίδα της εταιρείας Karina. Έτσι, επιλέγεται αρχικά ένα σωλήνα με εξωτερική διάμετρο $D=90mm$, πάχος τοιχώματος $e=4,3mm$ και πίεση κανονικής λειτουργίας $6bar$. Επομένως, η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα είναι $d=81,4mm$. Η διαδικασία διαστασιολόγησής του ξεκινάει με προσδιορισμό του συντελεστή τριβής f του σωλήνα μέσω του διαγράμματος Moody, όταν θεωρείται συντελεστής τραχύτητας του σωλήνα PE ίσος με $k=0,001$. Τότε, $(k/d)=0,000126$ και $(1.2Q/d)=0,075758$. Άρα, προκύπτει ένας συντελεστής τριβής $f=0,02$.

Η ταχύτητα v με την οποία ρέει το νερό στο εσωτερικό του σωλήνα προκύπτει από τον παρακάτω τύπο:

$$v = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 5 \cdot 1000}{\pi \cdot 81,4^2} = 0,96m/sec$$

Οι υδραυλικές απώλειες $H_{\text{wall-loss}}$ λόγω τριβής των τοιχωμάτων υπολογίζονται μέσω του τύπου (2.19):

$$H_{\text{wallloss}} = \frac{fL_{\text{pipe}}0.08Q^2}{d^5} = \frac{0,02 \cdot 38,5 \cdot 0,08 \cdot \left(\frac{5}{1000}\right)^2}{\left(\frac{81,4}{1000}\right)^5} = 0,43 \text{ m}$$

Για τον υπολογισμό των υδραυλικών απωλειών λόγω $H_{\text{turb-loss}}$ οι τοπικές αντιστάσεις από τις οποίες διέρχεται το νερό είναι οι εξής: το στόμιο εισόδου του σωλήνα, 3 σημεία κάμψης σε γωνία 90° και δύο συρταρωτές βαλβίδες με συντελεστές απωλειών $k_{\text{entrance}} = 0,5$, $k_{\text{bend}} = 0,6$ και $k_{\text{valve}} = 0,1$ αντίστοιχα. Επίσης, θα υπάρχει και μία διακλάδωση του σωλήνα, όπου η ροή θα διαχωρίζεται σε δύο ίσα μέρη για να τροφοδοτήσει τα δύο αντιδιαμετρικά ακροφύσια του στροβίλου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η διακλάδωση έχει τη μορφή ενός ανάποδου T και η ροή συνεχίζεται συμμετρικά στους δύο τελικούς σωλήνες με αποτέλεσμα οι απώλειες διακλάδωσης να υπολογίζονται σύμφωνα με τον τύπο (8.1) με συντελεστή απωλειών $k_{\text{junction}} = 0,6$:

$$\delta h = k_{\text{junction}} \cdot \frac{v^2}{2g} = 0,6 \cdot \frac{0,96^2}{2 \cdot 9,81} = 0,028 \text{ m} \quad (8.1)$$

Άρα, το σύνολο των απωλειών λόγω στροβιλισμού είναι:

$$H_{\text{turbloss}} = \frac{v^2}{2g} \cdot k_{\text{turb}} + \delta h_{\text{junction}} = \frac{0,96^2}{2 \cdot 9,81} \cdot (0,5 + 3 \cdot 0,6 + 2 \cdot 0,1) + 0,028 \Rightarrow$$

$$H_{\text{turbloss}} = 0,146 \text{ m}$$

Στο σημείο αυτό, μπορεί να υπολογιστεί το σύνολο των απωλειών H_{loss} και το καθαρό ύψος υδατόπτωσης H_{net} :

$$H_{\text{net}} = H_{\text{gross}} - H_{\text{loss}} = H_{\text{gross}} - H_{\text{wallloss}} - H_{\text{turbloss}} = 11,25 - 0,43 - 0,16$$

$$\Rightarrow H_{\text{net}} = 10,67$$

Αυτό το ύψος υδατόπτωσης αντιστοιχεί σε πίεση:

$$P_{\text{net}} = 0,0981 \cdot H_{\text{net}} = 0,0981 \cdot 10,67 = 1,04 \text{ bar}$$

Άρα, το ποσοστό απωλειών που προκύπτει από τη χρήση του σωλήνα με εσωτερική διάμετρο $d = 81,4 \text{ mm}$ είναι $\frac{H_{\text{gross}} - H_{\text{net}}}{H_{\text{gross}}} 100\% = \frac{11,25 - 10,67}{11,25} 100\% = 5,12\%$

Στη συνέχεια, εκτιμάται η καταλληλότητα του πάχους των τοιχωμάτων του επιλεγμένου σωλήνα και προσδιορίζεται η πίεση που θα αναπτυχθεί στην περίπτωση εκδήλωσης υδραυλικού πλήγματος, αν και στη μελετούμενη περίπτωση αυτό είναι δυσκολότερο να συμβεί καθώς το νερό θα είναι πλήρως καθαρό και οι συρταρωτές βαλβίδες που θα χρησιμοποιηθούν έχουν μεγάλο χρόνο ανοίγματος και κλεισίματος.

Υπολογίζεται η ταχύτητα του μεταβατικού «κύματος» πίεσης a με χρήση του τύπου (2.21), όπου ο συντελεστής του Young για το PE είναι $E = 6 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$:

$$a = \frac{1400}{\sqrt{1 + \frac{2,1 \cdot 10^9 \cdot d}{E \cdot t}}} = \frac{1400}{\sqrt{1 + \frac{2,1 \cdot 10^9 \cdot 81,4}{6 \cdot 10^8 \cdot 4,3}}} = 170,712$$

Η αύξηση του μανομετρικού ύψους H_{surge} λόγω της αύξησης της πίεσης κατά την εκδήλωση του μεταβατικού φαινομένου υπολογίζεται από τον τύπο:

$$H_{\text{surge}} = \frac{av}{g} = \frac{170,712 \cdot 0,96}{9,81} = 16,73 \text{ m}$$

Άρα, το συνολικό μανομετρικό ύψος H_{total} και η πίεση P_{total} στον αγωγό λόγω υδραυλικού πλήγματος είναι:

$$H_{total} = H_{gross} + H_{surge} = 11,25 + 16,73 = 27,98\text{m}$$

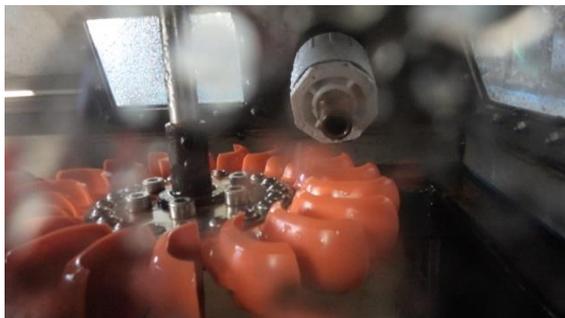
$$P_{total} = 0,0981H_{total} = 0,0981 \cdot 27,98 = 2,74\text{bar} \ll 6\text{bar}$$

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τον υπολογισμό των υδραυλικών απωλειών αλλά και από τον υπολογισμό της έντασης ενός υδραυλικού πλήγματος επιτρέπουν τη χρήση του συγκεκριμένου σωλήνα. Στο μικρό κομμάτι του αγωγού μετά τη διακλάδωση και μέχρι το ακροφύσιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σωλήνας μικρότερης διαμέτρου, καθώς μειώνεται κατά το ήμισυ η παροχή που θα διαρρέει τον κάθε έναν από τους δύο σωλήνες και επιπλέον το μήκος τους θα είναι πολύ μικρό.

Με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς για τις υδραυλικές απώλειες, προκύπτει η χαρακτηριστική $H - Q$ του συστήματος.

8.1.2. Διαστασιολόγηση υδροστροβίλου Turgo

Ο υδροστρόβιλος Turgo που χρησιμοποιήθηκε είναι κατασκευασμένος από τον Joseph Hartvigsen στη Αμερική και για τη διαστασιολόγηση του χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα αλλά και υπολογιστικά φύλλα (στο πρόγραμμα excel) που παρατίθενται στην ιστοσελίδα του κατασκευαστή <http://www.h-hydro.com/> [2]. Στόχος ήταν η εύρεση του κατάλληλου υδροστροβίλου Turgo (σε μέγεθος και αριθμό κουταλιών, καθώς και αριθμό και διατομή ακροφυσίων) ώστε με καθαρό ύψος υδατόπτωσης $H=10,67\text{m}$ και παροχή $Q=51/\text{sec}$ να μπορεί να κινεί μία σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών αξονικής ροής ονομαστικής ισχύος 350W και ονομαστικών στροφών 750rpm όταν αυτά τοποθετούνται στον ίδιο άξονα.



Σχήμα 8.1: Ο υδροστρόβιλος Turgo που χρησιμοποιήθηκε

Οι τύποι που χρησιμοποιούνται για τη διαστασιολόγηση του υδροστροβίλου Turgo του συγκεκριμένου κατασκευαστή ακολουθούν. Η ταχύτητα της δέσμης δίδεται από τον τύπο (8.2) :

$$v_{jet} = c_v \sqrt{2gH_{net}} \quad [\text{m/sec}] \quad (8.2)$$

όπου $c_v = 0,98$: ο συντελεστής ταχύτητας (coefficient of velocity) του ακροφυσίου
και $g=9,81 \text{ m/sec}^2$: η επιτάχυνση της βαρύτητας

Η περιφερειακή ταχύτητα v_{runner} του στροβίλου υπολογίζεται μέσω του λόγου ταχυτήτων $x=48,5\%$ (όπως δίδεται από τον κατασκευαστή) :

$$v_{runner} = x \cdot v_{jet} \quad [\text{m/sec}]$$

και η ταχύτητα περιστροφής του στροβίλου n_{runner} δίδεται από τον τύπο (8.3):

$$n_{runner} = \frac{60 \cdot 100 \cdot x \cdot v_{jet}}{\pi \cdot pcd} \quad [\text{rpm}]$$

όπου pcd [cm]

: η διάμετρος του δρομέα (όπως αυτή ορίζεται από τα κέντρα των σκαφιδίων) και εξαρτάται από τον αριθμό N_{sp} και το είδος των σκαφιδίων του στροβίλου (στο σχήμα 8.2 φαίνονται δύο από τους τύπους σκαφιδίων που μπορεί να χρησιμοποιηθούν), για παράδειγμα για τα πορτοκαλί σκαφίδια που χρησιμοποιήθηκαν στην περίπτωση αυτή, ο τύπος που δίνει τη διάμετρο του δρομέα είναι ο (8.4):

$$pcd = (0,242N_{sp} + 2) \cdot 2,54 \quad [\text{cm}] \quad (8.4)$$



Σχήμα 8.2: Ένα πορτοκαλί και ένα πράσινο σκαφίδιο (κάθε ένα από αυτά χρησιμοποιείται για διαφορετικό εύρος διαμέτρων δέσμης)

Η απαιτούμενη διατομή του ή των ακροφυσίων A_{nozzle} δίδεται σε σχέση με τη διαθέσιμη παροχή Q [l/sec] από τον τύπο (8.5):

$$A_{nozzle} = \frac{10 \cdot Q}{C_c \cdot v_{jet}} \quad [\text{cm}^2] \quad (8.5)$$

όπου $C_c=0,97$

: ο συντελεστής συστολής της δέσμης του ακροφυσίου όπως δίδεται από τον κατασκευαστή

Αν είναι γνωστός ο αριθμός των ακροφυσίων N_{nozzle} , η διάμετρος τους d_{nozzle} υπολογίζεται μέσω του τύπου (8.6) :

$$d_{nozzle} = 10 \cdot \sqrt{\frac{N_{nozzle} \cdot \pi}{4 \cdot A_{nozzle}}} \quad [\text{mm}] \quad (8.6)$$

Η παραγόμενη μηχανική ισχύς στην έξοδο του υδροστροβίλου δίδεται από τον τύπο (8.7) και η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας από τον τύπο (8.8), αν η_t και η_g είναι ο βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου και της γεννήτριας αντίστοιχα:

$$P_t = \frac{H \cdot Q \cdot \rho \cdot g \cdot n_t}{1000} \quad [\text{kW}] \quad (8.7)$$

$$P_e = \eta_g P_t \quad [\text{kW}] \quad (8.8)$$

όπου $\rho=0,98\text{kg/l}$

Μία εικόνα αυτού του υπολογιστικού φύλλου με τις τιμές που προκύπτουν για τη διαστασιολόγηση του υδροστροβίλου για την περίπτωση αυτή φαίνεται στο σχήμα 8.5. Τελικά, προκύπτει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας υδροστροβίλος Turgo ο οποίος θα έχει 20 πορτοκαλί σκαφίδια και διάμετρο $pcd=17,37\text{cm}$ και θα είναι εξοπλισμένος με δύο ακροφύσια με διάμετρο $d_{nozzle}=15,1\text{mm}$, τα οποία φαίνονται στα σχήματα 8.3 και 8.4.



Σχήμα 8.3: Ο χρησιμοποιούμενος υδροστρόβιλος Turgo

Σχήμα 8.4: Τα χρησιμοποιούμενα ακροφύσια

Τότε, με παροχή $Q=4,91/\text{sec}$ και αν θεωρηθεί απόδοση στροβίλου και γεννήτριας $\eta_t=78\%$ και $\eta_g=85\%$ αντίστοιχα, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς θα είναι $P_e=337\text{W}$. Επειδή, όμως, η απόδοση μίας γεννήτριας όμοιας με αυτή που θα χρησιμοποιηθεί στην εφαρμογή αυτή μπορεί να φθάσει και το 90%, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς μπορεί να φθάσει τα 350W (που είναι και η επιθυμητή ισχύς).

Head (m)	Vjet (m/s)	Runner V (m/s)	RPM	Flow (liter/sec)	Turbine Power (kW)	Electric Power (kW)	Head (ft)	Turbine (hp)	Flow (gpm)	Flow (CFS)	psi
10,5	14,1	6,8	750	4,9	0,4	0,332	34,4	0,52	77,3	0,17	14,9
10,4	14,0	6,8	746	4,9	0,4	0,327	34,1	0,5	76,9	0,17	14,8
10,3	13,9	6,8	743	4,8	0,4	0,323	33,8	0,5	76,5	0,17	14,6
10,2	13,9	6,7	739	4,8	0,4	0,318	33,5	0,5	76,2	0,17	14,5
10,1	13,8	6,7	736	4,8	0,4	0,313	33,1	0,5	75,8	0,17	14,3
10,0	13,7	6,7	732	4,8	0,4	0,309	32,8	0,5	75,4	0,17	14,2
9,9	13,7	6,6	728	4,7	0,4	0,304	32,5	0,5	75,0	0,17	14,1
9,8	13,6	6,6	725	4,7	0,4	0,300	32,2	0,5	74,7	0,17	13,9
9,7	13,5	6,6	721	4,7	0,3	0,295	31,8	0,5	74,3	0,17	13,8
9,6	13,4	6,5	717	4,7	0,3	0,290	31,5	0,5	73,9	0,16	13,6
9,5	13,4	6,5	713	4,6	0,3	0,286	31,2	0,5	73,5	0,16	13,5

Σχήμα 8.5: Υπολογιστικό φύλλο για τη διαστασιολόγηση του υδροστρόβιλου Turgo από την ιστοσελίδα του κατασκευαστή του

8.1.3. Σχεδίαση σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών αξονικής ροής

8.1.3.1. Σύνδεση της υδρογεννήτριας και ονομαστική λειτουργία

Ένας από τους σκοπούς αυτής της εργασίας είναι να μελετηθεί η τοπολογία με πυρήνα συγκριτικά με μία γεννήτρια χωρίς πυρήνα, που είχε κατασκευαστεί στα πλαίσια προηγούμενης διπλωματικής. Για αυτό το σκοπό κρίθηκε σκόπιμη η κατασκευή μίας γεννήτριας που θα έχει σχεδιαστεί για να αποδίδει ίδια ισχύ 350W.

Η σύνδεση της υδρογεννήτριας που μελετάμε θα είναι DC(σύνδεση στο DC ζυγό συσσωρευτών). Η έξοδος της γεννήτριας (AC) αρχικά διέρχεται από έναν μη ελεγχόμενο τριφασικό ανορθωτή διόδων ώστε να είναι εφικτή η σύνδεσή της στους συσσωρευτές. Στη συνέχεια ένας μονοφασικός αντιστροφέας πηγής τάσης μετατρέπει τη συνεχή τάση των συσσωρευτών σε εναλασσόμενη καθορίζοντας την τάση και τη συχνότητα λειτουργίας.

Ένας διπολικός διακόπτης τοποθετείται πριν τον ανορθωτή για να βραχυκυκλώνει τη γεννήτρια και να τη διατηρεί σταματημένη όταν χρειάζεται να γίνουν εργασίες στην εγκατάσταση [18].

Απαραίτητη για τη σύνδεση της υδρογεννήτριας στους συσσωρευτές είναι η ύπαρξη ενός ηλεκτρονικού ρυθμιστή φόρτισης. Η αποστολή του ρυθμιστή φόρτισης είναι η προστασία των συσσωρευτών και η αποδοτική λειτουργία τους. Όταν ο βαθμός φόρτισης των συσσωρευτών φτάνει κάτω από μία ορισμένη τιμή και υπάρχει ζήτηση ισχύος από τα φορτία, ο ρυθμιστής φόρτισης ανοίγει ένα διακόπτη και σταματά η παροχή ισχύος. Αντίστοιχα, όταν ο βαθμός φόρτισης των συσσωρευτών είναι υψηλός και η υδρογεννήτρια παράγει ισχύ, τροφοδοτείται με ισχύ ένα απορριπτικό φορτίο ώστε να αποφευχθεί υπερφόρτιση των συσσωρευτών. Το απορριπτικό φορτίο είναι μια ωμική αντίσταση η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση νερού.

Ανάλογα με την ποιότητα του ρυθμιστή φόρτισης, μπορούν να ακολουθηθούν αλγόριθμοι για τη φόρτιση και την εκφόρτιση των συσσωρευτών, ώστε να γίνει πιο αποδοτική η λειτουργία τους και να αυξηθεί η διάρκεια ζωής τους. Συνήθως ο ανορθωτής με το ρυθμιστή φόρτισης και το απορριπτικό φορτίο είναι ενσωματωμένα σε μία συσκευή.

Όσον αφορά τον τρόπο σύνδεσης της υδρογεννήτριας στους συσσωρευτές, μπορεί να γίνει είτε απευθείας είτε παρεμβάλλοντας σύστημα μεγιστοποίησης της ισχύος (MPPT). Ένα σύστημα MPPT εξασφαλίζει μέγιστη παραγωγή ισχύος, αλλά στην περίπτωση των υδροηλεκτρικών δεν είναι τόσο αποδοτικό διότι η γεννήτρια λειτουργεί σε σταθερές στροφές. Επίσης, είναι ακριβό οπότε δε χρησιμοποιείται σε εφαρμογές χαμηλού κόστους.

Για τη σχεδίαση των δύο γεννητριών αξονικής ροής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος που αναφέρεται στο [32]. Έχουν επιλεγεί δύο τοπολογίες σύγχρονων γεννητριών. Η μία είναι με διπλό δρομέα που φέρει μαγνήτες και η δεύτερη με μονό δρομέα ενώ και οι δύο έχουν στάτη με πυρήνα σκόνης σιδήρου. Η γεννήτρια αυτή έχει δώδεκα πόλους και ονομαστική ταχύτητα περιστροφής $n=750\text{rpm}$ για ηλεκτρική συχνότητα 75Hz και σχεδιάζεται για να δίνει ονομαστική ισχύ 350W στα 58Vdc (μπαταρία 48V) τάση, αντιστοιχία που προκύπτει από τη τάση των συσσωρευτών που θα χρησιμοποιηθούν.

Οι τιμές που χρησιμοποιούνται ως δεδομένα κατά τη σχεδίαση της γεννήτριας είναι η πυκνότητα ροής $B=0,44\text{T}$, η συνολική επιφάνεια των μαγνητών $A=0,09\text{m}^2$, οι διαστάσεις του μαγνήτη: 30 x 30mm, η διάμετρος του δρομέα της γεννήτριας 220mm, το αξονικό πάχος του πηνίου $t_w=14\text{mm}$, το πάχος πλευράς πηνίου $w_c=11\text{mm}$ και η διατομή του πηνίου 154mm².

Η τερματική τάση V_{ac} της γεννήτριας συνδέεται με την τάση των συσσωρευτών(dc) σύμφωνα με τη σχέση (8.9):

$$V_{ac} = \frac{V_{dc}}{\sqrt{3} \cdot 1,35} \cdot efficiency \quad (8.9)$$

που ισχύει για μη ελεγχόμενη τριφασική ανόρθωση [18] (αφού η τάση της γεννήτριας πρώτα ανορθώνεται και μετά φτάνει στις μπαταρίες).

Η ΗΕΔ, E_i , της γεννήτριας είναι ανάλογη με την ταχύτητα περιστροφής της. Όταν η γεννήτρια είναι ανοιχτοκυκλωμένη (από μηδενικές στροφές μέχρι cut-in), η ανορθωμένη ΗΕΔ της είναι μικρότερη από την τάση της μπαταρίας και δεν περνάει ρεύμα στη μπαταρία. Οπότε, η ΗΕΔ είναι ίση με την τερματική τάση της γεννήτριας. Ακριβώς πριν μπει η γεννήτρια στο σύστημα θα ισχύει: $E_{f,cutin} = V_{t,cutin}$.

Άρα για μπαταρίες 48V, η ΗΕΔ για να μπει η γεννήτρια στο σύστημα θα είναι:

$$E_{f,cutin} = V_{t,cutin} = \frac{V_{batt}}{\sqrt{3} \cdot 1,35} = \frac{48}{\sqrt{3} \cdot 1,35} = 20.53V$$

8.1.3.2. Αριθμός πόλων - πηνίων, συχνότητα λειτουργίας

Σε μια σύγχρονη γεννήτρια ισχύει η σχέση:

$$n_{nom} = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (8.10)$$

όπου p ο αριθμός των πόλων και f η συχνότητα λειτουργίας σε Hz.

Από τη σχέση αυτή υπολογίζονται κάθε φορά οι πόλοι της γεννήτριας έχοντας δεδομένα την ονομαστική συχνότητα λειτουργίας και τις ονομαστικές στροφές, αλλά και λαμβάνοντας υπόψη τα εξής:

Προκειμένου να προκύψει ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα (διαφορά 120° μεταξύ των τριών φάσεων) ο αριθμός των πόλων p πρέπει να είναι διαφορετικός από τον αριθμό των πηνίων Q . Οι πόλοι πρέπει να είναι ζυγός αριθμός και κάθε πόλος αντιστοιχεί σε δύο μαγνήτες (έναν σε κάθε δίσκο του δρομέα) ενώ τα πηνία πρέπει να διαιρούνται με το 3 καθώς η γεννήτρια έχει 3 φάσεις. Μετά από διαδικασία βελτιστοποίησης [19] βρέθηκε ότι ο αριθμός των πόλων και των πηνίων πρέπει προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η ροπή να τηρεί την εξής σχέση:

$$\frac{2Q}{3p} = 0.5 \quad (8.11)$$

Με λίγα λόγια πρέπει ο αριθμός των πόλων να διαιρείται με το 4 και ο αριθμός των πηνίων με το 3. Έχοντας υπολογίσει δηλαδή τον αριθμό των πόλων, από αυτή τη σχέση υπολογίζουμε τον αριθμό των πηνίων. Προκύπτουν έτσι οι εξής συνδυασμοί πόλων-πηνίων:
8 – 6, 12 – 9, 16 – 12, 20 – 15, 24 – 18, 28 – 21, 32 – 24

Οπότε, για τη γεννήτρια για λειτουργία στα 75Hz θα ισχύει:

$$p = \frac{120 f_{nom}}{n_{nom}} = 12 \text{ πόλοι}$$

8.1.3.3. Ο στάτης και τα πηνία

8.1.3.3.1 Το πάχος του στάτη

Το πάχος του στάτη αντιπροσωπεύεται από το αξονικό πάχος των πηνίων t_w . Με βάση την ανάλυση στο κεφάλαιο 4 αυτό υπολογίζεται από τη σχέση(4:16):

$$t_w = \frac{2}{B_{max}} \left\{ \frac{h_m}{\mu_{rrec}} (B_r - B_{mg}) - B_{mg} g \right\}$$

Οι μεταβλητές που εμφανίζονται σε αυτή τη σχέση είναι οι εξής:

- Το διάκενο της γεννήτριας g , το οποίο επιλέγεται ίσο με 3mm. Είναι μια αρκετά μεγάλη τιμή για το διάκενο, αλλά επιλέγεται έτσι για κατασκευαστικούς λόγους και προκειμένου να υπάρχει αρκετό φυσικό κενό μεταξύ των τριών δίσκων της γεννήτριας ώστε να μη δημιουργούνται προβλήματα.
- Το πάχος των μαγνητών h_m , το οποίο, όπως θα δούμε, επιλέχθηκε ίσο με 5mm.
- Η παραμένουσα μαγνήτιση $B_{r,N42}=1.294$
- Η μέγιστη τιμή της πυκνότητας μαγνητικής ροής στο διάκενο B_{max} θεωρείται γενικά λίγο μικρότερη από την αντίστοιχη τιμή στην επιφάνεια του μαγνήτη B_{mg} , η οποία, όπως αναφέραμε στη θεωρητική ανάλυση, μπορούμε να υποθέσουμε ότι είναι ίση με $B_r/2$. Επειδή όμως τα δύο αυτά μεγέθη είναι δύσκολο να υπολογιστούν με καλή ακρίβεια από θεωρητικές σχέσεις, τους δίνουμε μια προσεγγιστική τιμή στην αρχή της διαστασιολόγησης και αφού σχεδιαστεί η διάταξη μετράται η τιμή τους στο FEMM. Σε περίπτωση που η διαφορά της αρχικής από τη μετρούμενη τιμή είναι μεγαλύτερη από μια τιμή που έχουμε ορίσει, η διαστασιολόγηση επαναλαμβάνεται με αρχική τιμή τη μετρούμενη της προηγούμενης διάταξης μέχρι να συγκλίνουν οι δύο τιμές. Η διαδικασία αυτή του ελέγχου κάποιων μεταβλητών περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο της βελτιστοποίησης.
- Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα μ_{rec} υπολογίζεται στο κεφάλαιο 4.

Για τη γεννήτρια που μελετάμε προέκυψε από την προσομοίωση $t_w=14\text{mm}$.

8.1.3.3.2. Σπείρες και πάχος πηνίου

Τα ελίγματα των πηνίων μπορούν να υπολογιστούν με έναν απλοποιημένο τρόπο χρησιμοποιώντας βασικές ηλεκτρομαγνητικές εξισώσεις και θεωρώντας την πυκνότητα της μαγνητικής ροής B σχεδόν ημιτονοειδή [18]. Αρχικά υπολογίζεται η μέγιστη τιμή της μαγνητικής ροής ανά πόλο, Φ_{max} :

$$\Phi_{max} = B_{mg} \cdot w_m \cdot l_a \quad (8.12)$$

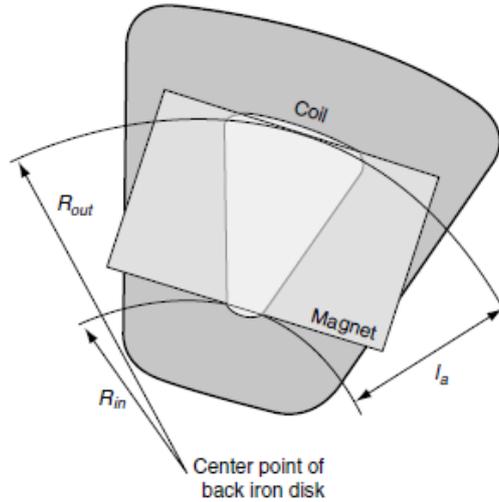
όπου w_m το πλάτος του μαγνήτη και l_a το μήκος του μαγνήτη, καθώς και το ενεργό μήκος της γεννήτριας, όπως φαίνεται στο σχήμα 8.7.

Τα ελίγματα ανά πηνίο υπολογίζονται στη συνέχεια με την παρακάτω σχέση:

$$N_c = \frac{\sqrt{2} \cdot E_{f, cutin}}{q \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot k_w \cdot \Phi_{\text{ολ}} \cdot n \cdot \left(\frac{p}{120}\right)} \approx 67 \quad (8.13)$$

όπου k_w ο συντελεστής τυλίγματος και $q=Q/3$, ο αριθμός των πηνίων ανά φάση (για τριφασική γεννήτρια).

Ο συντελεστής k_w δεν πρέπει να συγχέεται με τους άλλους συντελεστές που έχουμε ορίσει στην ανάλυση του τυλίγματος για την εύρεση της ροπής. Είναι και αυτός ένας συντελεστής τυλίγματος (συντελεστής χρησιμοποίησης τυλίγματος) και ισούται με 0.95.



Σχήμα 8.6: Εσωτερική και εξωτερική ακτίνα και ενεργό μήκος της γεννήτριας

Για την εύρεση του πάχους πλευράς πηνίου w_c χρειάζεται πρώτα να υπολογιστεί το μέγιστο ρεύμα που προβλέπουμε να περάσει από τα τυλίγματα της γεννήτριας. Έτσι, το μέγιστο ρεύμα είναι:

$$I_{amax} = \frac{1.1P_{nom}}{3E_{f,nom}n} \quad (8.14)$$

και το ονομαστικό ρεύμα:

$$I_{anom} = \frac{P_{nom}}{3E_{f,nom}n} \quad (8.15)$$

Όπου μιλάμε και στις δύο περιπτώσεις για ac ρεύμα πριν τον ανορθωτή.

Τώρα μπορεί να υπολογιστεί θεωρητικά το πάχος πλευράς πηνίου:

$$w_{c,theor} = \frac{I_{a,max} \cdot N_c}{\sqrt{\frac{2 \cdot c_q \cdot k_f \cdot t_w}{\rho}}} \quad (8.16)$$

Όπου c_q θερμικός συντελεστής με μέγιστη τιμή το 0.3 W/cm^2 και $k_f = 0.55$ ο συντελεστής πλήρωσης του πηνίου, ο οποίος αναλύεται στην επόμενη παράγραφο.

Στη συνέχεια υπολογίζουμε θεωρητικά το εμβαδόν διατομής μιας σπείρας του πηνίου από την παρακάτω σχέση:

$$s_{c,theor} = k_f \cdot w_c \cdot t_w / N_c \quad (8.17)$$

Ως πραγματική τιμή του sc , όμως, θεωρούμε την αμέσως μεγαλύτερη τιμή που υπάρχει διαθέσιμη στο εμπόριο. Με βάση αυτή επιλέγεται και η αντίστοιχη διάμετρος χαλκού που θα χρησιμοποιηθεί, σύμφωνα με τη σχέση:

$$dc = \sqrt{\left(\frac{4sc}{\pi}\right)} \quad (8.18)$$

Με τη νέα τιμή για το εμβαδόν διατομής μιας σπείρας του πηνίου και εκτελώντας την ίδια διαδικασία προς τα πίσω βρίσκουμε τις πραγματική τιμή για το πάχος πλευράς πηνίου w_c :

$$w_c = \frac{sc \cdot N_c}{k_f \cdot t_w}$$

Η μέγιστη πυκνότητα ρεύματος που μπορεί να υποστεί το τύλιγμα υπολογίζεται τώρα:

$$J_{max} = \frac{I_{a,max}}{sc}$$

η οποία δε θέλουμε να είναι πολύ μεγαλύτερη από τα 6 A/mm².

8.1.3.3.3. Ο συντελεστής πλήρωσης του πηνίου

Ο συντελεστής πλήρωσης των πηνίων k_f εκφράζει τη δυνατότητα να γεμίσει η ιδεατή αύλακα με χαλκό. Η μέγιστη τιμή του για αγωγούς με κυκλική διατομή προκύπτει εύκολα από τη γεωμετρία:

$$k_{fmax} = \frac{sc}{S_{αύλακας}} = \frac{\pi R^2}{4R^2} = \frac{\pi}{4} = 0,785$$

Στην πραγματικότητα, όμως, επειδή τα πηνία τυλίγονται με το χέρι, η τιμή του συντελεστή πλήρωσης είναι μικρότερη και εξαρτάται από το σχήμα του πηνίου, τον αριθμό των ελιγμάτων και τη διατομή του χαλκού.

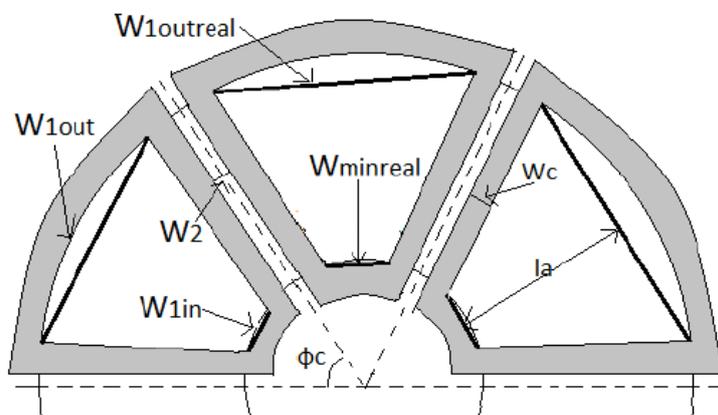
Με βάση μελέτη που έγινε σε πηνία που κατασκευάστηκαν στο χέρι [5], επιλέξαμε $k_f=0.55$ ως μία κατάλληλη τιμή. Μία εσφαλμένη εκτίμηση του συντελεστή πλήρωσης θα μπορούσε να προκαλέσει κατασκευαστικό πρόβλημα, κυρίως στην περίπτωση που αυτός προέκυπτε μικρότερος από όσο είχαμε αρχικά υπολογίσει, γιατί τότε τα πηνία δε θα χωρούσαν στο καλούπι του στάτη. Αν προέκυπτε μεγαλύτερος από την αρχική εκτίμηση, τότε θα υπήρχε κενό ανάμεσα στα πηνία, αλλά αυτό δε θα προκαλούσε τόσο σοβαρό πρόβλημα. Θα σήμαινε, βέβαια, κακή αξιοποίηση του όγκου της γεννήτριας καθώς και δυσκολία στη συμμετρική διάταξη των πηνίων στο καλούπι του στάτη, αφού οι εφραπτόμενες πλευρές των πηνίων είναι ένας χρήσιμος οδηγός για την ευθυγράμμισή τους. Για αυτούς τους λόγους πρέπει τα πηνία να κατασκευάζονται πριν

ολοκληρωθεί η φάση της διαστασιολόγησης, ώστε να μετράται ο συντελεστής πλήρωσής τους. Αν ο μετρούμενος συντελεστής είναι κοντά στον εκτιμώμενο, τότε η σχεδίαση μπορεί να υλοποιηθεί. Διαφορετικά, πρέπει να διαξαχθεί ξανά η διαδικασία σχεδίασης [18].

8.1.3.3.4. Κατασκευαστικές διαστάσεις πηνίου

Στην παράγραφο αυτή δίνονται οι σχέσεις για τον υπολογισμό των λοιπών διαστάσεων του πηνίου που θα χρειαστούν τόσο για την προσομοίωση της γεννήτριας όσο και για την κατασκευή των πηνίων.

Η ενεργός επιφάνεια του πηνίου θα έχει σχήμα τραπέζιο. Το μήκος του πηνίου θα είναι ίσο με το ενεργό μήκος της γεννήτριας l_a . Οι υπόλοιπες διαστάσεις, οι οποίες εικονίζονται και στο σχήμα, βρίσκονται ως εξής:



Σχήμα 8.7: Οι πραγματικές και θεωρητικές διαστάσεις των πηνίων.

Θεωρούμε ότι τα πηνία, τα οποία πρέπει να εφάπτονται μεταξύ τους, έχουν μια ελάχιστη απόσταση της τάξης του $w_2 = 0.5mm$, προκειμένου να διευκολύνουμε την προσομοίωση. Την απόσταση μεταξύ των δύο πλευρών του πηνίου την ονομάζουμε w_1 και την υπολογίζουμε στη μέση, εξωτερική και εσωτερική ακτίνα αντίστοιχα:

$$w_1 = \frac{2\pi r}{Q} - 2w_c - w_2 \quad (8.19)$$

όπου στο r τίθεται η επιθυμητή ακτίνα. Αυτή είναι η διάσταση της προσομοίωσης.

Για την κατασκευή των πηνίων οι απαιτούμενες διαστάσεις είναι το ενεργό μήκος, το

πάχος πλευράς και το $w_{1,in}^{real}$ και $w_{2,out}^{real}$, τα οποία λόγω της ιδιομορφίας της κατασκευής υπολογίζονται:

$$w_{1,in}^{real} = 2r \sin \varphi_c \quad (8.20)$$

Όπου

$$\varphi_c = \frac{2\pi w_1}{Q(w_1 + 2w_c + w_2)} \quad (8.21)$$

Έτσι τελειώνει η διαστασιολόγηση του τυλίγματος, καθώς τώρα όλα τα μεγέθη είναι γνωστά. Μία τελευταία παρατήρηση θα γίνει μόνο σχετικά με το σχήμα των πηνίων: στο [5] γίνεται μια διαφορετική διαστασιολόγηση του πηνίου που σαν βάση της έχει να ταυριάζει ο μαγνήτης ακριβώς στην ενεργό επιφάνεια του πηνίου. Αυτή είναι μία καλή και συνήθης τακτική, που χρησιμοποιείται προκειμένου να βελτιώσει την κυματομορφή της τάσης, όταν δε λαμβάνονται υπόψιν άλλες σχεδιαστικές παράμετροι, όπως το α_i και το k_j . Σε περίπτωση που το α_i είναι πολύ διαφορετικό από την τιμή $2/\pi$ που προσφέρει ημιτονοειδή τάση αυτή η τακτική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διορθώσει λίγο την κυματομορφή.

Όστόσο κάτι τέτοιο δεν είναι πάντα εφικτό δεδομένου ενός συγκεντρωμένου τυλίγματος διπλής στρώσης. Αλλαγή του τυλίγματος και απομάκρυνση από τους συντελεστές που έχουν υπολογιστεί μπορεί να επιτρέψει κάτι τέτοιο, με την επίπτωση όμως της μείωσης της ισχύος διατηρουμένης της ακτίνας ή της αύξησης της ακτίνας (και άρα του βάρους και του κόστους) διατηρουμένης της ισχύος [5].

Άλλωστε, επειδή συχνά αναφερόμαστε στην ποιότητα των κυματομορφών εξόδου της γεννήτριας, αξίζει να αναφερθεί το εξής. Όταν συνδέουμε την έξοδο της γεννήτριας σε μια μη ελεγχόμενη ανόρθωση διόδων, αναπόφευκτα παραμορφώνονται οι κυματομορφές της και αυξάνεται το αρμονικό τους περιεχόμενο, οπότε η επίτευξη μιας ημιτονοειδούς τάσης στην έξοδο της γεννήτριας δεν έχει τελικά τόση σημασία για τις επιδόσεις του συστήματος [18].

8.1.3.4. Οι μαγνήτες

8.1.3.4.1 Το σχήμα του μαγνήτη

Έχουν μελετηθεί μηχανές αξονικής ροής με διάφορα σχήματα μαγνητών. Τρία βασικά που συναντώνται στη βιβλιογραφία είναι οι δισκοειδείς μαγνήτες, οι ορθογώνιοι και οι τραπεζοειδείς. Μετά από σύγκριση που έγινε μεταξύ ορθογώνιων και τραπεζοειδών μαγνητών στο [5], επιλέχθηκαν τελικά οι ορθογώνιοι τους οποίους θα χρησιμοποιήσουμε και εμείς.

Οι ορθογώνιοι μαγνήτες, καθότι πιο δημοφιλείς, μπορούν να βρεθούν πιο εύκολα έτοιμοι στο εμπόριο σε μεγάλο εύρος διαστάσεων και καλύτερες τιμές. Αλλά και στην περίπτωση που θα χρειαστεί ο κατασκευαστής να παραγγείλει μαγνήτες που δεν υπάρχουν ήδη στο εμπόριο, οι ορθογώνιοι θα είναι πιο φθηνοί λόγω της ευκολότερης κατασκευής τους. Τα χαρακτηριστικά τους αυτά τους καθιστούν κατάλληλους για τους σκοπούς της εργασίας μας και γενικά για εφαρμογές χαμηλού κόστους.

8.1.3.4.2. Το πάχος του μαγνήτη

Το πάχος h_m του μαγνήτη είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει αρκετά τη σχεδίαση:

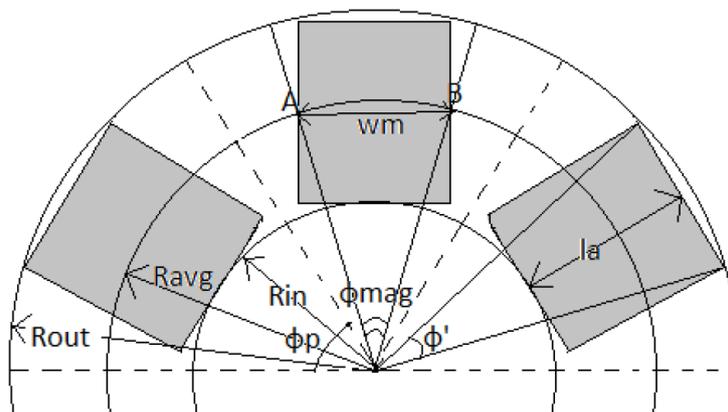
- επηρεάζει το πάχος του σιδήρου που συγκρατεί τους μαγνήτες. Αν πρόκειται για μαγνήτες νεοδυμίου, το πάχος του σιδήρου πρέπει να είναι περίπου ίσο με το πάχος του μαγνήτη για να μην υπάρχει μαγνητικός κορεσμός στο σίδηρο [5]. Για τις γεννήτριες με μαγνήτες νεοδυμίου επιλέξαμε $h_r=10\text{mm}$ και $h_m=5\text{mm}$.
- επηρεάζει την κατανομή του πεδίου στο διάκενο, δηλαδή την πρώτη αρμονική της πυκνότητας μαγνητικής ροής, B_p .
- επηρεάζει το αξονικό πάχος t_w των πηνίων. Αν αυξήσουμε το πάχος του μαγνήτη διατηρώντας τα πεδία στη γεννήτρια ίδια, ώστε οι μαγνήτες να λειτουργούν στο σημείο μέγιστης ενέργειας, θα πρέπει οι μαγνήτες να απομακρυνθούν μεταξύ τους, άρα να αυξηθεί το αξονικό πάχος των πηνίων [5]. Αντίθετα, μειώνοντας πολύ το πάχος μαγνήτη μπορεί να οδηγηθούμε σε πολύ λεπτά πηνία τα οποία θα είναι δύσκολο να κατασκευαστούν στο χέρι. Η κατασκευασσιμότητα των πηνίων μετράται μέσω του λόγου $\frac{t_w}{w_c}$. Σε αυτή την εργασία ο λόγος αυτός έχει ως μέγιστη τιμή το 0.35, δηλαδή για μεγαλύτερες τιμές τα πηνία δεν είναι αποδεκτά.

Λαμβάνοντας αυτά υπόψιν, αλλά και σχετικά αυθαίρετα, αποφασίζουμε το πάχος μαγνήτη πριν από τη διαστασιολόγηση και το διατηρούμε σταθερό ανεξαρτήτως της ισχύος της γεννήτριας.

8.1.3.4.3. Το πλάτος και το μήκος του μαγνήτη

Το πλάτος w_m και το μήκος l_a του μαγνήτη είναι δύο από τις πιο σημαντικές παραμέτρους της διαστασιολόγησης, και με δεδομένο το πάχος h_m , καθορίζουν πλήρως το μαγνήτη που επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί κάθε φορά.

Το μήκος του μαγνήτη l_a είναι ίσο με το ενεργό μήκος της γεννήτριας, που είναι σχεδόν ίσο με $R_{out}-R_{in}$. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 8.8, το μήκος του μαγνήτη δε συμπίπτει ακριβώς με τη διαφορά εξωτερικής και εσωτερικής ακτίνας -ένα μικρό κομμάτι της απόστασης $R_{out}-R_{in}$ «περισεύει» πάνω από το μαγνήτη. Στην περίπτωση, όμως, μεγάλης μηχανής με πολλούς πόλους, η διαφορά αυτή είναι μικρή και μπορεί να αγνοηθεί.



Σχήμα 8.8: Η γεωμετρία του μαγνήτη

Όπως είπαμε, το πλάτος και το μήκος μαγνήτη είναι οι δύο μεταβλητές βελτιστοποίησης, οπότε η τιμή τους δεν υπολογίζεται από κάποια σχέση ως προς άλλες μεταβλητές, αλλά εισάγεται από το σχεδιαστή,

Για τη γεννήτρια που κατασκευάσαμε οι τιμές που επιλέχθηκαν για το πλάτος και το μήκος μαγνήτη, μετά από βελτιστοποίηση και έρευνα ως προς τους διαθέσιμους μαγνήτες στην αγορά, ήταν $w_m = l_a = 30mm$.

8.1.3.5. Εσωτερική και εξωτερική ακτίνα

Έχοντας υπολογίσει τις απαραίτητες μεταβλητές στις προηγούμενες παραγράφους μπορούμε τώρα να υπολογίσουμε την εσωτερική και εξωτερική ακτίνα της γεννήτριας [33]:

$$R_{in} = \frac{2Q \cdot w_c + Q \cdot w_m}{2\pi} \quad (8.22)$$

$$R_{out} = R_{in} + l_a \quad (8.23)$$

Υπολογίζουμε και τη μέση ακτίνα R_{avg} , η οποία χρησιμοποιείται στην προσομοίωση της γεννήτριας:

$$R_{avg} = \frac{R_{in} + R_{out}}{2} \quad (8.24)$$

Κατά τη σχεδίαση μίας γεννήτριας που πρόκειται να κατασκευαστεί τοπικά με χαμηλό κόστος και απλές διαδικασίες, θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν και ένας παράγοντας σχετικά με την εξωτερική ακτίνα της γεννήτριας, που είναι και η εξωτερική ακτίνα των δίσκων του δρομέα. Όσο μεγαλώνει η εξωτερική ακτίνα, οι απλές και φθηνές μέθοδοι κοπής των χαλύβδινων δίσκων οδηγούν σε ανομοιόμορφα κομμένους δίσκους. Στο [33] αναφέρεται το παράδειγμα μίας γεννήτριας με εξωτερική ακτίνα δίσκων δρομέα 240mm και πάχος 10mm, όπου διαπιστώθηκε ότι οι δίσκοι δεν ήταν τελείως επίπεδοι, αλλά λίγο κυρτοί, με αποτέλεσμα να μην είναι εντελώς παράλληλοι μεταξύ τους. Αυτό είχε ως συνέπεια την αναποτελεσματική ρύθμιση του μηχανικού διακένου και άρα χαμηλότερη ονομαστική ισχύ από την αναμενόμενη. Η αιτία ήταν ότι για να μειωθεί το κόστος κατασκευής, χρησιμοποιήθηκε για την κοπή των δίσκων ένας παντογράφος πλάσμα, αντί κάποιας πιο σύνθετης και ακριβής μηχανής, όπως θα ήταν ένας τόρνος.

Ένας ακόμη περιορισμός που πρέπει να ληφθεί υπόψιν για την εξωτερική ακτίνα είναι ότι οι δίσκοι του δρομέα θα πρέπει να χωράνε στο επιτραπέζιο δράπανο του εργαστηρίου. Το επιτραπέζιο δράπανο είναι ένα συνηθισμένο εργαλείο και χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές χαμηλού κόστους για να ανοίξει τρύπες στους δίσκους του δρομέα, από τις οποίες θα περάσουν οι ντίζες που θα αποτελέσουν και τον άξονα της γεννήτριας. Αν οι δίσκοι είναι πολύ μεγάλοι και δε χωράνε στο επιτραπέζιο δράπανο, οι τρύπες θα πρέπει να ανοιχθούν με τρυπάνι χειρός, με συνέπεια την αύξηση και του χρόνου κατασκευής αλλά και της πιθανότητας κακής ευθυγράμμισης, εξαιτίας δυσκολιών στο κεντράρισμα του ρουλεμάν στους δίσκους [33].

Οι τιμές που υπολογίστηκαν για την εσωτερική και εξωτερική ακτίνα αντίστοιχα είναι $R_{in} = 79mm, R_{out} = 110mm$.

8.1.3.6. Οι λόγοι a_i και k_d

Από τη γεωμετρία της γεννήτριας, και με δεδομένες τις διαστάσεις w_m και l_a του μαγνήτη, καθώς και την εσωτερική, εξωτερική και μέση ακτίνα της γεννήτριας, μπορούμε να υπολογίσουμε τους λόγους a_i και k_d , οι οποίοι θα χρειαστούν στη συνέχεια της διαστασιολόγησης.

Όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 4, για το λόγο πλάτους μαγνήτη προς πλάτος πολικού βήματος ισχύει:

$$a_i = \frac{\text{πλάτος μαγνήτη}}{\text{πλάτος πολικού βήματος}} = \frac{w_m}{\tau_p}$$

Το οποίο συνεπάγεται:

$$a_i = \frac{w_m \cdot p}{2\pi R_{avg}} \quad (8.25)$$

Με δεδομένη την ακτίνα, η χρήση μεγαλύτερου σε πλάτος μαγνήτη, οδηγεί σε αύξηση του a_i οπότε και αύξηση της ισχύος. Σε περίπτωση που έχουμε δεδομένη την ισχύ, μεγαλύτερες τιμές του a_i θα οδηγήσουν σε μικρότερο όγκο. Επίσης, μεγάλες τιμές του a_i , δηλαδή περισσότερο μαγνητικό υλικό, θα οδηγήσουν σε μεγαλύτερες ελκτικές δυνάμεις μεταξύ των δίσκων του δρομέα, και άρα, σίδηρο μεγαλύτερου πάχους και πιο βαριά κατασκευή.

Στο κεφάλαιο 4 συναντήσαμε και το λόγο εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα k_d :

$$k_d = \frac{R_{in}}{R_{out}}$$

Στη βιβλιογραφία συναντάται συχνά η τιμή $1/\sqrt{3}$ σαν βέλτιστη για μέγιστη ροπή [20], αλλά είναι μια μικρή τιμή για εφαρμογές χαμηλού κόστους. Ο συντελεστής k_d σχετίζεται άμεσα με το σχήμα του μαγνήτη και συγκεκριμένα με το ενεργό του μήκος. Μικρές τιμές του k_d οδηγούν σε μαγνήτες μεγάλου ενεργού μήκους και άρα μεγάλης επιφάνειας. Αυτό σημαίνει αφενός μεγάλο κόστος, αφετέρου μεγάλες ελκτικές δυνάμεις μεταξύ των δίσκων του δρομέα, δηλαδή -όπως είπαμε- σίδηρο μεγάλου πάχους και βαριά κατασκευή. Η γεννήτρια όμως θα έχει καλύτερη απόδοση, ροπή και μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος, καθώς θα είναι πιθανότατα μικρότερη σε όγκο. Γενικά, πάντως, σε εφαρμογές χαμηλού κόστους, όπως η δική μας, το k_d τείνει να παίρνει όσο το δυνατόν μεγαλύτερες τιμές [18].

Οι τιμές που υπολογίστηκαν για τους λόγους a_i και k_d είναι $a_i = 0.6$ και $k_d = 0.72$.

8.1.3.7. Το πάχος του σιδήρου του μεταλλικού δίσκου

Το πάχος του σιδήρου, h_r , είναι πολύπλοκο να υπολογιστεί από θεωρητικές εξισώσεις και έχει μελετηθεί στη βιβλιογραφία μόνο με μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων [33].

Είναι μια πολύ σημαντική μεταβλητή της γεννήτριας, καθώς καθορίζει άμεσα το βάρος της και συμβάλλει έντονα στη μηχανική της αντοχή. Και οι δύο δίσκοι του δρομέα είναι κατασκευασμένοι από σίδηρο πάνω στον οποίο τοποθετούνται οι μαγνήτες περιμετρικά. Οι μαγνήτες, όπως έχει ειπωθεί, είναι σε διάταξη N-S-N-S, κάθε μαγνήτης δηλαδή έχει απέναντί του μαγνήτη της αντίθετης πολικότητας, με αποτέλεσμα να ασκούνται ελκτικές δυνάμεις μεταξύ των δύο δίσκων. Η δύναμη αυτή υπολογίζεται [20]:

$$F_z = \frac{B_{mg}^2}{2\mu_0} S_{PM} \quad (8.26)$$

όπου S_{PM} η ενεργός επιφάνεια των μαγνητών:

$$S_{PM} = a_i \pi (R_{out}^2 - R_{in}^2) \quad (8.27)$$

Παρατηρούμε ότι η ελκτική δύναμη εξαρτάται από το βαθμό του μαγνήτη (B_{mg}), από τις διαστάσεις της γεννήτριας και από το a_i .

Γενικά, η απόφαση για το πάχος του σιδήρου είναι σημαντική και πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν δύο κριτήρια:

Το πρώτο είναι να εξασφαλιστεί η μηχανική αντοχή της γεννήτριας, δηλαδή να μη λυγίσουν οι δίσκοι υπό τις ελκτικές δυνάμεις των μαγνητών. Ένας τρόπος να μειωθούν αυτές οι ελκτικές δυνάμεις είναι να επιλεγθεί ένας χαμηλός λόγος a_i και ένας υψηλός λόγος k_d κατά τη σχεδίαση της γεννήτριας. Αυτός ο συνδυασμός ουσιαστικά οδηγεί σε μαγνήτες με μικρότερη ενεργό επιφάνεια και, άρα, μειωμένη ελκτική δύναμη.

Μια λύση, επίσης, αν δε θέλουμε να έχουμε μεγάλο πάχος σιδήρου παντού, είναι να έχουμε το απαιτούμενο πάχος πίσω από τους μαγνήτες και ο υπόλοιπος δίσκος να είναι πιο λεπτός και να έχει πίσω του κολλημένες ακτίνες που θα τον συγκρατούν. Μια άλλη λύση είναι να κοπούν κάποιες σπές στους σιδερένιους δίσκους του δρομέα, συμμετρικά και μακριά από τους μαγνήτες. Οι σπές αυτές θα βοηθήσουν στον ακόμα καλύτερο αερισμό της γεννήτριας και θα μειώσουν και το βάρος της. Απαιτείται απόλυτα συμμετρική κοπή για να μη δημιουργούνται ανεπιθύμητες ροπές κατά την περιστροφή του δρομέα [18].

Το δεύτερο είναι να μην υπάρχει κορεσμός. Αν ο σίδηρος είναι πολύ λεπτός το υλικό θα μπει στον κορεσμό, οι δυναμικές γραμμές θα οδεύουν εκτός του υλικού, με αποτέλεσμα να έχουμε μεγάλες απώλειες. Για το σίδηρο ένα πεδίο γύρω στα 1.6 T (ή και λιγότερο) στο εσωτερικό του δίνει ασφάλεια ως προς τον κορεσμό.

8.1.3.8. Κόστος, βάρος και όγκος γεννήτριας

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια εκτίμηση για το συνολικό κόστος, βάρος και όγκο της γεννήτριας σε συνάρτηση με τις διαστάσεις της. Τα βασικά υλικά από τα οποία κατασκευάζεται η γεννήτρια είναι τα εξής:

- Μαγνήτες
- Σίδηρος
- Χαλκός
- Ρητίνη
- Κόντρα πλακέ
- Σκόνη σιδήρου

Καθώς οι τιμές των παραπάνω υλικών δεν είναι σταθερές στο χρόνο, οι σχέσεις για τα κόστη που παρουσιάζονται παρακάτω βασίζονται σε τρέχουσες τιμές. Ιδιαίτερα στις τιμές των μαγνητών νεοδυμίου οι διακυμάνσεις, όπως έχουμε πει, είναι μεγάλες. Όσα υλικά παραγγέλλονται από το εξωτερικό δεν επιβαρύνονται με ΦΠΑ αλλά με έξοδα αποστολής, ενώ στα υπόλοιπα θεωρήθηκε ΦΠΑ 23%. Η σκόνη σιδήρου προσφέρθηκε δωρεάν ως δείγμα οπότε δεν υπολογίζεται στο κόστος της γεννήτριας.

Η εξίσωση κόστους θα είναι:

$$C_{total} = (1 + \Phi PA)(C_{Fe} + C_{Cu} + C_{resin} + C_{wood}) + C_{mag}^{tot}$$

Ενώ για το βάρος:

$$M_{total} = M_{mag} + M_{Fe} + M_{Cu} + M_{resin}$$

Τέλος, ο συνολικός όγκος της γεννήτριας μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$V_{total} = \pi R_{out}^2 \cdot (2h_r + 2h_m + 2g + t_w)$$

8.1.3.8.1. Οι μαγνήτες

Όπως είναι γνωστό, ένα μεγάλο μέρος του κόστους στη γεννήτρια το αποτελεί το κόστος των μαγνητών. Ειδικά στις γεννήτριες με μαγνήτες νεοδυμίου, οι μαγνήτες είναι με διαφορά το πιο ακριβό υλικό. Οπότε σε περίπτωση που το κόστος αποτελεί κριτήριο σε μια βελτιστοποίηση, καταλαβαίνουμε ότι αλλαγές στο κόστος των μαγνητών θα επηρεάσουν σε σημαντικό βαθμό τα αποτελέσματά της.

Κάθε τεμάχιο τιμολογείται ξεχωριστά ανάλογα με το είδος, το βάρος, το πάχος και το σχήμα. Έτσι, γενικά, μαγνήτες μεγαλύτερου βάρους (αλλά ίδιοι κατά τα άλλα) προφανώς θα είναι ακριβότεροι. Έχοντας επιλέξει το σχήμα και το πάχος του μαγνήτη η κατάσταση διευκολύνεται λιγάκι αλλά και πάλι δεν υπάρχει κάποια ασφαλής εκτίμηση.

Επιπλέον, άλλο κόστος έχει ένας μαγνήτης που υπάρχει ήδη στο εμπόριο και χρησιμοποιείται σε μεγάλες ποσότητες και άλλο ένας μαγνήτης νέος, για τον οποίο η εταιρεία πρέπει να κατασκευάσει καλούπι από την αρχή. Έτσι, η χρήση κάποιου εμπορικού μαγνήτη κρίνεται σκόπιμη για εφαρμογές χαμηλού κόστους. Από την άλλη μεριά θα μπορούσε κανείς να κοστολογήσει το μαγνήτη που έχει παραγγείλει όχι στην τιμή που τον πλήρωσε, αλλά στην τιμή

που θα πλήρωνε κάποια χρόνια μετά, όταν ο μαγνήτης αυτός θα ήταν εμπορικός. Ο προσδιορισμός, όμως, μιας τέτοιας σχέσης δεν είναι εύκολη εργασία.

Η διαδικασία που ακολουθείται εδώ για την εύρεση της συνάρτησης κόστους των μαγνητών είναι η εξής: Πρώτα επικοινωνήσαμε με εταιρείες παραγωγής μαγνητών, οι οποίες μας έδωσαν κάποια στοιχεία από τα οποία εκτιμήσαμε ότι το κόστος μιας γεννήτριας κατασκευασμένης με μη εμπορικούς μαγνήτες είναι αρκετά μεγάλο και μάλλον απαγορευτικό για εφαρμογές χαμηλού κόστους όπως η δική μας.

Στη συνέχεια έγινε έρευνα στο διαδίκτυο για τους εμπορικούς μαγνήτες και συγκεντρώθηκαν κόστη για μαγνήτες διαφόρων διαστάσεων. Τα παραπάνω κόστη χρησιμοποιήθηκαν για να εξάγουμε μια σχέση μεταξύ όγκου μαγνήτη και κόστους (σε €).

Κόστος μαγνήτη N40:

$$C_{mag}^{N42} = 1.9849 + 4 \cdot 10^{-4} \cdot V_{mag}^{N42}$$

Όπου ο όγκος είναι (ορθογώνιοι μαγνήτες):

$$V_{mag} = l_a \cdot w_m \cdot h_m$$

Για παραγγελία $2p$ μαγνητών από το εξωτερικό, όπου p ο αριθμός των πόλων της γεννήτριας, το συνολικό κόστος των μαγνητών δίνεται σε κάθε περίπτωση:

$$C_{mag}^{tot} = C_{mag} \cdot 2p + \text{έξοδα αποστολής}$$

Ενώ το συνολικό βάρος των μαγνητών θα είναι ίσο με:

$$M_{mag} = \rho_{mag} \cdot V_{mag} \cdot 2p$$

όπου $\rho_{mag}^{N42} = 7.5 \frac{g}{cm^3}$ για τους μαγνήτες νεοδυμίου N42.

8.1.3.8.2. Ο σίδηρος

Θα κοπούν δύο δίσκοι σιδήρου. Η εξωτερική τους ακτίνα θα είναι ίση με R_{out} αλλά η εσωτερική ακτίνα δε θα είναι R_{in} . Η ακτίνα αυτή εξαρτάται από το ρουλεμάν όπως θα δούμε και αργότερα. Αυτό όμως δεν έχει σημασία γιατί ο σιδηρουργός δε χρεώνει το βάρος αυτού ακριβώς του κομματιού που ζητήθηκε, αλλά του συνολικού σιδήρου που κατανάλωσε εκείνος, με την έννοια ότι κατά την παρασκευή ενός δίσκου με οπή στο κέντρο του προκύπτουν κομμάτια άχρηστα στο σιδηρουργό τα οποία χρεώνεται εκείνος που κάνει την παραγγελία.

Μια ασφαλής εκτίμηση για τον όγκο του σιδήρου που θα χρησιμοποιηθεί είναι ότι ο σχεδιαστής θα πληρώσει τελικά το περιγεγραμμένο στον κύκλο τετράγωνο πάχους h_r , το οποίο θα έχει όγκο:

$$V_{Fe} = 4R_{out}^2 h_r$$

Δεδομένης της πυκνότητας του σιδήρου $\rho_{Fe} = 7.87 \frac{g}{cm^3}$ βρίσκουμε τη μάζα:

$$m_{Fe} = \rho_{Fe} V_{Fe}$$

Άρα το τελικό κόστος για το σίδηρο με δεδομένη από τον κατασκευαστή την τιμή άνα κιλό σιδήρου υπολογίζεται:

$$C_{Fe} = 1.23 \cdot ironprice \cdot m_{Fe}$$

όπου ο όρος 1.23 αντιπροσωπεύει το ΦΠΑ 23%.

Για το τελικό βάρος του σιδήρου (δύο δίσκοι) υπολογίζουμε διαφορετικό όγκο:

$$V_{Fe}^{used} = 2 \cdot \pi R_{out}^2 h_r$$

$$M_{Fe} = \rho_{Fe} V_{Fe}^{used}$$

8.1.3.8.3. Ο χαλκός

Η συνολική μάζα χαλκού που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή των πηνίων δίνεται:

$$M_{cu} = 3 \cdot N_{phase} \cdot l_{avg} \cdot sc \cdot \rho_{cu}$$

Η πυκνότητα του χαλκού είναι ίση με $\rho_{cu} = 8.94 \frac{g}{cm^3}$. Το συνολικό κόστος του χαλκού (με ΦΠΑ 23%) θα είναι:

$$C_{cu} = 1.23 \cdot copper price \cdot M_{cu}$$

8.1.3.8.4. Η ρητίνη

Ρητίνη χρησιμοποιείται και στο δρομέα και στο στάτη για μηχανική στήριξη της κατασκευής. Καλύπτει ολόκληρο το δίσκο των μαγνητών, άρα έχει ύψος όσο ο μαγνήτης και όγκο τον όγκο του δίσκου αφαιρουμένου του όγκου των μαγνητών. Όσον αφορά στο στάτη, έχει ύψος το αξονικό ύψος των πηνίων t_w και καλύπτει μια επιφάνεια-δαχτυλίδι χωρίς να θεωρούμε ότι υπάρχει ρητίνη εκεί όπου βρίσκεται ο χαλκός.

Για τη ρητίνη στο δρομέα (δύο δίσκοι):

$$V_{resin}^{rotor} = 2\pi(R_{out}^2 - R_{in}^2)(1 - a_i)h_m$$

Για τη ρητίνη στο στάτη:

$$V_{resin}^{stator} = t_w[\pi(R_{out}^2 - R_{in}^2) - Qw_c l_a + (\pi(R_{out} + w_c)^2 - \pi R_{out}^2)]$$

όπου συμπεριλαμβάνεται και η ρητίνη που απαιτείται για την κάλυψη των άκρων του τυλίγματος.

Η ρητίνη αναμειγνύεται με θερμοαπαγωγική σκόνη (ταλκ) σε αναλογία 1:1. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ταυτόχρονη αύξηση μάζας και πυκνότητας της ρητίνης οπότε ο όγκος μένει πρακτικά σταθερός. Ωστόσο προστίθεται ποσότητα ταλκ όση και της ρητίνης με αποτέλεσμα το βάρος να διπλασιάζεται. Για τη μάζα της ρητίνης που θα χρειαστούμε γράφουμε:

$$M_{resin} = 2\rho_{resin}(V_{resin}^{rotor} + V_{resin}^{stator})$$

$$\text{όπου } \rho_{resin} = 1.36 \frac{g}{cm^3}.$$

Για το κόστος:

$$C_{resin} = resin\ price \cdot M_{resin}/2$$

8.1.3.8.5. Τα κόντρα πλακέ

Τα κόντρα πλακέ χρησιμοποιούνται για την κατασκευή καλουπιών και μόνο και το βάρος τους δε συμβάλλει στο συνολικό βάρος της γεννήτριας παρά μόνο στο συνολικό κόστος. Κατά προσέγγιση θα χρησιμοποιηθούν 9 κόντρα πλακέ εμβαδού λίγο μεγαλύτερου (extra) από το περιγεγραμμένο στον κύκλο ακτίνας R_{out}^2 . Τα 3 χρησιμοποιούνται στο στάτη και τα 6 στο δρομέα. Το πάχος τους είναι διαφορετικό και ο ξυλουργός κόβει μόνο συγκεκριμένες τιμές αυτών. Γενικά μπορεί κανείς να γράψει:

$$S_{wood} = 4\pi(R_{out} + extra)^2$$

$$C_{wood} = 3S_{wood}price1 + 6S_{wood}price2$$

όπου price1 και price2 οι τιμές ανά m^2 για τα δύο διαφορετικά πάχη που χρησιμοποιούνται.

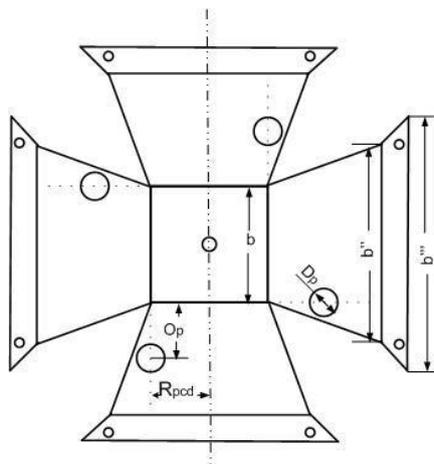
Η συγκεκριμένη κοστολόγηση είναι αρκετά προσεγγιστική καθώς και άλλα κομμάτια ξύλου χρησιμοποιούνται για την κατασκευή, πέρα από τα 9 που απαιτούνται για τα καλούπια.

Το συνολικό κόστος της γεννήτριας διπλού δρομέα υπολογίστηκε 139€.

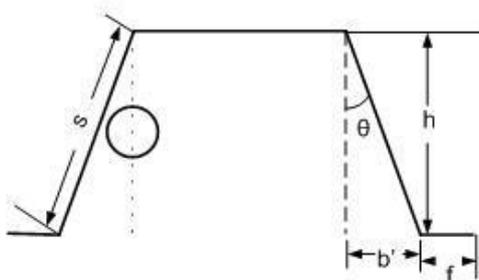
8.1.4. Σχεδίαση του περιβλήματος

Το περίβλημα του υδροστροβίλου χρησιμεύει εκτός από την κάλυψη του υδροστροβίλου και στην προστασία της γεννήτριας, καθώς δεν επιτρέπει στα απόνερα του στροβίλου να βγουν έξω από αυτό και να φθείρουν τον γύρω εξοπλισμό. Τα σχέδια που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του έγιναν με βάση στοιχεία που δόθηκαν από τον κατασκευαστή του υδροστροβίλου Joseph Hartvigsen. Η σωστή σχεδίαση του περιβλήματος είναι απαραίτητη για την αποδοτική λειτουργία του υδροστροβίλου, καθώς καθορίζει τη γωνία υπό την οποία θα προσπίπτει η δέσμη του νερού στα σκαφίδια του στροβίλου, αλλά και την απόσταση που θα διανύει η δέσμη μέχρι να φθάσει το σκαφίδιο. Η διατομή της δέσμης του νερού, όταν αυτό εξέρχεται από το ακροφύσιο, μειώνεται μέχρι ένα σημείο και μετά η δέσμη αρχίζει να αποκλίνει. Στόχος είναι η δέσμη να προσπίπτει στο σκαφίδιο πριν αρχίσει να αποκλίνει.

Το περίβλημα θα είναι από ανοξείδωτο υλικό και θα έχει πάχος 4mm. Με βάση τα σχέδια του κατασκευαστή το περίβλημα αποτελείται από εννιά κομμάτια: μία τετραγωνική βάση, τέσσερα τραπεζοειδή φύλλα (τα οποία φέρουν τρύπες για να προσαρμοστούν σε αυτές τα απαιτούμενα ακροφύσια) και τέσσερα μικρά ορθογώνια κομμάτια που χρησιμοποιούνται για τη στερέωση του περιβλήματος. Τα κομμάτια αυτά φαίνονται στο σχήμα 8.9, όπου παρουσιάζονται όπως θα ήταν αν κόβονταν ως ένα κομμάτι, ενώ στο σχήμα 8.10 απεικονίζεται ένα τραπεζοειδές φύλλο. Στο σχήμα φαίνονται και οι συμβολισμοί των υπολογιζόμενων μεγεθών/διαστάσεων.



Σχήμα 8.9: Όλα τα φύλλα του περιβλήματος



Σχήμα 8.10: Πλάγιο τραπεζοειδές φύλλο περιβλήματος με τρύπα για προσαρμογή του ακροφυσίου

Η μέθοδος σχεδίασης του περιβλήματος που προτείνει ο Hartvigsen περιλαμβάνει τη θεώρηση κάποιων σταθερών αρχικών παραμέτρων και εν συνεχεία τον υπολογισμό των υπόλοιπων διαστάσεων. Τα μεγέθη που χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα στην παρούσα εφαρμογή είναι:

- Το ύψος του περιβλήματος: $h=25\text{cm}$
- Η γωνία της δέσμης, η οποία είναι ίση με τη γωνία θ που σχηματίζει το πλάγιο φύλλο με την πάνω βάση: $\theta=20^\circ$
- Το μήκος f (που φαίνεται στο σχήμα 8.8(β)): $f=3\text{cm}$
- Ένας συντελεστής σχετικός με το είδος των σκαφιδίων xf (όπως τον δίνει ο κατασκευαστής και χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της διαμέτρου του υδροστροβίλου), για τα πορτοκαλί σκαφίδια που χρησιμοποιούνται εδώ: $xf=1,0$
- Ο αριθμός των σκαφιδίων: 20
- Η διάμετρος του ακροφυσίου στο σημείο που ενώνεται με το σωλήνα D_{pipe} (για τον προσδιορισμό της διαμέτρου της τρύπας στο πλάγιο φύλλο) $D_{\text{pipe}}=6.1\text{cm}$
- Επιθυμητή απόσταση του ακροφυσίου από την πάνω βάση: $d_{nb}=5\text{cm}$

Από τις παραμέτρους αυτές υπολογίζονται όλες οι υπόλοιπες διαστάσεις του περιβλήματος. Αρχικά, προσδιορίζεται η διάμετρος pcd του στροβίλου:

$$pcd = xf(0,242 \cdot \text{spoons} + 2) = 17,37\text{cm}$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται η εξωτερική διάμετρος od του υδροστροβίλου σύμφωνα με τον τύπο (8.28):

$$od = pcd + 2 \cdot xf = 22,45\text{cm} \quad (8.28)$$

Το μήκος s της πλάγιας πλευράς του τραπεζοειδούς φύλλου υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο (8.29):

$$s = \frac{h}{\cos \theta} = 26,60\text{cm} \quad (8.29)$$

Το μήκος b της πάνω βάσης δίνεται από τον τύπο (8.30):

$$b = \frac{INT[2(od+4 \cdot xf+0,5)]}{2} = 33,02\text{cm} \quad (8.30)$$

Επίσης υπολογίζονται τα επιμέρους μεγέθη b' και b'' που φαίνονται στο σχήμα 8.7, καθώς και το μήκος της μεγάλης βάσης του τραπεζοειδούς φύλλου, από τους τύπους (8.31)-(8.33):

$$b' = s \cdot \sin \theta = 9,09\text{cm} \quad (8.31)$$

$$b'' = b + 2b' = 54,48\text{cm} \quad (8.32)$$

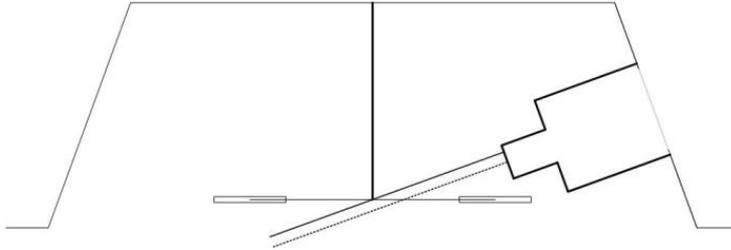
$$b''' = 2f + b'' = 58,42\text{cm} \quad (8.33)$$

Ακολούθως, υπολογίζεται η απόσταση O_p (κατά μήκος της πλάγιας πλευράς του περιβλήματος) του κέντρου της τρύπας για το ακροφύσιο από την πάνω βάση:

$$O_p = d_{nb} + \frac{D_{\text{pipe}}}{2} = 7,87\text{cm} \quad (8.34)$$

Το μήκος του άξονα, δηλαδή η απόσταση του πάνω μέρους του υδροστροβίλου από την πάνω βάση του περιβλήματος, υπολογίζεται από τον τύπο (8.28) έτσι ώστε το πάνω μέρος της δέσμης να προσπίπτει στο πάνω μέρος κάποιου κεντρικού σκαφιδίου, όπως στο σχήμα 8.11.

$$l_a = \frac{0_p + \frac{b}{2} \sin \theta}{\cos \theta} = 14.63cm \quad (8.35)$$



Σχήμα 8.11: Όψη περιβλήματος όπου φαίνεται ο άξονας του στροβίλου και το σημείο που το πάνω μέρος της δέσμης (συνεχής γραμμή) τέμνει τον υδροστρόβιλο. (Η διακεκομμένη γραμμή απεικονίζει το μέσο της δέσμης)

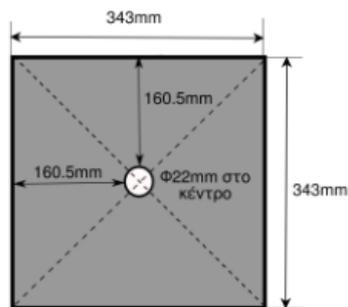
Η οριζόντια απόσταση του κέντρου της τρύπας από τον κεντρικό άξονα της πλάγιας πλευράς (στην οποία αυτή βρίσκεται) είναι ίση με την ακτίνα του στροβίλου (από το κέντρο του μέχρι το κέντρο του σκαφιδίου) και είναι ίση με:

$$R_{pcd} = \frac{pcd}{2} = 8.68cm$$

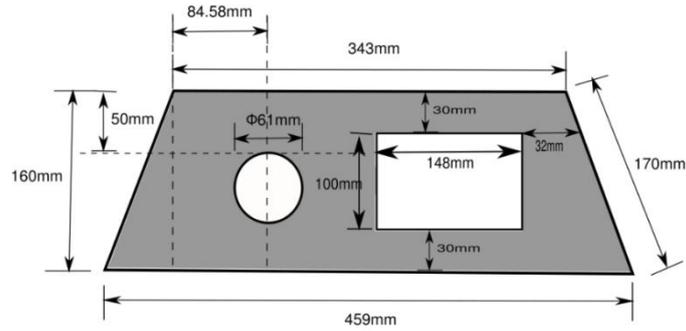
Η απόσταση d_{nc} από την πάνω βάση του περιβλήματος μέχρι την πάνω άκρη της τρύπας είναι ίση με:

$$d_{nc} = \frac{b}{2} - \left(R_{pcd} + \frac{D_{pipe}}{2} \right) = 5.41cm$$

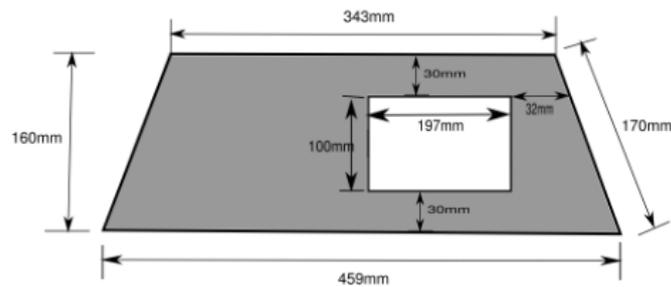
Στη συγκεκριμένη εφαρμογή θα χρησιμοποιηθούν δύο ακροφύσια, αλλά επειδή υπάρχει η προοπτική δοκιμής λειτουργίας με τρία ακροφύσια θα υπάρχουν τρία τραπεζοειδή φύλλα με οπές. Επίσης, όλες οι πλάγιες πλευρές του περιβλήματος θα έχουν ορθογώνια παράθυρα, ώστε να μπορεί κανείς να παρακολουθεί τι συμβαίνει στο εσωτερικό του. Άρα, προκύπτουν πέντε διαφορετικά σχέδια μεταλλικών ανοξείδωτων φύλλων για κοπή, τα οποία φαίνονται πλήρως διαστασιολογημένα στο σχήμα 8.12.



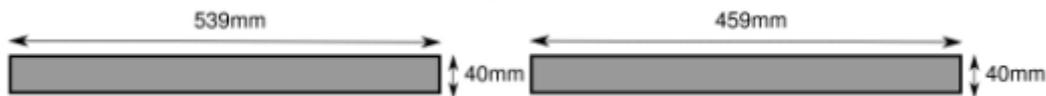
(α)



(β)



(γ)



(δ)

(ε)

Σχήμα 8.12: (α) Πάνω τετραγωνική βάση περιβλήματος, (β) Πλάγια πλευρά περιβλήματος με οπή για το ακροφύσιο και παραθυράκι, (γ) Πλάγια πλευρά περιβλήματος, (δ) Ορθογωνικό κομμάτι που προσαρμόζεται οριζόντια και χρησιμεύει στη στήριξη του περιβλήματος, (ε) Ορθογωνικό κομμάτι που προσαρμόζεται κατακόρυφα και χρησιμεύει στην καλύτερη στερέωση του περιβλήματος\

8.2. Κατασκευή υδρογεννήτριας

Ένα πλεονέκτημα της γεννήτριας μονίμων μαγνητών αξονικής ροής είναι η απλότητα κατασκευής. Η κατασκευή της γεννήτριας βασίστηκε στις οδηγίες που δίνονται στο [32] και πραγματοποιήθηκε χωρίς να χρειάζονται εξειδικευμένα εργαλεία ούτε κάποια σημαντική κατασκευαστική εμπειρία. Τα βασικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται είναι η ηλεκτρική σέγα, πριόνια, λίμες, επιτραπέζιο δράπανο, ηλεκτρικός τροχός, ηλεκτροσυγκόλληση, βιδολόγος, κ.α..

8.2.1. Κατασκευή του στάτη

Το πρώτο στάδιο για την κατασκευή του στάτη είναι η κατασκευή των πηνίων. Η συγκεκριμένες γεννήτριες έχουν 9 πηνία, με 67 ελίγματα από χαλκό διαμέτρου 1.25mm. Τα πηνία, των οποίων οι επιθυμητές διαστάσεις δίνονται σε προηγούμενη ενότητα, κατασκευάζονται με χρήση μίας μηχανής χειρός από ξύλο για το τύλιγμα, που φαίνεται στο σχήμα 8.13. Για την εργασία αυτή

απαιτούνται 3 άτομα, ο πρώτος εκ των οποίων τυλίγει το τύλιγμα, ενώ δεύτερος κρατάει τεντωμένο το χαλκό και ο τρίτος μετράει τις περιελίξεις. Αφού τυλιχτούν τα πηνία μετράται το βάρος τους. Το βάρος του χαλκού στο ένα πηνίο όπως είχε υπολογιστεί κατά τη σχεδίαση της γεννήτριας ήταν 117 gr και τα πηνία που κατασκευάστηκαν δεν είχαν σημαντική απόκλιση από αυτήν την τιμή.

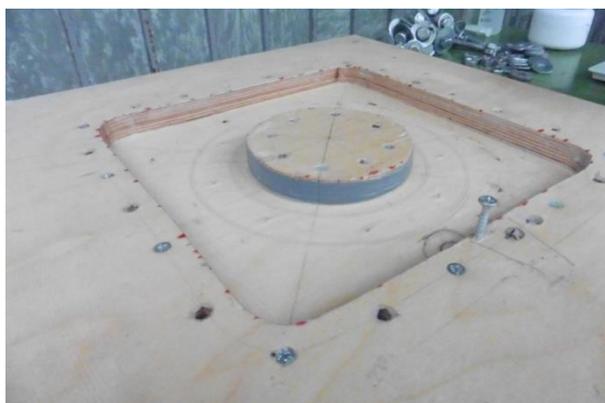


(α)

(β)

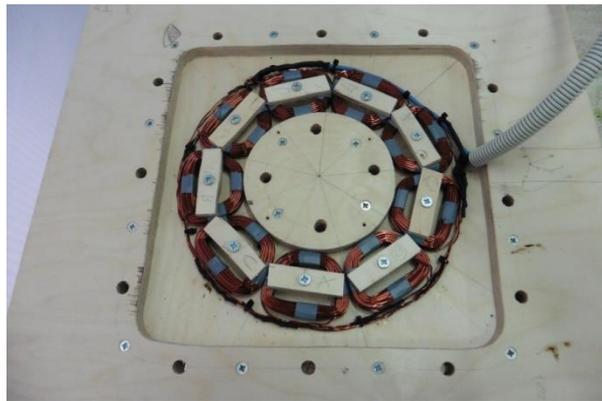
Σχήμα 8.13: (α) Μία απλή μηχανή χειρός για την περιέλιξη πηνίων [18], (β) η διαδικασία της περιέλιξης

Η μηχανική στήριξη για τα πηνία επιτυγχάνεται δημιουργώντας μία πλάκα από βινιλεστερική ρητίνη που θα τα κρατά στη θέση τους και θα εξασφαλίζει μηχανική αντοχή. Η βινιλεστερική ρητίνη αντέχει σε υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με την πολυεστερική και είναι αδιάβροχη. Για να δημιουργηθεί αυτή η πλάκα πρέπει να κατασκευαστεί πρώτα ένα καλούπι στο οποίο θα γίνει στη συνέχεια έγχυση της ρητίνης. Το καλούπι κατασκευάζεται από τρία τετράγωνα ξύλα τύπου κόντρα πλακέ: τη βάση, το εσωτερικό και το καπάκι. Το πάχος της βάσης και του καπακιού (χοντρή βάση, λεπτό καπάκι) είναι σχετικά αυθαίρετα, ενώ το πάχος του εσωτερικού ξύλου είναι ίσο με το αξονικό πάχος των πηνίων. Δεν πειράζει αν είναι λίγο μικρότερο, αλλά σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερο. Το μεσαίο ξύλο κόβεται εσωτερικά σε κατάλληλες διαστάσεις, ώστε να δημιουργηθεί ο χώρος στον οποίο θα τοποθετηθούν τα πηνία. Ακόμα, κόβεται ένας μικρός δίσκος ίδιου πάχους που τοποθετείται στο κέντρο του εσωτερικού ξύλου, ώστε η πλάκα που θα προκύψει να είναι κενή στο κέντρο της για να μπορεί να περιστρέφεται ο άξονας της γεννήτριας.



Σχήμα 8.14: Καλούπι στάτη

Ακολούθως, αφού σηματοδοτούν οι θέσεις των πηνίων, τοποθετούνται στο καλούπι χωρίς το καπάκι του και σταθεροποιούνται. Στόχος είναι η δημιουργία του τριφασικού τυλίγματος της γεννήτριας σε συνδεσμολογία αστέρα. Κάθε φάση αποτελείται από τρία πηνία συνδεδεμένα σε σειρά, όπου το τέλος του ενός συνδέεται με την αρχή του άλλου, αφού απογυμνωθούν τα άκρα τους και κολληθούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας κολλητήρι και καλά. Ο ουδέτερος κόμβος προκύπτει συνδέοντας τη μία άκρη των καλωδίων των τριών φάσεων και η άλλη άκρη των καλωδίων των τριών φάσεων καταλήγει στην έξοδο. Ο ουδέτερος δεν αφήνεται στη γεννήτρια όπως συνηθίζεται αλλά βγαίνει έξω από αυτή μαζί με τις φάσεις για πειραματικούς σκοπούς.



Σχήμα 8.15: Τα πηνία έχουν τοποθετηθεί στο καλούπι, έχουν συνδεθεί τα άκρα τους. Τα κομμάτια ξύλου που έχουν βιδωθεί πιάζουν και σταθεροποιούν τα πηνία στις ακριβείς τους θέσεις κατά τη διαδικασία συναρμολόγησής τους.

Αφού το τύλιγμα έχει σταθεροποιηθεί και κολληθεί, έρχεται η ώρα για την έγχυση της ρητίνης. Αρχικά, αλείφεται το καλούπι με κερί. Δημιουργούνται δύο μείγματα. Στο πρώτο η ρητίνη αναμειγνύεται με σκόνη σιδήρου με αναλογία 2:3 και προστίθενται καταλύτης. Στο δεύτερο, η ρητίνη αναμειγνύεται με καταλύτη και ταλκ(θερμοαπαγωγή). Το πρώτο μείγμα χύνεται στο εσωτερικό των πηνίων και το δεύτερο στο εξωτερικό κομμάτι και στα κενά ενδιάμεσα στα πηνία. Παράλληλα τοποθετούνται δύο λεπτά φύλλα από υαλονήματα στις δύο εξωτερικές πλευρές του στάτη ώστε να προσδοθεί μηχανική αντοχή.



(α)



(β)

Σχήμα 8.16: (α),(β) Έγχυση του μείγματος σκόνης σιδήρου - ρητίνης στο εσωτερικό των πηνίων και του μείγματος ρητίνης - ταλκ στο υπόλοιπο καλούπι του στάτης.

Το καπάκι βιδώνεται, το πλεόνασμα ρητίνης εξέρχεται του καλουπιού και ο στάτης αφήνεται να στεγνώσει. Το καλούπι αποσυναρμολογείται προσεχτικά και ο στάτης είναι έτοιμος.



(α)

(β)

Σχήμα 8.17: (α) Το καπάκι βιδώνεται(β)Αφού στεγνώσουν τα μείγματα, το καλούπι αποσυναρμολογείται και ο στάτης είναι έτοιμος

8.2.2. Κατασκευή του δρομέα

Ο δρομέας της γεννήτριας αποτελείται από δύο χαλύβδινους δίσκους, στους οποίους θα τοποθετηθούν μαγνήτες. Από το κέντρο των δίσκων αφαιρείται ένας μικρός δίσκος ώστε να μπορεί να συνδεθεί το ρουλεμάν. Σε κάθε δίσκο ανοίγονται 4 τρύπες με το επιτραπέζιο δράπανο, από τις οποίες θα περάσουν οι ντίζες που θα αποτελέσουν και τον άξονα της γεννήτριας. Επειδή, η γεννήτρια αυτή κατασκευάστηκε για να χρησιμοποιηθεί σε ένα υδροηλεκτρικό σύστημα, κρίθηκε σκόπιμο το γαλβάνισμα των δίσκων του δρομέα για επιπλέον προστασία τους από τα νερά που μπορεί να εξέρχονται από το περίβλημα του υδροστρόβιλου.

Έπειτα, τοποθετούνται οι 12 μαγνήτες στους δίσκους. Η ακριβής τοποθέτησή τους γίνεται με τη χρήση ενός ξύλινου οδηγού που σχεδιάζεται και κόβεται με το χέρι, και αφού κεντραριστεί και βιδωθεί πάνω στο δίσκο, δείχνει που ακριβώς είναι η θέση των μαγνητών, έτσι ώστε να δημιουργήσουν μία όσο το δυνατόν συμμετρική διάταξη. Σε συγκεκριμένα σημεία του ξύλινου οδηγού, το λιμάρισμα(λείανση, εκχόνδριση) ξεπέρασε τα χιλιοστά που έπρεπε οπότε τοποθετήθηκε μονωτική ταινία για να καλύψει τη διαφορά. Οι μαγνήτες τοποθετούνται με προσοχή στο δίσκο κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι διπλανοί μαγνήτες να έχουν αντίθετη πολικότητα στο δίσκο κατά τέτοιο τρόπο ώστε διπλανοί μαγνήτες να έχουν αντίθετη πολικότητα και κολλιούνται σε αυτόν με τη χρήση ισχυρής κόλλας.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 8.18: (α) Ο ξύλινος δίσκος που χρησιμοποιείται ως οδηγός για την τοποθέτηση των μαγνητών έχει βιδωθεί πάνω στον χαλύβδινο δίσκο, (β) οι μαγνήτες κολλήθηκαν στο δίσκο, (γ) Ο δίσκος με τους μαγνήτες κολλημένους αφού αφαιρέθηκε ο ξύλινος οδηγός

Για επιπλέον μηχανική αντοχή, σταθεροποίηση και προστασία των μαγνητών, ο δίσκος θα τοποθετηθεί μέσα σε ρητίνη. Για να γίνει αυτό, πρέπει πάλι να κατασκευαστεί ένα καλούπι που

αποτελείται από 3 κόντρα πλακέ, όπως και στην περίπτωση του καλουπιού του στάτη. Στο εσωτερικό τμήμα του καλουπιού, κόβεται ένας δίσκος λίγο μεγαλύτερος από τη γεννήτρια όπου θα τοποθετηθεί ο δίσκος με τους μαγνήτες, ώστε η ρητίνη να καλύψει και να προστατεύσει και την εξωτερική πλευρά των μαγνητών. Τα σημεία στα οποία δεν πρέπει να προστατεύσει και την εξωτερική πλευρά των μαγνητών. Τα σημεία στα οποία δεν πρέπει να κολλήσει η ρητίνη αλείφονται με κερί. Η βινιλεστερική ρητίνη αναμειγνύεται με καταλύτη, επιταχυντή και ταλκ, και αφού γίνει η έγχυση του μείγματος, τοποθετείται και ένα φύλλο από υαλονήματα για αντοχή στις καταπονήσεις και τη φυσική φθορά. Το καπάκι δε χρειάζεται βίδωμα, καθώς πάνω του τοποθετούνται εργαλεία, που ελκύουν οι μαγνήτες κι έτσι παραμένει κλειστό ασκώντας την απαιτούμενη πίεση προκειμένου να διαφύγει η παραπάνω ρητίνη. Το καλούπι αφήνεται στην κατάσταση αυτή μέχρι να στερεοποιηθεί η ρητίνη και στη συνέχεια αποσυναρμολογείται προσεκτικά για να βγει ο δίσκος με τους μαγνήτες και τη ρητίνη που τους συγκρατεί. Αφού απομακρυνθεί με προσοχή η ρητίνη από όλα τα ανεπιθύμητα σημεία με τη βοήθεια μιας λίμας, ο δίσκος με τους μαγνήτες είναι έτοιμος να χρησιμοποιηθεί.



Σχήμα 8.19: Οι δύο δίσκοι με τους μαγνήτες, αφού βγήκαν από το καλούπι με τη ρητίνη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9ο: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΡΙΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

9.1. Πειραματική διάταξη

Η συναρμολόγηση και η εγκατάσταση της γεννήτριας στο υδροηλεκτρικό σύστημα έγινε με βάση το [2].

Η εκτίμηση της λειτουργίας της υδρογεννήτριας και η μέτρησή της πραγματοποιούνται με δύο διαφορετικές δοκιμές: η μία αφορά μόνο τη σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών και τη μέτρηση των βασικών μεγεθών της. Η δεύτερη δοκιμή εξετάζει συνολικά την απόδοση και τη

λειτουργία του υδροηλεκτρικού συστήματος (δηλαδή του υδροστροβίλου και της γεννήτριας μαζί) υπό συγκεκριμένη παροχή και πίεση, αλλά με μεταβαλλόμενο φορτίο.

Οι δύο αυτές δοκιμές έγιναν σε τρεις διαφορετικές γεννήτριες. Η πρώτη γεννήτρια είναι μονού δρομέα χωρίς πυρήνα στάτη και 8 πόλους και είχε κατασκευαστεί σε προηγούμενη διπλωματική εργασία. Οι άλλες δύο είναι η γεννήτρια διπλού δρομέα που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και η τρίτη είναι μια γεννήτρια τοπολογίας μονού δρομέα - μονού στάτη με μεταλλικό δίσκο στην άλλη πλευρά του στάτη ο οποίος έχει πάχος $h_r = 6\text{mm}$. Ο δρομέας με τους μαγνήτες και ο στάτης που χρησιμοποιήθηκε για τη συγκεκριμένη γεννήτρια ήταν αυτός που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Παρά τη διαφορά στους πόλους η ονομαστική ταχύτητα όλων των γεννητριών είναι οι 750 στροφές ανά λεπτό διότι η πρώτη γεννήτρια είναι σχεδιασμένη για να λειτουργεί στα ονομαστικά της μεγέθη στα 50Hz, ενώ οι άλλες δύο έχουν σχεδιαστεί για να αποδίδουν ονομαστική ισχύ στα 75 Hz. Όλα τα πειράματα γίνονται στο Εργαστήριο Υδροδυναμικής των Μηχανολόγων Μηχανικών.

Στόχος των πειραματικών μετρήσεων είναι από τη μία να μετρηθούν οι επιδόσεις της γεννήτριας που κατασκευάσαμε και από την άλλη, να συγκριθούν οι επιδόσεις γεννητριών αξονικής ροής με πυρήνα στάτη και χωρίς.

Τα βασικά χαρακτηριστικά που έχει σχεδιαστεί να έχει κάθε γεννήτρια παρουσιάζονται στον πίνακα 9.1.

Τύπος Γεννήτριας	Μονός Δρομέας χωρίς πυρήνα (με μεταλλικό δίσκο)	Διπλός Δρομέας με πυρήνα	Μονός Δρομέας με πυρήνα (με μεταλλικό δίσκο)
Γενικά χαρακτηριστικά			
Ονομαστική ισχύς	370W	400W	200W
Αριθμός πόλων	8	12	12
Αριθμός πηνίων	6	9	9
Διάκενο ($2g+t_w$)	20 mm	20 mm	20 mm
Μηχανικό διάκενο (g)	3 mm	3 mm	3 mm
Κόστος (από προσομοίωση)	157€	139€	100€
Μάζα (από προσομοίωση)	9.3 kg	8.8 kg	8.6 kg
Τάση συσσωρευτών	48V	48V	48V
Δρομέας			
Πάχοςσιδήρου (h_r)	6 mm	10 mm	10 mm
Εσωτερική ακτίνα (R_{in})	93 mm	79 mm	79mm
Εξωτερική ακτίνα (R_{out})	125 mm	110 mm	110 mm
Εσωτερική / εξωτερική ακτίνα (k_d)	0.75	0.72	0.72
Μαγνητικό υλικό	NdFeB N40	NdFeB N42	NdFeB N42
Πάχος μαγνήτη (h_m)	10 mm	5 mm	5 mm
Πλάτος μαγνήτη (w_m)	30 mm	30 mm	30 mm
Μήκος μαγνήτη (l_a)	46 mm	30 mm	30 mm
Πλάτος μαγνήτη / πλάτος πολικού βήματος (a_i)	0.54	0.6	0.6
Στάτης			
Αξονικό πάχος (t_w)	13mm	13 mm	13 mm
Πάχος πλευράς πηνίου (w_c)	28 mm	11 mm	11 mm
Σπείρες / πηνίο (N_c)	146	67	67
Διάμετρος χαλκού (dc)	1.32 mm	1.25 mm	1.25 mm
Μάζα πηνίου	432 gr	117 gr	117 gr

Πυκνότητα ρεύματος (J_{max})	2.75 A/mm ²	3.78 A/mm ²	2 A/mm ²
----------------------------------	------------------------	------------------------	---------------------

Πίνακας 9.1: Τα βασικά χαρακτηριστικά των τριών γεννητριών

Τα όργανα και η μηχανές που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις είναι τα εξής:

- DC κινητήρας ονομαστικής ισχύος 50HP μεταβλητών στροφών
- ηλεκτρονικός έλεγχος στροφών
- ροπόμετρο 500Nm
- ψηφιακός παλμογράφος 4 καναλιών
- ωμική αντίσταση 3kW
- 4 μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης 12V 100Ah η καθεμία
- τριφασικός ανορθωτής γέφυρας
- θερμόμετρο υπέρυθρων

Διεξήχθησαν τα παρακάτω πειράματα:

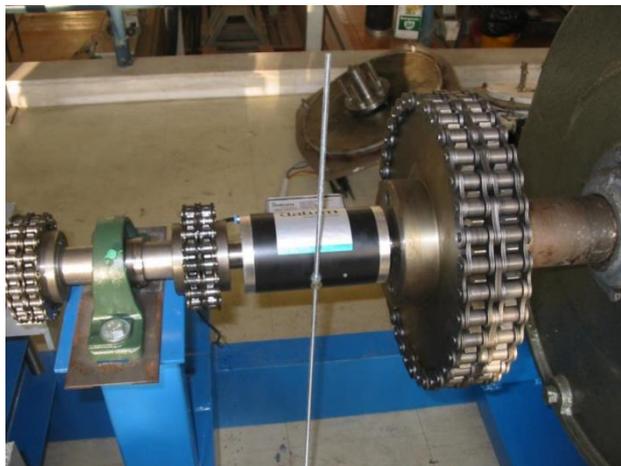
1. Μέτρηση της γεννήτριας σε κενό φορτίο
2. Μέτρηση της γεννήτριας υπό φορτίο
 - ωμικό
 - σύνδεση σε συσσωρευτές
3. Μέτρηση της θερμοκρασίας του στάτη
4. Μέτρηση της αντίστασης του στάτη

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο σχήμα 9.1.



Σχήμα 9.1: Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε

Τα ρεύματα, οι τάσεις και η συχνότητα μετρώνται με τη βοήθεια ψηφιακού παλμογράφου. Μεταξύ του κινητήρα και της γεννήτριας έχει τοποθετηθεί ροπόμετρο με εύρος 5Nm-5kNm, το οποίο μετράει τις στροφές, τη ροπή και τη μηχανική ισχύ και φαίνεται στην εικόνα 9.2.



Σχήμα 9.2: Η σύνδεση του ροπόμετρου στη διάταξη[2]

Περιγραφή της μέτρησης υπό κενό φορτίο

Στη μέτρηση υπό κενό φορτίο μετράται η ηλεκτρεγερτική δύναμη της κάθε γεννήτριας σε συνάρτηση με τις στροφές. Η γεννήτρια ανοιχτοκυκλώνεται και μετράται η φασική τάση στα άκρα της ενώ παράλληλα μεταβάλλονται οι στροφές του DC κινητήρα από τον πίνακα ελέγχου του. Η ΗΕΔ μετράται στον παλμογράφο (όπως και οι στροφές με μεγαλύτερη ακρίβεια μέσω της συχνότητας) μέχρι τις ονομαστικές στροφές.

Παρατίθενται σε πίνακες τα αποτελέσματα των μετρήσεων των στροφών n , των φασικών τάσεων E_{fa} , E_{fb} , E_{fc} , καθώς και η μέση τιμή της φασικής τάσης E_{favg} για τις διαφορετικές τιμές διακένου της γεννήτριας χωρίς πυρήνα και για τις δύο διαφορετικές τοπολογίες γεννήτριας με πυρήνα. Η μέση τιμή χρειάζεται να υπολογιστεί λόγω της απόκλισης που παρουσιάζεται μεταξύ των επιμέρους τάσεων, εξαιτίας ασυμμετρίας στην κατασκευή του τυλίγματος (πηνία με περισσότερα ή λιγότερα ελίγματα) αλλά και στην τοποθέτησή του στον χώρο.

Περιγραφή της μέτρησης υπό ωμικό μεταβαλλόμενο φορτίο

Για τη διεξαγωγή της δοκιμής αυτής συνδέουμε στα άκρα της κάθε γεννήτριας ένα μεταβαλλόμενο ωμικό φορτίο. Οι δοκιμές έγιναν στις 750 σ.α.λ.. Το ωμικό φορτίο ρυθμίζεται έως ότου μετρηθεί το κατάλληλο ρεύμα. Το ρεύμα I_{rms} μεταβάλλεται από την τιμή 0,5 A μέχρι την ονομαστική του τιμή και λίγο παραπάνω, με βήμα 0,5 A και μετράται μέσω του ψηφιακού παλμογράφου. Για κάθε τιμή ρεύματος λαμβάνεται μέτρηση της ροπής T μέσω του ροπομέτρου, το οποίο όμως έχει πολύ μεγάλο εύρος(5 Nm- 5kNm) κι έτσι μπορεί να υπεισέρχονται σφάλματα σε μετρήσεις κοντά στο 5%. Παράλληλα με την παραπάνω διαδικασία για κάθε τιμή φορτίου (που αντιστοιχεί σε κάποια τιμή ρεύματος) μετράται και η τερματική τάση V_{ta} , V_{tb} , V_{tc} , στις τρεις φάσεις της γεννήτριας για τις ονομαστικές στροφές με τη βοήθεια του παλμογράφου. Εν συνεχεία, υπολογίζεται η μέση τιμή της φασικής τάσης V_{tavg} και υπολογίζεται η ηλεκτρική ισχύς P_{el} στην έξοδό της.

Ακολουθως, με τη βοήθεια της μηχανικής ροπής που μετρήθηκε προηγουμένως και δεδομένων των στροφών της γεννήτριας, υπολογίζεται η μηχανική ισχύς P_{mech} στην είσοδο της γεννήτριας και η απόδοσή της η_{eff} υπό ωμικό μεταβαλλόμενο φορτίο.

Περιγραφή της μέτρησης σε απευθείας σύνδεση με τους συσσωρευτές

Στην έξοδο του ανορθωτή συνδέονται 4 συσσωρευτές τάσης 12V συνθέτοντας ένα σύστημα τάσης 48V. Οι στροφές μεταβάλλονται σταδιακά μέχρι να παρατηρηθεί ότι το σύστημα δίνει ενέργεια στις μπαταρίες και στη συνέχεια αυξάνονται μέχρι να μετρηθεί το ονομαστικό ρεύμα της γεννήτριας. Έτσι, μπορεί να σχηματιστεί η καμπύλη ισχύος κάθε γεννήτριας.

Με το ροτόμετρο καταγράφουμε τη μηχανική ροπή και με τον παλμογράφο AC και DC ρεύμα και τάση, καθώς και συχνότητα, από την οποία υπολογίζουμε στη συνέχεια τις στροφές.

9.2. Μέτρηση των γεννητριών μονίμων μαγνητών

9.2.1. Μέτρηση της γεννήτριας χωρίς πυρήνα μονού δρομέα

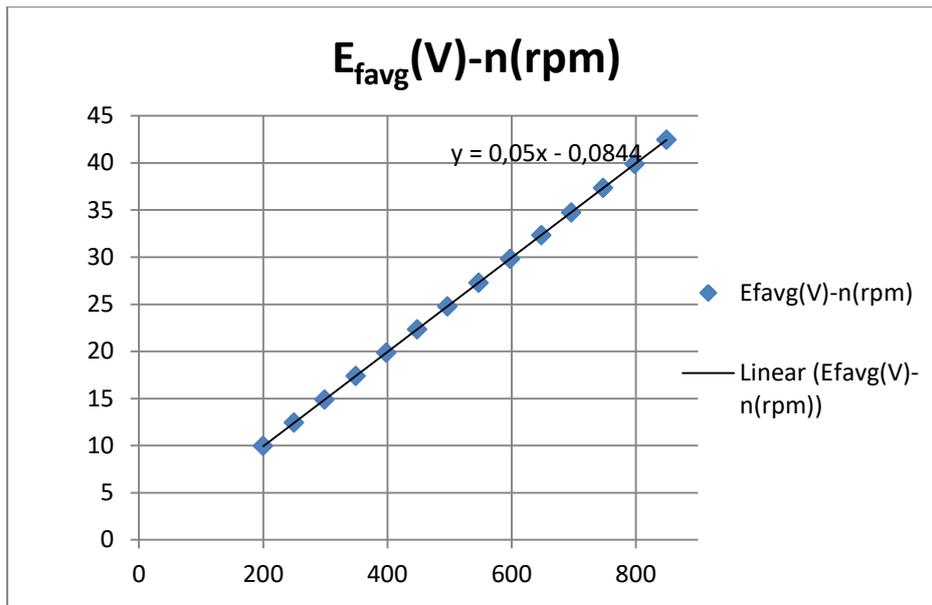
9.2.1.1. Μέτρηση υπό κενό φορτίο

Στον παρακάτω πίνακα (9.2) φαίνονται οι μετρήσεις των φασικών ΗΕΔ για τη γεννήτρια μονού δρομέα χωρίς πυρήνα.

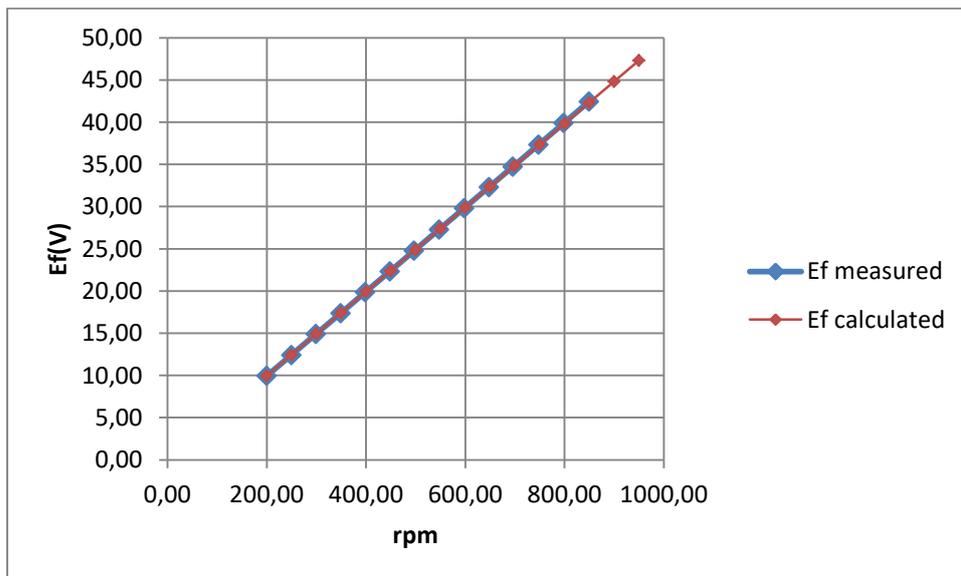
n(rpm)	E_{fa}(V)	E_{fb}(V)	E_{fc}(V)	E_{favg}(V)
200,09	9,82	10,04	9,99	9,95
249,78	12,26	12,53	12,48	12,42
298,85	14,69	15,02	14,95	14,88
349,31	17,15	17,54	17,45	17,38
398,63	19,60	20,04	19,94	19,86
448,36	22,04	22,54	22,42	22,33
497,04	24,45	25,00	24,86	24,77
547,21	26,93	27,54	27,38	27,28
597,94	29,43	30,09	29,92	29,82
648,01	31,90	32,62	32,43	32,32
696,17	34,29	35,06	34,86	34,74
747,53	36,84	37,67	37,45	37,32
798,59	39,37	40,26	40,03	39,89
849,52	41,90	42,85	42,60	42,45

Πίνακας 9.2: Η φασική ΗΕΔ σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής για τη γεννήτρια χωρίς πυρήνα μονού δρομέα

Στο σχήμα 9.3 φαίνεται η σχέση της μετρούμενης και της υπολογιζόμενης με βάση την προσομοίωση ΗΕΔ με την ταχύτητα περιστροφής για τη γεννήτρια μονού δρομέα χωρίς πυρήνα.



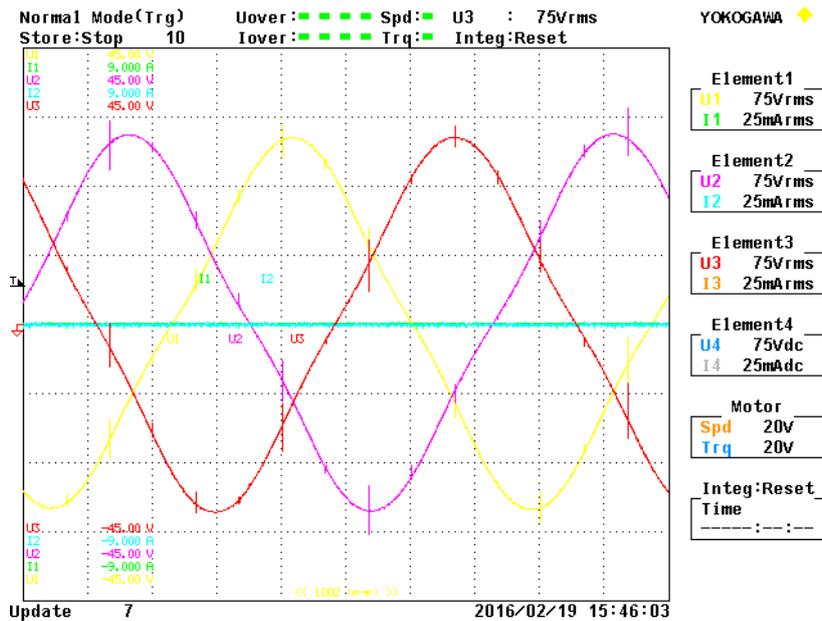
(a)



(β)

Σχήμα 9.3: (α) Η φασική ΗΕΔ σε συνάρτηση με την ταχύτητα περιστροφής για τη γεννήτρια χωρίς πυρήνα με μηχανικό διάκενο 2 χιλιοστά (β) σε σύγκριση με την υπολογιζόμενη ΗΕΔ.

Όπως φαίνεται στις παραπάνω γραφικές παραστάσεις δεν υπάρχει μεγάλη απόκλιση μεταξύ των προσομοιώσεων και των μετρήσεων.



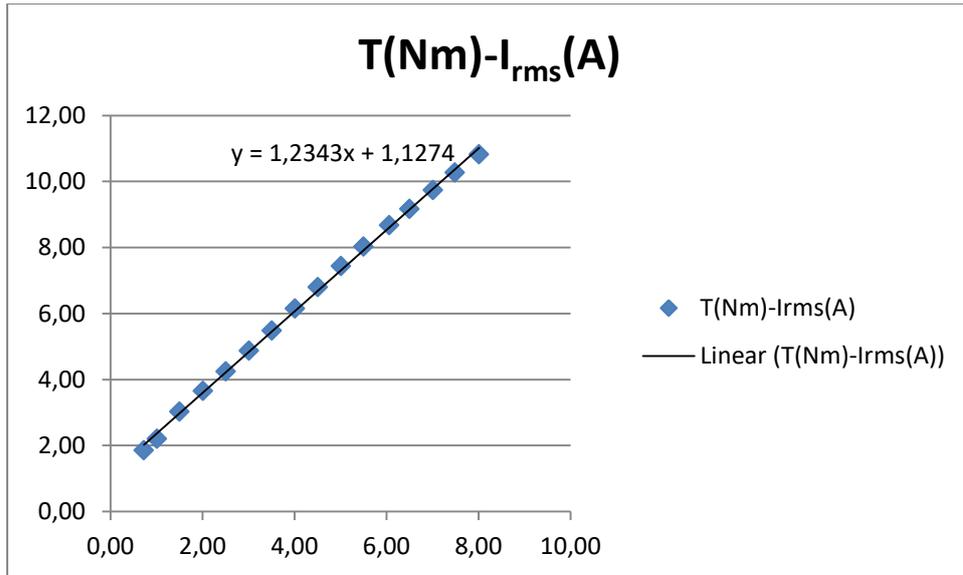
Σχήμα 9.4: Κυματομορφή της ΗΕΔ στις τρεις φάσεις όταν η γεννήτρια χωρίς πυρήνα μονού δρομέα στρέφεται στις ονομαστικές στροφές

9.2.1.2 Μέτρηση υπό μεταβαλλόμενο ωμικό φορτίο

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η μεταβολή της μηχανικής ροπής σε σχέση με το ρεύμα.

T(Nm)	I _{rms} (A)
1,85	0,73
2,21	1,01
3,03	1,50
3,66	2,01
4,24	2,50
4,87	3,01
5,48	3,51
6,15	4,01
6,80	4,51
7,43	5,01
8,03	5,50
8,67	6,06
9,17	6,50
9,74	7,01
10,27	7,49
10,82	8,01

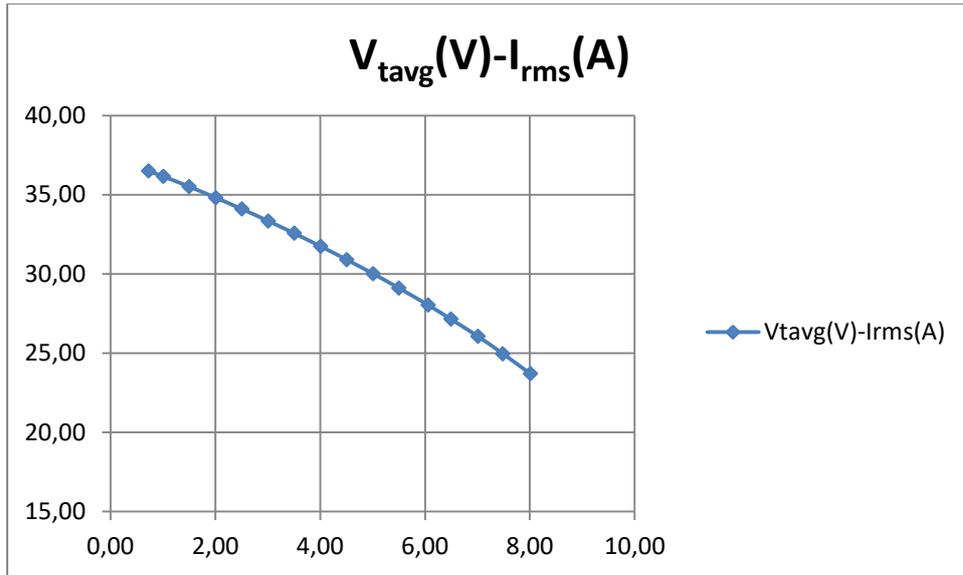
Πίνακας 9.3: Οι τιμές της ροπής σε σχέση με το ρεύμα για σταθερές στροφές 750 σ.α.λ.



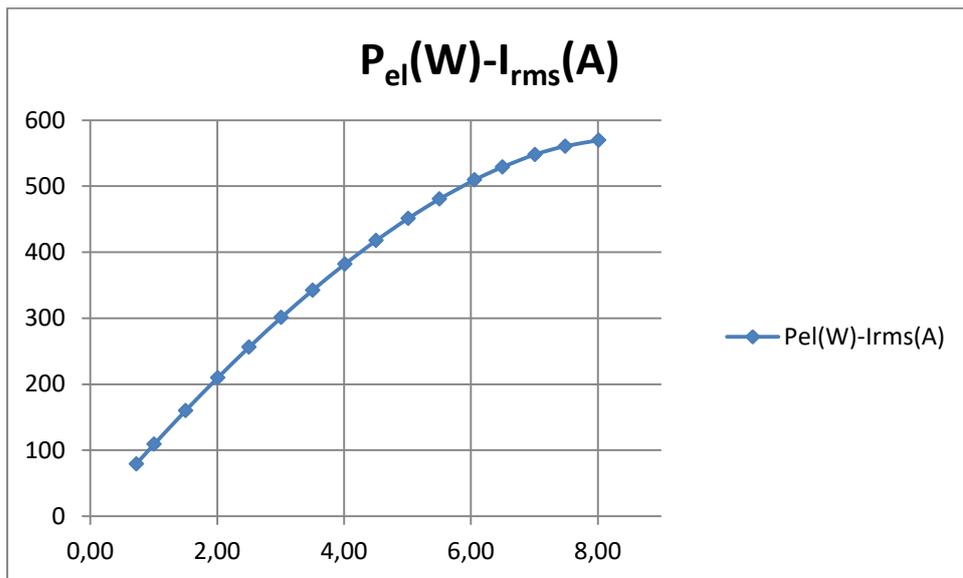
Σχήμα 9.5: Γραφική παράσταση της μηχανικής ροπής σε συνάρτηση με το ρεύμα για σταθερή ταχύτητα περιστροφής 750 σ.α.λ.

I(A)	V _{ta} (V)	V _{tb} (V)	V _{tc} (V)	V _{tavg} (V)
0,73	35,99	36,82	36,66	36,49
1,01	35,65	36,48	36,33	36,15
1,50	35,00	35,84	35,69	35,51
2,01	34,30	35,13	35,00	34,81
2,50	33,59	34,42	34,29	34,10
3,01	32,83	33,65	33,53	33,33
3,51	32,05	32,87	32,76	32,56
4,01	31,23	32,04	31,94	31,74
4,51	30,38	31,20	31,11	30,90
5,01	29,49	30,31	30,22	30,01
5,50	28,58	29,40	29,33	29,10
6,06	27,50	28,33	28,27	28,04
6,50	26,59	27,43	27,39	27,14
7,01	25,50	26,35	26,33	26,06
7,49	24,38	25,25	25,25	24,96
8,01	23,09	23,98	24,00	23,69

Πίνακας 9.4: Η τερματική τάση, το ρεύμα και η ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας για σταθερές στροφές 750 σ.α.λ.



Σχήμα 9.6: Γραφική παράσταση της τερματικής τάσης σε συνάρτηση με το ρεύμα για σταθερή ταχύτητα περιστροφής 750 σ.α.λ

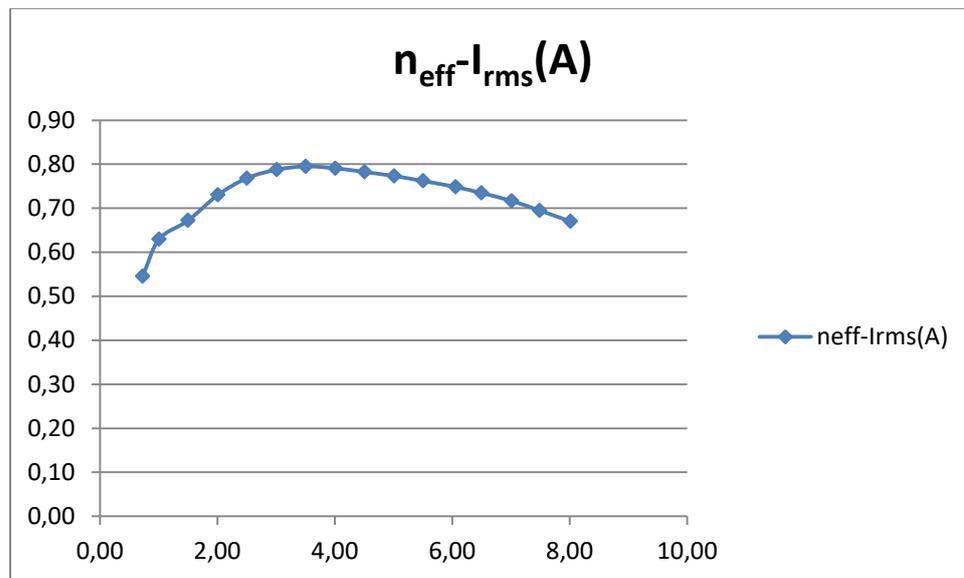


Σχήμα 9.7: Γραφική παράσταση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος σε συνάρτηση με το ρεύμα για σταθερή ταχύτητα περιστροφής 750 σ.α.λ

T(Nm)	I_{rms}(A)	V_{tavg}(V)	P_{el}(W)	P_{mech}(W)	n_{eff}
1,85	0,73	36,49	79,41	145,60	0,55
2,21	1,01	36,15	109,12	173,33	0,63
3,03	1,50	35,51	159,88	237,88	0,67
3,66	2,01	34,81	209,70	287,17	0,73
4,24	2,50	34,10	256,15	333,35	0,77
4,87	3,01	33,33	301,14	382,35	0,79
5,48	3,51	32,56	342,40	430,66	0,80
6,15	4,01	31,74	381,87	482,95	0,79

6,80	4,51	30,90	417,78	533,94	0,78
7,43	5,01	30,01	451,32	583,71	0,77
8,03	5,50	29,10	480,45	630,57	0,76
8,67	6,06	28,04	509,59	680,96	0,75
9,17	6,50	27,14	528,98	720,11	0,73
9,74	7,01	26,06	548,00	764,60	0,72
10,27	7,49	24,96	560,63	806,84	0,69
10,82	8,01	23,69	569,48	849,77	0,67

Πίνακας 9.5: Εύρεση της απόδοσης για λειτουργία υπό τριφασικό φορτίο στις 750 σ.α.λ.



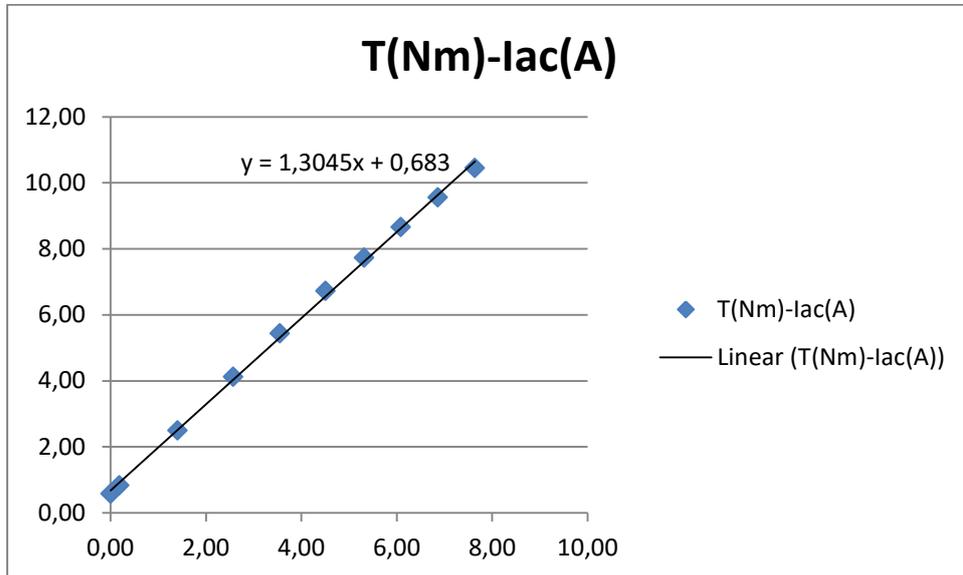
Σχήμα 9.8: Η μεταβολή της απόδοσης για μεταβαλλόμενο ρεύμα για σταθερή ταχύτητα περιστροφής 750 σ.α.λ

9.2.1.3. Μέτρηση με απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές

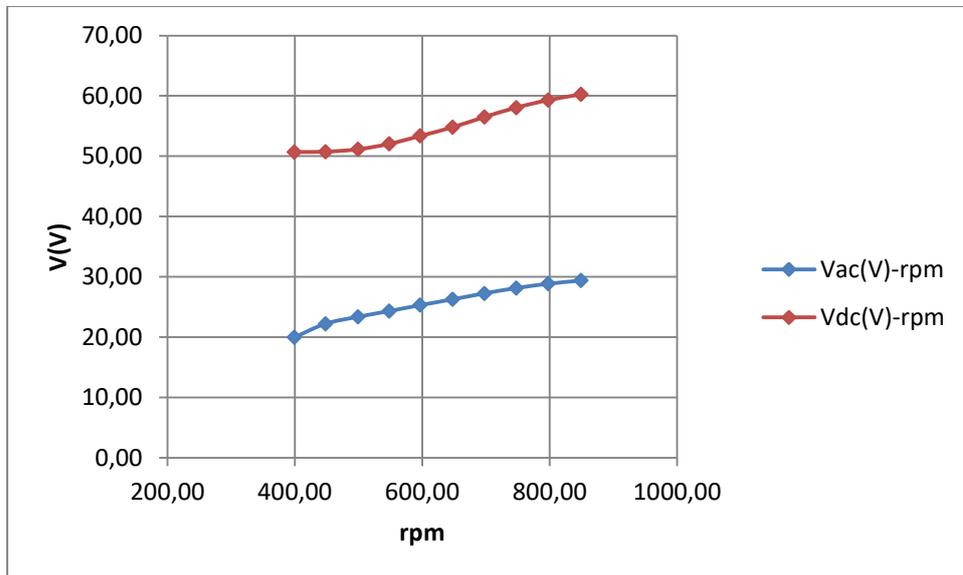
rpm	T(N·m)	V _{acavg} (V)	I _{ac} (A)	V _{dc} (V)	I _{dc} (A)	P _{el} (W)	P _{mech} (W)	eff
399,45	0,58	19,97	0,00	50,70	0,02	0,00	24,23	0,00
448,02	0,83	22,21	0,19	50,74	0,25	12,40	38,84	0,32
499,06	2,49	23,36	1,40	51,14	1,84	98,34	130,29	0,75
548,45	4,12	24,32	2,57	52,05	3,40	187,50	236,76	0,79
596,70	5,43	25,29	3,55	53,35	4,73	269,33	339,52	0,79
647,64	6,72	26,25	4,51	54,80	6,05	355,21	455,59	0,78
697,58	7,72	27,24	5,31	56,50	7,16	434,32	564,23	0,77
747,58	8,66	28,13	6,09	58,06	8,24	513,56	677,73	0,76
797,83	9,55	28,84	6,86	59,31	9,31	593,28	798,05	0,74

849,37	10,44	29,38	7,64	60,25	10,40	673,28	929,00	0,72
--------	-------	-------	------	-------	-------	--------	--------	------

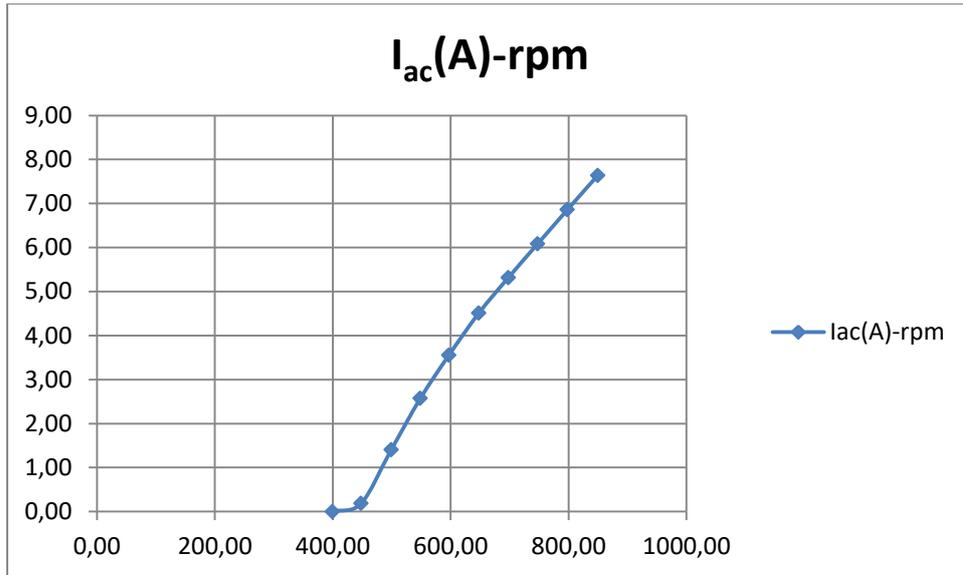
Πίνακας 9.6: Μετρήσεις και υπολογισμοί από το πείραμα με συσσωρευτές για τη γεννήτρια χωρίς πυρήνα με 2 χιλιοστά μηχανικό διάκενο



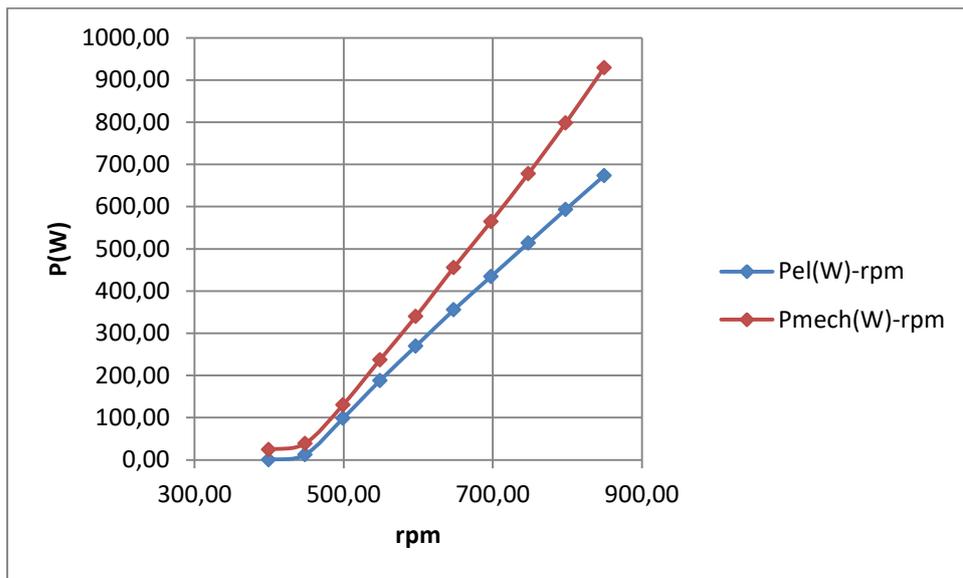
Σχήμα 9.9: Η μηχανική ροπή της γεννήτριας με μηχανικό διάκενο 2 χιλιοστά σε σχέση με το ρεύμα γραμμής.



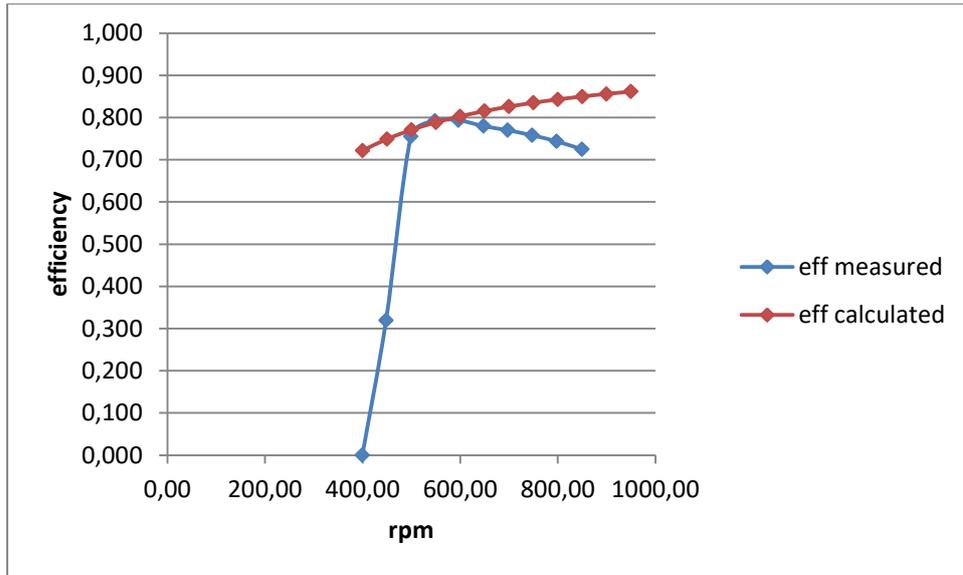
Σχήμα 9.10: Η τερματική τάση (dc και ac) της γεννήτριας με μηχανικό διάκενο 2 χιλιοστά σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής.



Σχήμα 9.11: Το ρεύμα της γεννήτριας με μηχανικό διάκενο 2 χιλιοστά σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής.

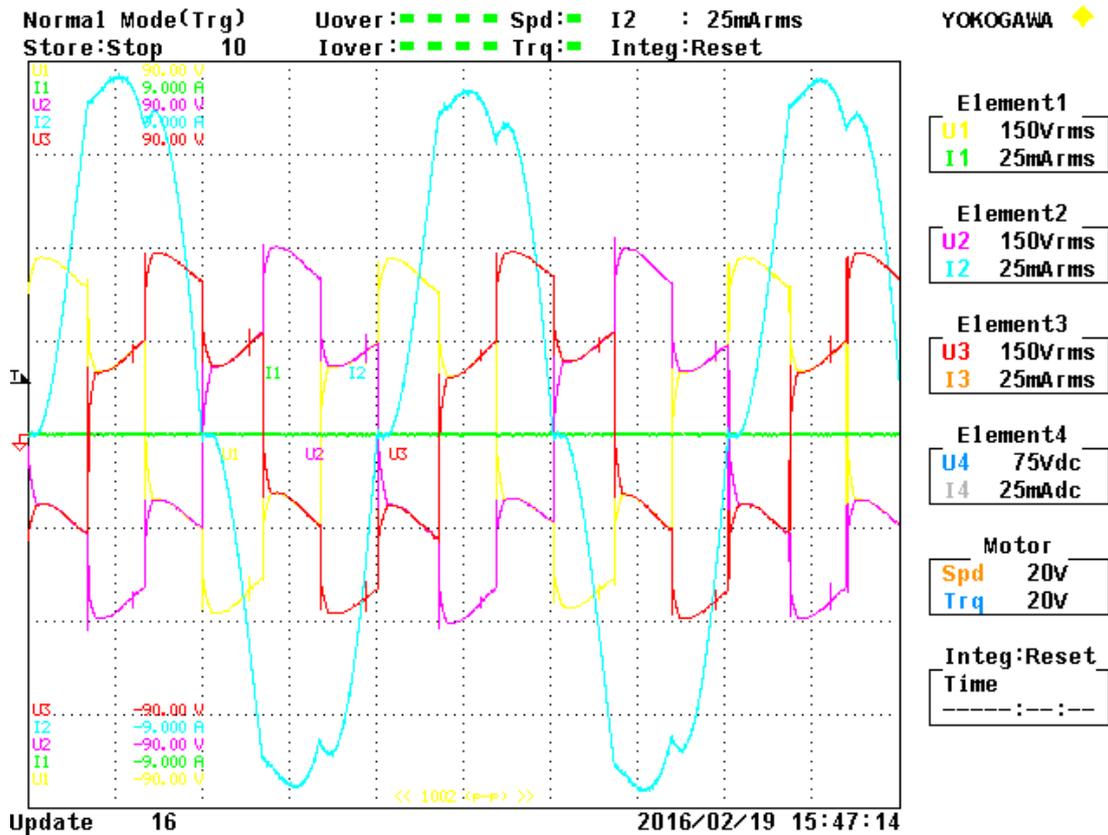


(a)



(β)

Σχήμα 9.12: (α) Η μηχανική και η ηλεκτρική ισχύς σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής. (β) Η μετρούμενη και η υπολογιζόμενη απόδοση της μηχανής σε σχέση με τις σ.α.λ.



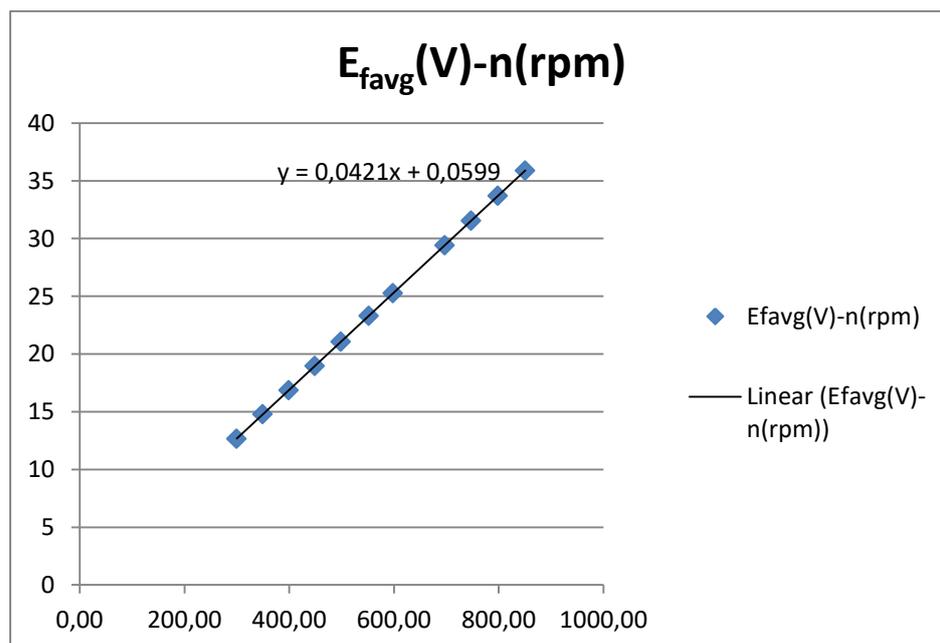
Σχήμα 9.13: Η κυματομορφή των τερματικών τάσεων και του ρεύματος για ονομαστική ταχύτητα περιστροφής.

9.2.2. Μέτρηση της γεννήτριας με πυρήνα διπλού δρομέα

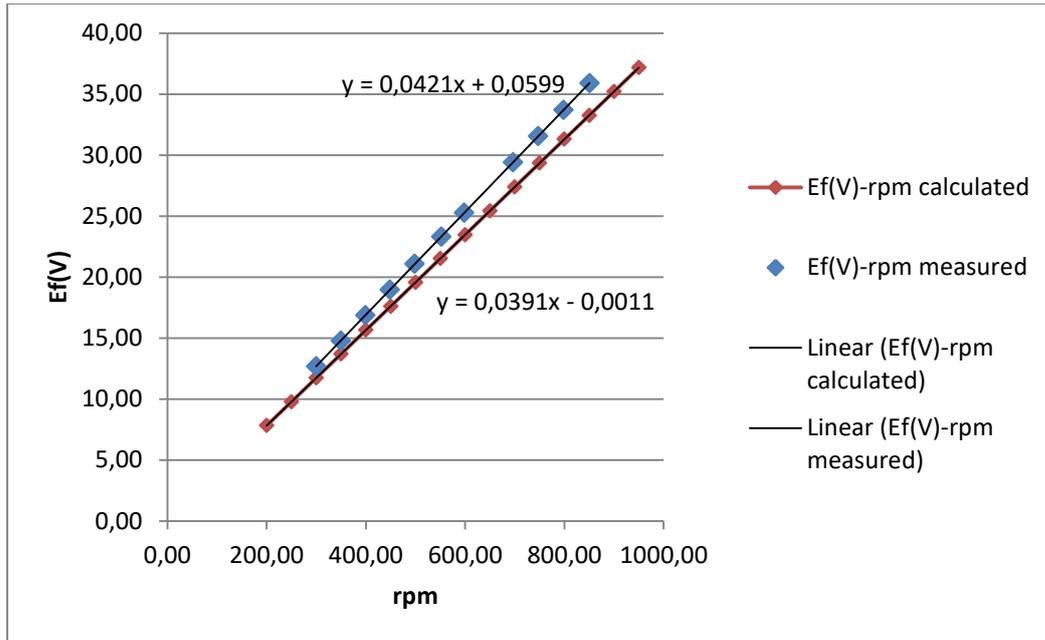
9.2.2.1 Μέτρηση υπό κενό φορτίο

n(rpm)	E _{fa} (V)	E _{fb} (V)	E _{fc} (V)	E _{favg} (V)
299,67	12,61	12,80	12,60	12,67
349,53	14,71	14,93	14,69	14,78
398,78	16,79	17,04	16,76	16,86
448,59	18,88	19,16	18,85	18,96
498,36	20,97	21,29	20,93	21,06
551,72	23,22	23,56	23,16	23,31
598,26	25,16	25,53	25,11	25,26
696,71	29,28	29,72	29,23	29,41
747,47	31,41	31,88	31,35	31,55
798,37	33,55	34,04	33,48	33,69
850,63	35,74	36,26	35,67	35,89

Πίνακας 9.7: Η φασική ΗΕΔ σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής για τη γεννήτρια διπλού δρομέα με πυρήνα

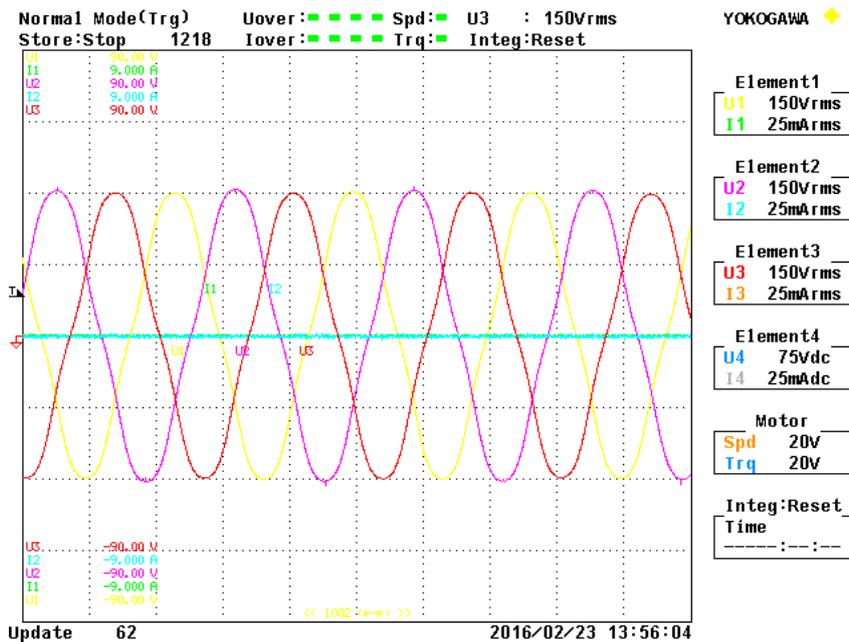


(α)



(β)

Σχήμα 9.14: (α) Η φασική ΗΕΔ σε συνάρτηση με την ταχύτητα περιστροφής για τη γεννήτρια διπλού δρομέα με πυρήνα (β) σύγκριση με προσομοίωση



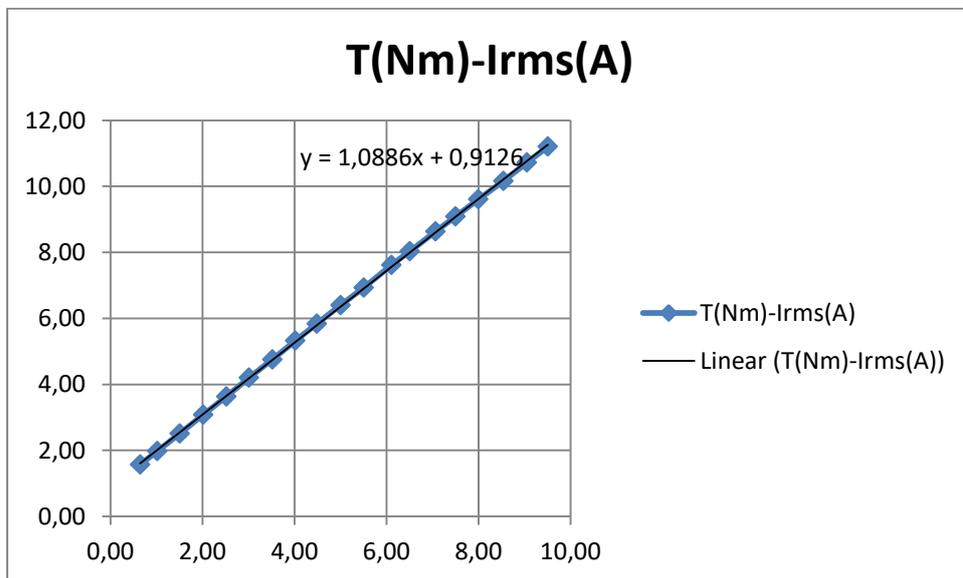
Σχήμα 9.15: Κυματομορφή της ΗΕΔ στις τρεις φάσεις όταν η γεννήτρια διπλού δρομέα με πυρήνα στρέφεται στις ονομαστικές στροφές

Σε σχέση με την προσομοίωση, η γραφική παράσταση της μέτρησης έχει μεγαλύτερη κλίση, το οποίο σημαίνει ότι για να πετύχει την ίδια ΗΕΔ θα πρέπει να λειτουργήσει σε περισσότερες στροφές, σε σχέση με την προσομοίωση.

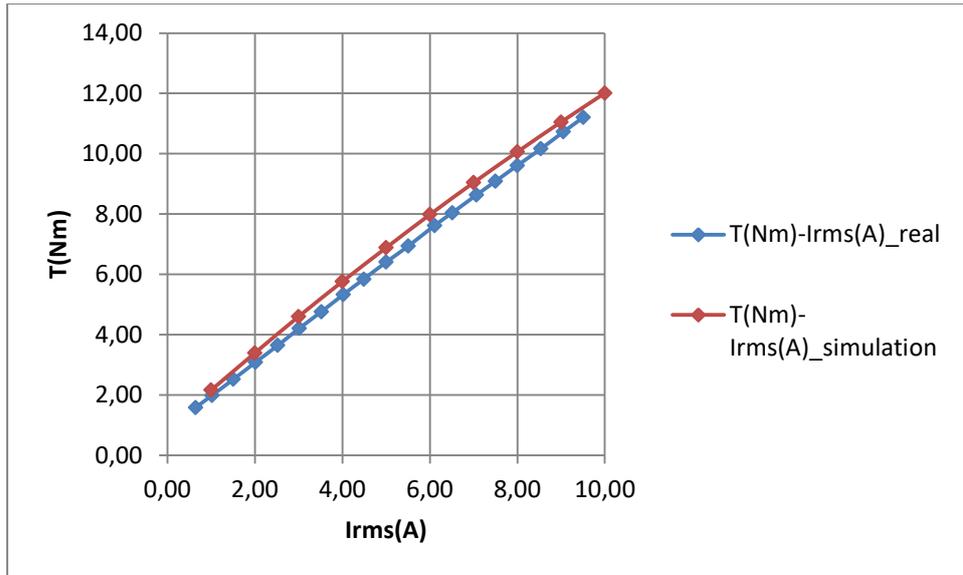
9.2.2.2 Μέτρηση υπό μεταβαλλόμενο ωμικό φορτίο για τη γεννήτρια διπλού δρομέα με πυρήνα

T(Nm)	I(A)
1,58	0,64
1,98	1,02
2,52	1,51
3,08	2,02
3,64	2,52
4,20	3,01
4,76	3,52
5,32	4,02
5,84	4,49
6,40	5,00
6,94	5,51
7,62	6,11
8,04	6,51
8,63	7,07
9,09	7,50
9,61	8,00
10,16	8,54
10,72	9,05
11,20	9,51

Πίνακας 9.8: Οι τιμές της ροπής σε σχέση με το ρεύμα για σταθερές στροφές 750 σ.α.λ.



(a)



(β)

Σχήμα 9.16: (α) Γραφική παράσταση της μηχανικής ροπής σε συνάρτηση με το ρεύμα για σταθερή ταχύτητα περιστροφής 750 σ.α.λ. (β) Αναπαράσταση σε σύγκριση με την υπολογιζόμενη από την προσομοίωση

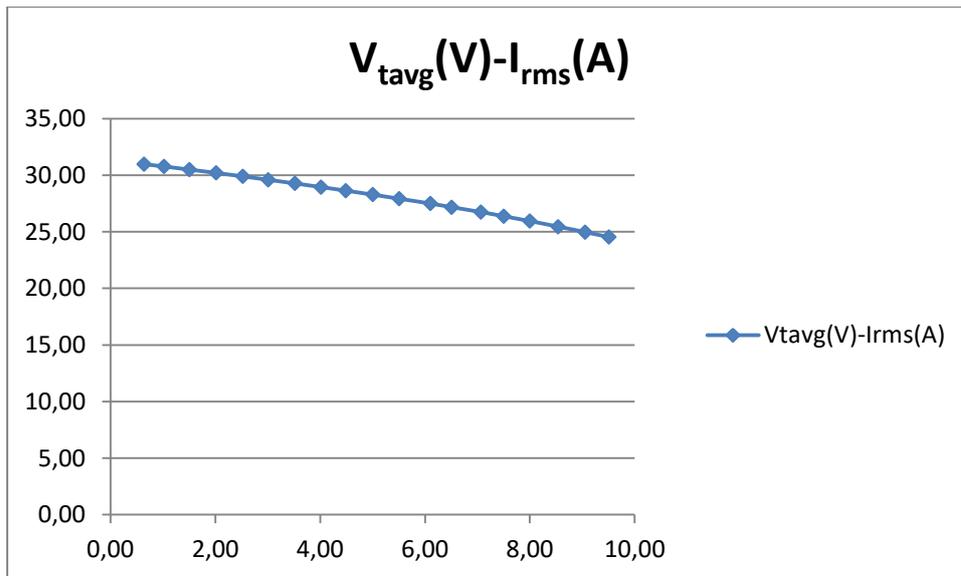
Οι διαφορές της μετρούμενης και της πραγματικής ροπής σε συνάρτηση με το ρεύμα δεν είναι μεγάλη όπως φαίνεται από τη γραφική παράσταση. Στο αντίστοιχο πείραμα με τη γεννήτρια μονού δρομέα χωρίς πυρήνα διαπιστώνουμε ότι η κλίση της γραφικής παράστασης είναι μεγαλύτερη. Αυτό σημαίνει ότι στη γεννήτρια διπλού δρομέα με πυρήνα χρειαζόμαστε λιγότερη ροπή για να παραχθεί η αντίστοιχη ποσότητα ρεύματος, το οποίο συμβαίνει λόγω της ενίσχυσης του πεδίου που προκύπτει από την ύπαρξη σιδήρου στον πυρήνα του στάτη. Ο πυρήνας σιδήρου εμφανίζει μεγαλύτερες απώλειες αλλά ενισχύει το πεδίο.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι μετρούμενες τιμές του ρεύματος και των τερματικών τάσεων της γεννήτριας.

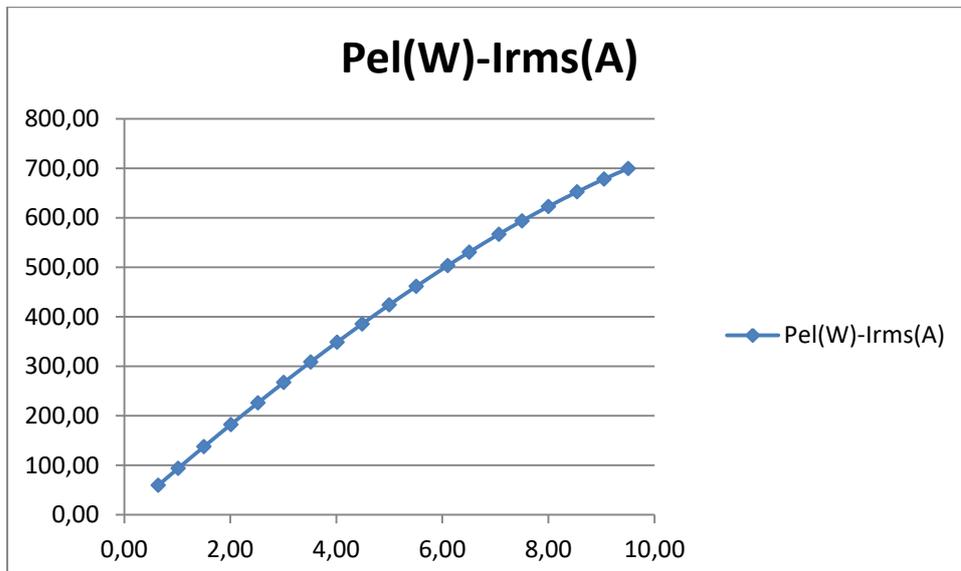
I (A)	V _{ta} (V)	V _{tb} (V)	V _{tc} (V)	V _{tavg} (V)
0,64	30,86	31,28	30,78	30,97
1,02	30,65	31,08	30,58	30,77
1,51	30,38	30,80	30,30	30,49
2,02	30,08	30,51	30,01	30,20
2,52	29,78	30,20	29,70	29,89
3,01	29,48	29,89	29,40	29,59
3,52	29,16	29,57	29,08	29,27
4,02	28,83	29,24	28,76	28,95
4,49	28,52	28,92	28,45	28,63
5,00	28,17	28,57	28,10	28,28
5,51	27,81	28,20	27,75	27,92
6,11	27,38	27,77	27,33	27,49
6,51	27,06	27,45	27,01	27,17
7,07	26,63	27,00	26,59	26,74

7,50	26,26	26,63	26,23	26,37
8,00	25,83	26,19	25,81	25,94
8,54	25,33	25,70	25,33	25,45
9,05	24,85	25,21	24,86	24,97
9,51	24,40	24,76	24,42	24,53

Πίνακας 9.9: Η τερματική τάση, το ρεύμα και η ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας για σταθερές στροφές 750 σ.α.λ.



Σχήμα 9.17: Γραφική παράσταση της τερματικής τάσης σε συνάρτηση με το ρεύμα για σταθερή ταχύτητα περιστροφής 750 σ.α.λ

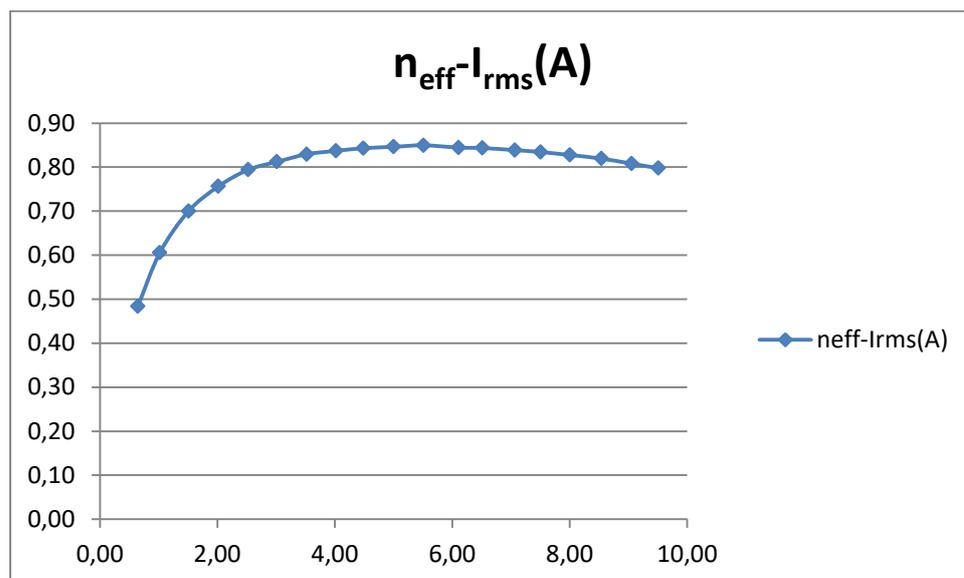


Σχήμα 9.18: Γραφική παράσταση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος σε συνάρτηση με το ρεύμα για σταθερή ταχύτητα περιστροφής 750 σ.α.λ

T(Nm)	I_{rms}(A)	V_{avg}(V)	P_{el}(W)	P_{mech}(W)	η_{eff}
1,58	0,64	30,97	59,71	123,53	0,48

1,98	1,02	30,77	94,07	155,31	0,61
2,52	1,51	30,49	137,85	196,96	0,70
3,08	2,02	30,20	182,61	241,46	0,76
3,64	2,52	29,89	226,23	284,92	0,79
4,20	3,01	29,59	267,16	329,00	0,81
4,76	3,52	29,27	309,01	372,59	0,83
5,32	4,02	28,95	348,85	416,78	0,84
5,84	4,49	28,63	385,45	457,22	0,84
6,40	5,00	28,28	424,32	501,43	0,85
6,94	5,51	27,92	461,41	543,07	0,85
7,62	6,11	27,49	503,52	596,25	0,84
8,04	6,51	27,17	530,71	629,22	0,84
8,63	7,07	26,74	566,88	675,93	0,84
9,09	7,50	26,37	593,62	711,47	0,83
9,61	8,00	25,94	622,67	752,34	0,83
10,16	8,54	25,45	652,12	795,77	0,82
10,72	9,05	24,97	678,36	839,60	0,81
11,20	9,51	24,53	699,66	877,16	0,80

Πίνακας 9.10: Εύρεση της απόδοσης για λειτουργία υπό τριφασικό φορτίο στις 750 σ.α.λ.



Σχήμα 9.19: Η μεταβολή της απόδοσης για μεταβαλλόμενο ρεύμα για σταθερή ταχύτητα περιστροφής 750 σ.α.λ

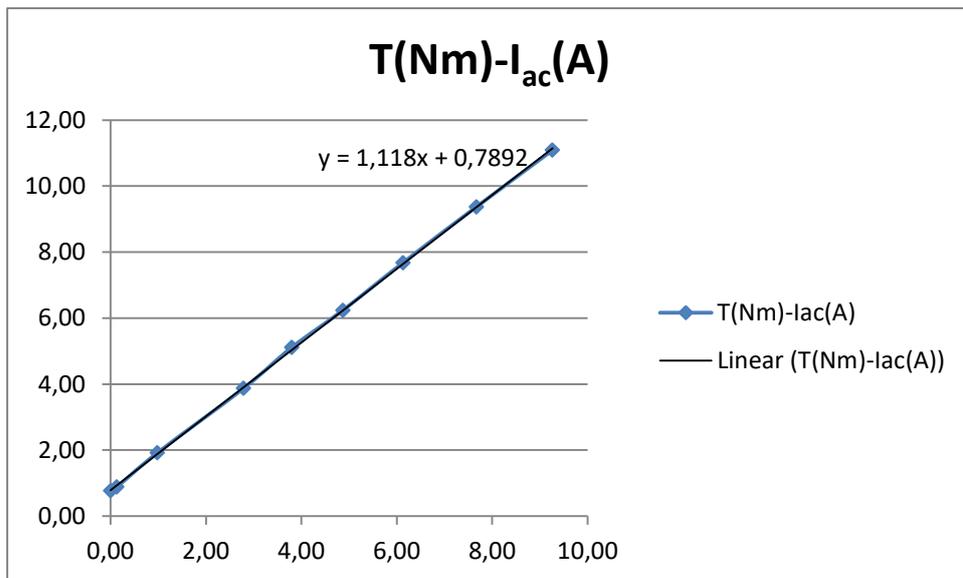
Η γεννήτρια διπλού δρομέα απέδωσε υψηλότερη ηλεκτρική ισχύ με μεγαλύτερη μέγιστη απόδοση σε σχέση με την πρώτη γεννήτρια. Το σημείο μέγιστης απόδοσης της συγκεκριμένης γεννήτριας ήταν για λίγο μεγαλύτερη τιμή ρεύματος ως προς την γεννήτρια χωρίς πυρήνα όπως φαίνεται και στον πίνακα 9.10.

9.2.2.3. Μέτρηση με απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές

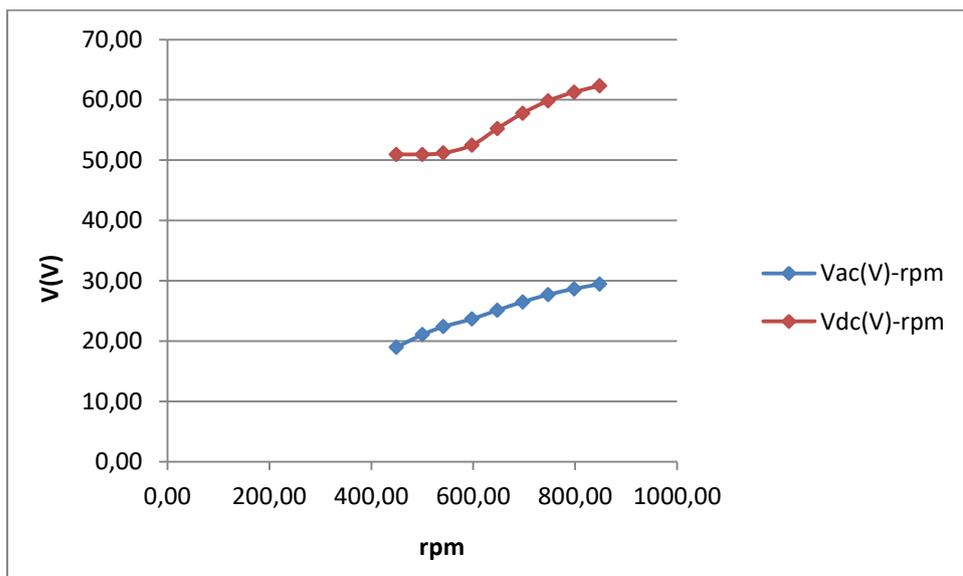
rpm	T(Nm)	V _{ac} (V)	I _{ac} (A)	V _{dc} (V)	I _{dc} (A)	P _{el} (W)	P _{mech} (W)	eff
-----	-------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	-----------------------	-----

449,32	0,77	18,96	0,00	50,97	0,02	0,00	36,26	0,00
500,08	0,88	21,06	0,13	50,96	0,08	8,12	46,27	0,18
541,59	1,92	22,38	0,98	51,18	1,04	65,97	108,88	0,61
597,18	3,87	23,65	2,79	52,47	3,37	197,79	242,14	0,82
647,33	5,11	25,12	3,80	55,25	4,68	286,28	346,58	0,83
697,16	6,24	26,50	4,87	57,79	6,06	386,99	455,44	0,85
746,95	7,68	27,69	6,13	59,84	7,71	509,15	600,64	0,85
798,23	9,37	28,66	7,67	61,29	9,75	659,58	783,52	0,84
848,32	11,09	29,43	9,26	62,32	11,87	817,92	984,98	0,83

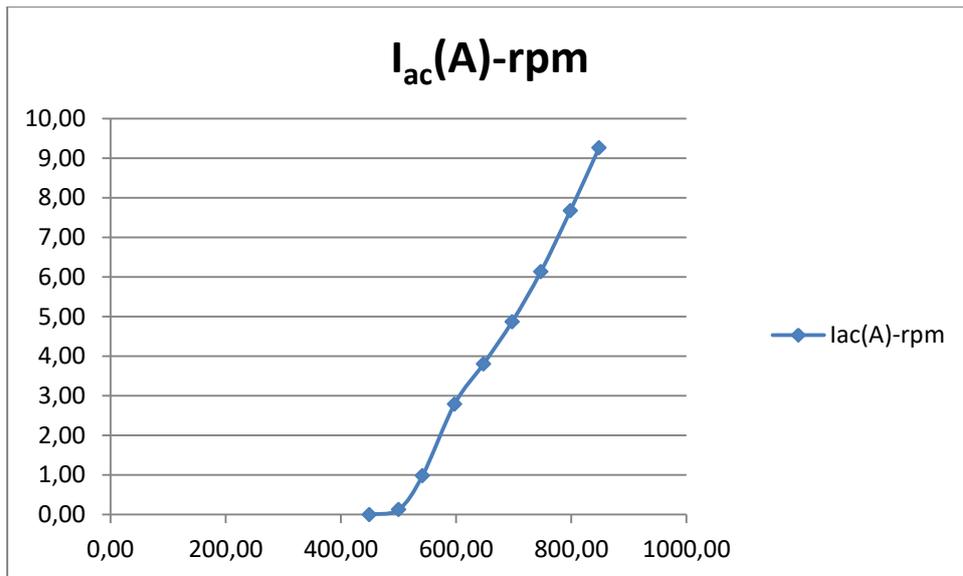
Πίνακας 9.11: Μετρήσεις και υπολογισμοί από το πείραμα με συσσωρευτές για τη γεννήτρια διπλού δρομέα με πυρήνα.



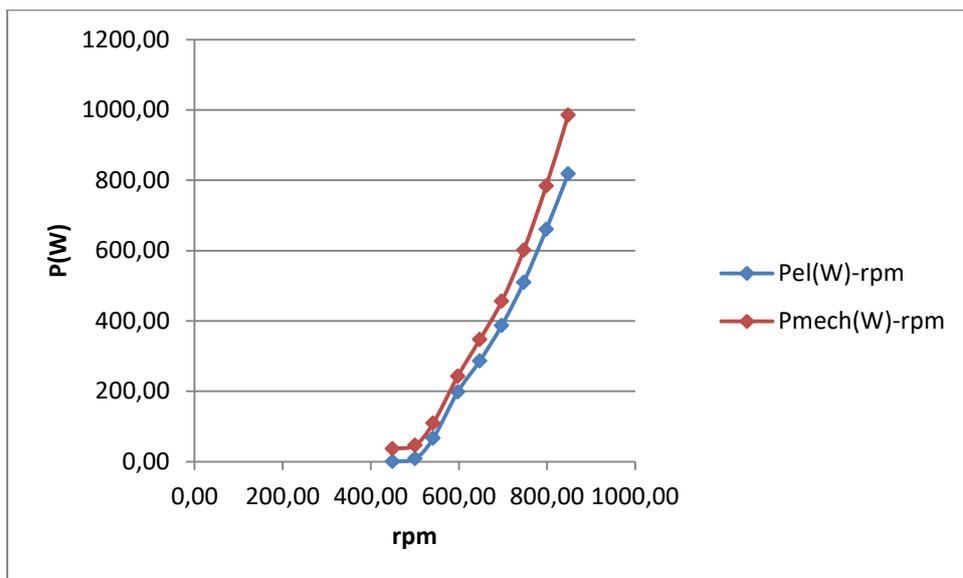
Σχήμα 9.20: Η μηχανική ροπή της γεννήτριας σε σχέση με το ρεύμα γραμμής.



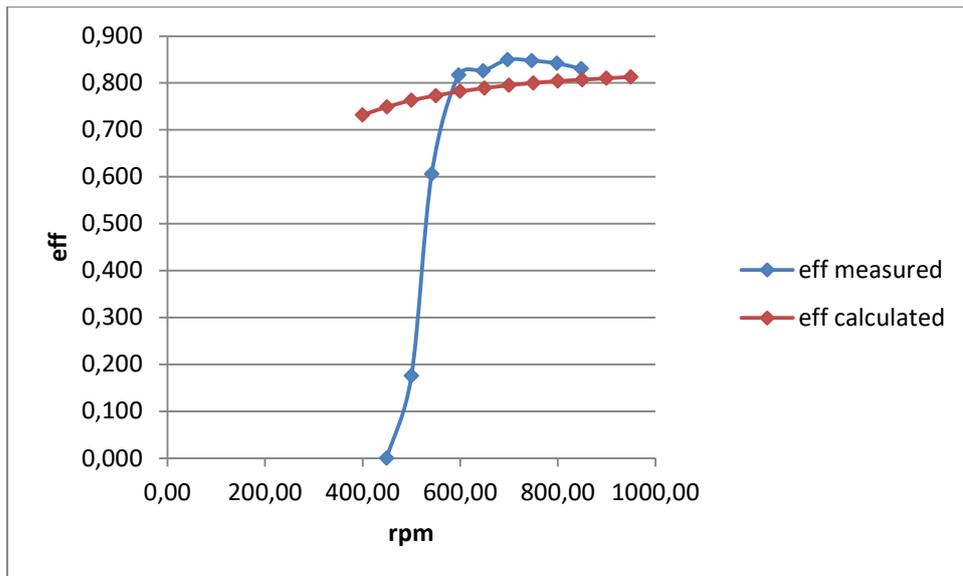
Σχήμα 9.21: Η τερματική τάση (dc και ac) της γεννήτριας σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής.



Σχήμα 9.22: Το ρεύμα της γεννήτριας σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής.

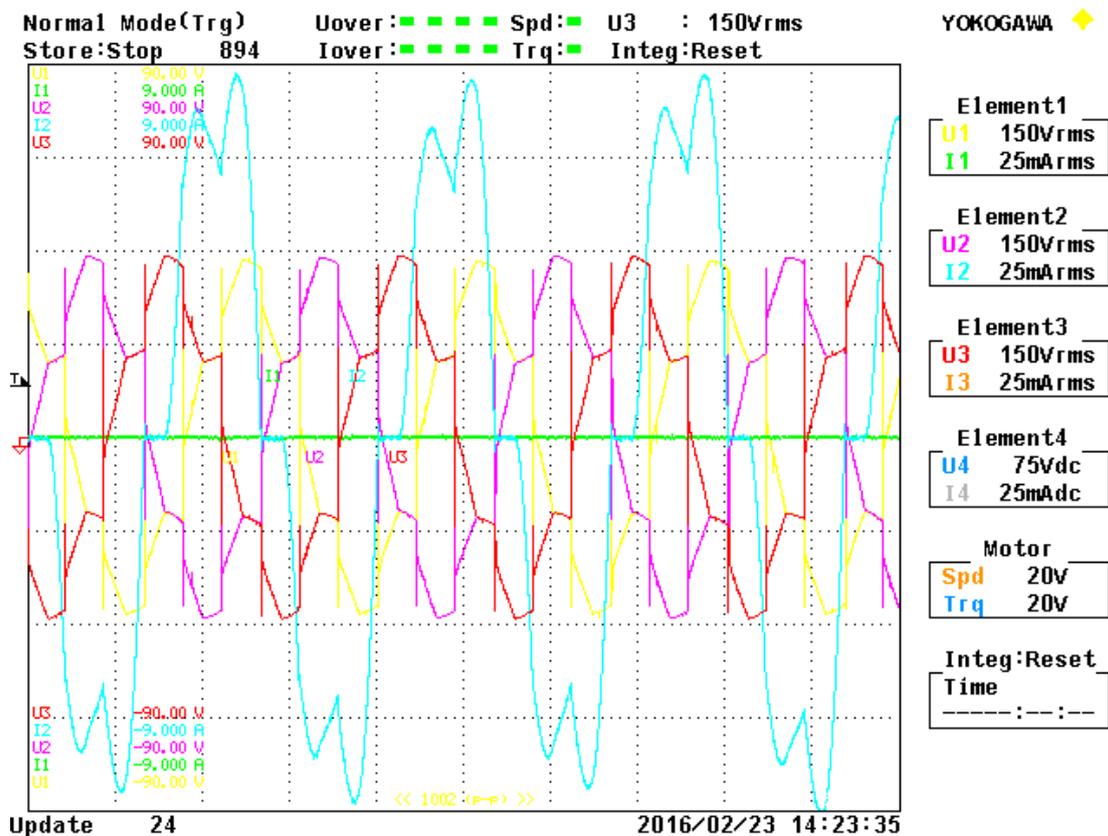


(a)



(β)

Σχήμα 9.23: (α) Η μηχανική και η ηλεκτρική ισχύς σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής. (β) Η μετρούμενη και η υπολογιζόμενη απόδοση της μηχανής σε σχέση με τις σ.α.λ.



Σχήμα 9.24: Η κυματομορφή των τερματικών τάσεων και του ρεύματος για ονομαστική ταχύτητα περιστροφής.

Η μετρούμενη απόδοση είχε μεγαλύτερη τιμή σε σχέση με την υπολογιζόμενη απόδοση. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί λόγω της μη ακρίβειας στη μέτρηση της ροπής. Το ροπόμετρο όπως

έχει αναφερθεί μετρά με σφάλμα γύρω στο 5% , με αποτέλεσμα να μην έχουμε μεγάλη ακρίβεια στη μέτρηση της μηχανικής ροπής και επομένως και της μηχανικής ισχύος. Η κυματομορφή δεν είναι καθαρό ημίτονο λόγω των αρμονικών του ανορθωτή.

9.2.2.4. Μέτρηση της αντίστασης του τυλίγματος του στάτη για τη γεννήτρια διπλού δρομέα

Μετά το τέλος των μετρήσεων και όσο η γεννήτρια ήταν ακόμα ζεστή γύρω στους 29°C με θερμοκρασία περιβάλλοντος στους 16°C, θεωρήθηκε σκόπιμο να μετρηθεί η αντίσταση των τυλιγμάτων της. Αποσυνδέεται τελείως η γεννήτρια και με ένα τροφοδοτικό δίνονται κάποια ρεύματα σε κάθε φάση και παρατηρείται η τάση που αναπτύσσει το τροφοδοτικό. Στη συνέχεια, με χρήση του νόμου του Ohm υπολογίζεται η τιμή της αντίστασης κάθε φάσης. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στον πίνακα 8.27.

Φάση Α			
V(V)	I(A)	R(ohm)	R_{Aavg}(ohm)
0,80	1,56	0,512821	0,512228
1,50	2,95	0,508475	
1,90	3,70	0,513514	
2,30	4,46	0,515695	
2,40	4,70	0,510638	
Φάση Β			
V(V)	I(A)	R(ohm)	R_{Bavg}(ohm)
0,8	1,77	0,451977	0,523518
1,50	2,72	0,551471	
1,90	3,52	0,539773	
2,30	4,24	0,542453	
2,50	4,70	0,531915	
Φάση C			
V(V)	I(A)	R(ohm)	R_{Cavg}(ohm)
0,6	1,01	0,594059	0,558523
1	1,89	0,529101	
1,3	2,3	0,565217	
1,7	3,06	0,555556	
2	3,61	0,554017	
2,6	4,7	0,553191	
R_{avg}(ohm)			

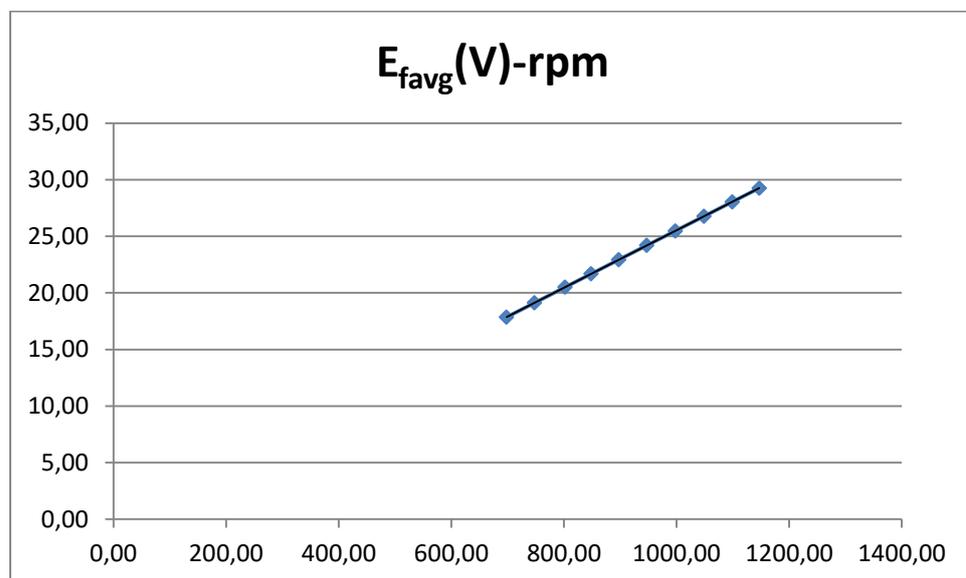
Πίνακας 9.12: Μέτρηση της αντίστασης κάθε φάσης της γεννήτριας

9.2.3. Μέτρηση της γεννήτριας με πυρήνα μονού δρομέα

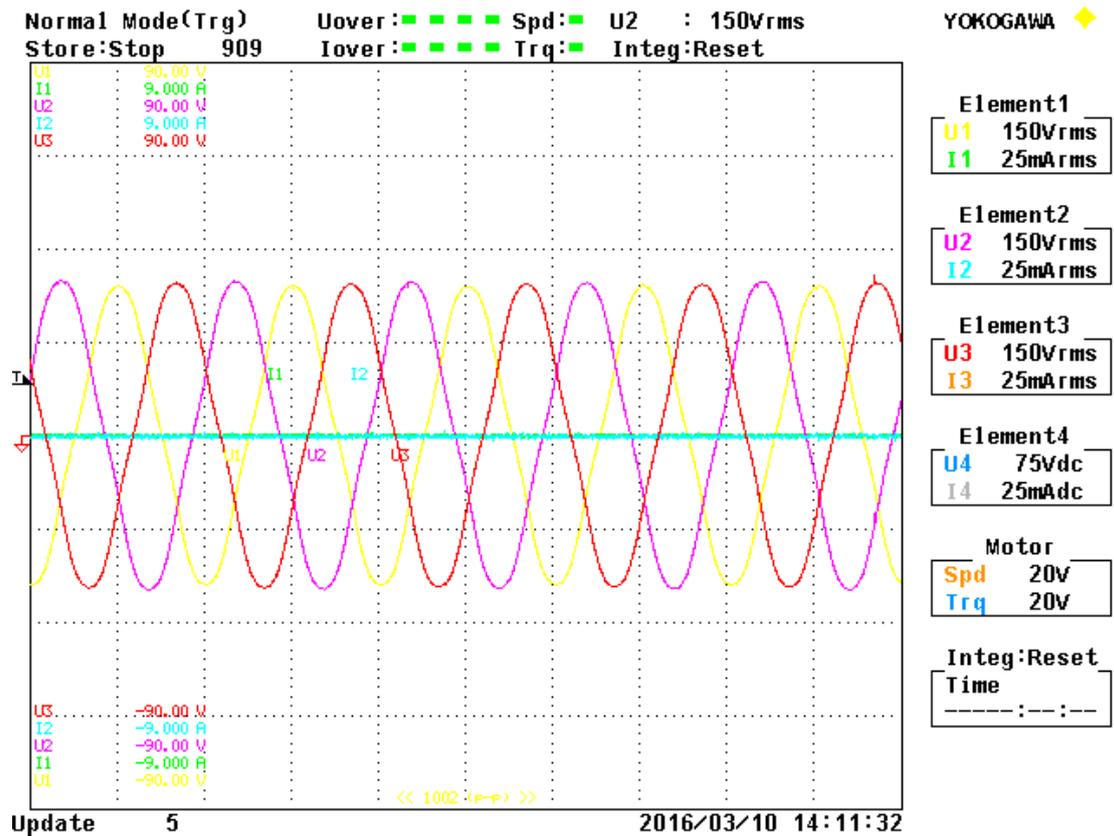
9.2.3.1 Μέτρηση υπό κενό φορτίο

n(rpm)	E _{fa} (V)	E _{fb} (V)	E _{fc} (V)	E _{favg} (V)
698,15	17,59	18,08	17,90	17,86
747,84	18,84	19,36	19,16	19,12
801,72	20,19	20,75	20,54	20,49
848,27	21,36	21,96	21,72	21,68
897,03	22,58	23,22	22,97	22,92
947,30	23,84	24,51	24,25	24,20
997,65	25,10	25,80	25,52	25,47
1048,56	26,37	27,11	26,82	26,76
1099,07	27,63	28,40	28,10	28,05
1146,76	28,83	29,63	29,31	29,25

Πίνακας 9.13: Η φασική ΗΕΔ σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής για τη γεννήτρια μονού δρομέα με πυρήνα



Σχήμα 9.25: Η φασική ΗΕΔ σε συνάρτηση με την ταχύτητα περιστροφής για τη γεννήτρια διπλού δρομέα με πυρήνα



Σχήμα 9.26: Κυματομορφή της ΗΕΔ στις τρεις φάσεις όταν η γεννήτρια μονού δρομέα με πυρήνα στρέφεται στις 1000 σ.α.λ.

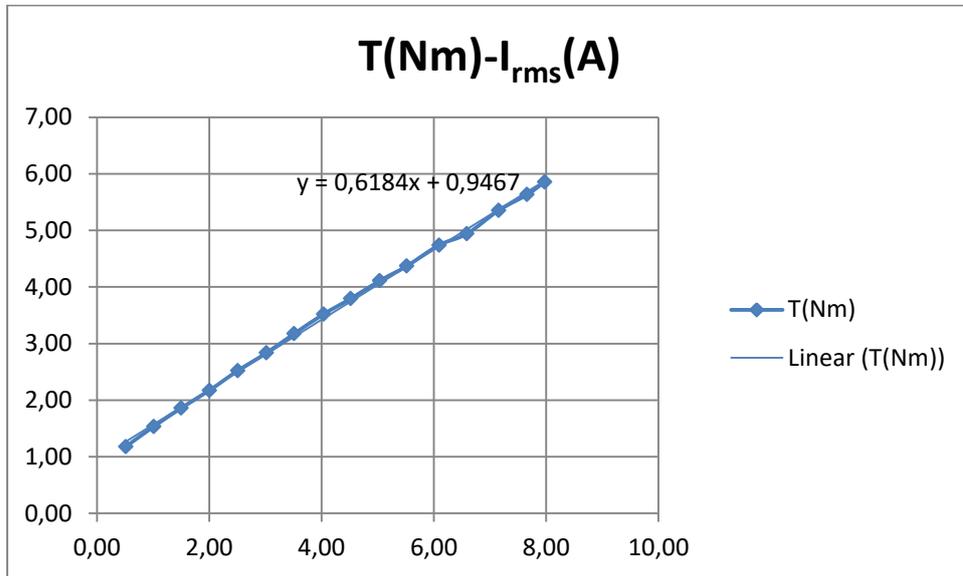
9.2.3.2 Μέτρηση υπό μεταβαλλόμενο ωμικό φορτίο

Μέτρηση στις 1000 σ.α.λ.

T(Nm)	I _{rms} (A)
1,18	0,51
1,53	1,01
1,86	1,50
2,17	2,00
2,52	2,51
2,83	3,02
3,17	3,51
3,52	4,04
3,79	4,52
4,11	5,04
4,37	5,52
4,74	6,09
4,94	6,59

5,35	7,15
5,63	7,66
5,85	7,97

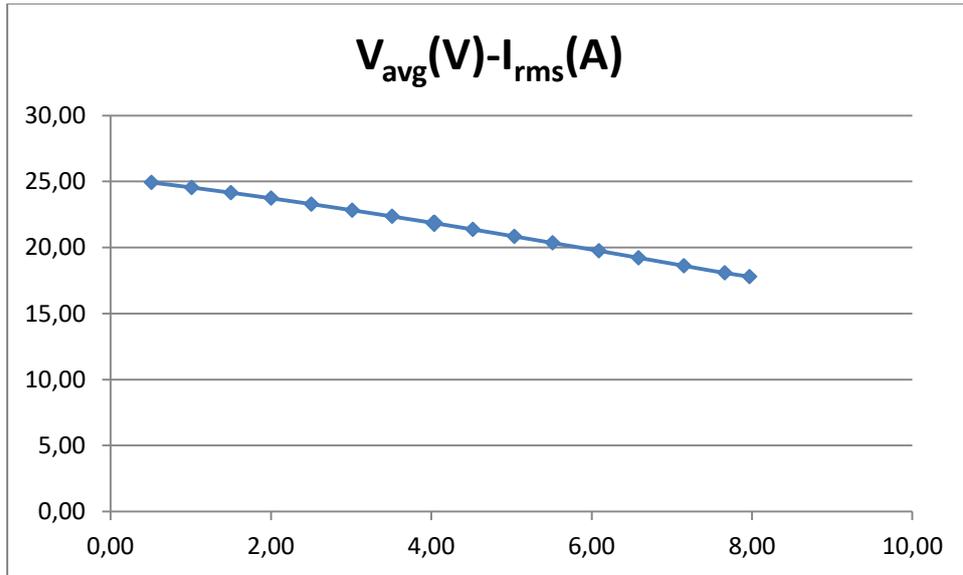
Πίνακας 9.14: Οι τιμές της ροπής σε σχέση με το ρεύμα για σταθερές στροφές 1000 σ.α.λ για τη γεννήτρια μονού δρομέα με πυρήνα



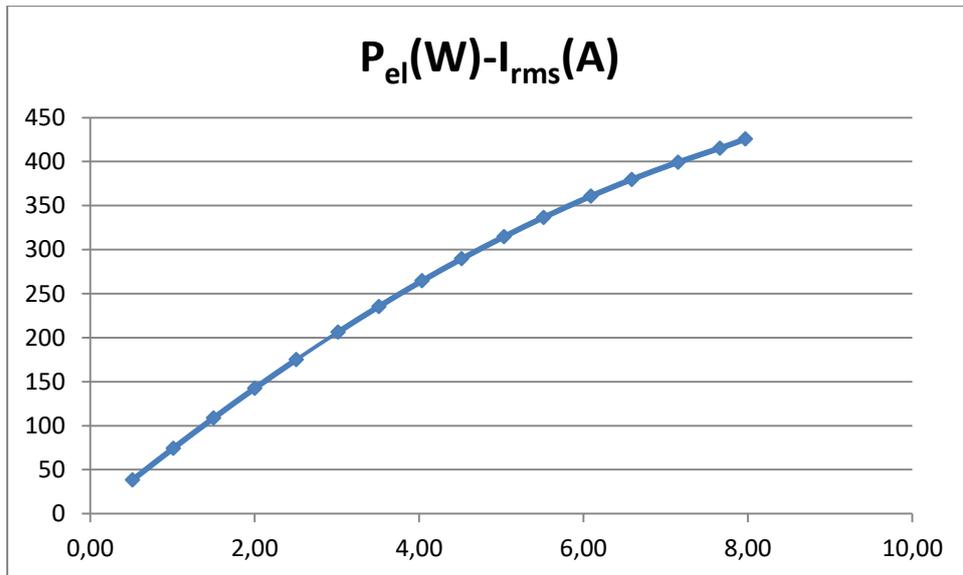
Σχήμα 9.27: Γραφική παράσταση της μηχανικής ροπής σε συνάρτηση με το ρεύμα για σταθερή ταχύτητα περιστροφής 1000 σ.α.λ

I(A)	V _{ta} (V)	V _{tb} (V)	V _{tc} (V)	V _{avg} (V)
0,51	24,55	25,25	24,97	24,92
1,01	24,18	24,86	24,60	24,55
1,50	23,79	24,47	24,20	24,15
2,00	23,37	24,03	23,78	23,73
2,51	22,94	23,58	23,34	23,29
3,02	22,48	23,11	22,88	22,82
3,51	22,02	22,63	22,41	22,35
4,04	21,53	22,11	21,91	21,85
4,52	21,06	21,62	21,43	21,37
5,04	20,54	21,08	20,91	20,84
5,52	20,06	20,57	20,41	20,35
6,09	19,47	19,96	19,80	19,75
6,59	18,96	19,43	19,27	19,22
7,15	18,37	18,82	18,66	18,62
7,66	17,83	18,28	18,10	18,07
7,97	17,57	18,01	17,83	17,80

Πίνακας 9.26: Η τερματική τάση, το ρεύμα και η ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας για σταθερές στροφές 1000 σ.α.λ



Σχήμα 9.28: Γραφική παράσταση της τερματικής τάσης σε συνάρτηση με το ρεύμα για σταθερή ταχύτητα περιστροφής 1000 σ.α.λ.

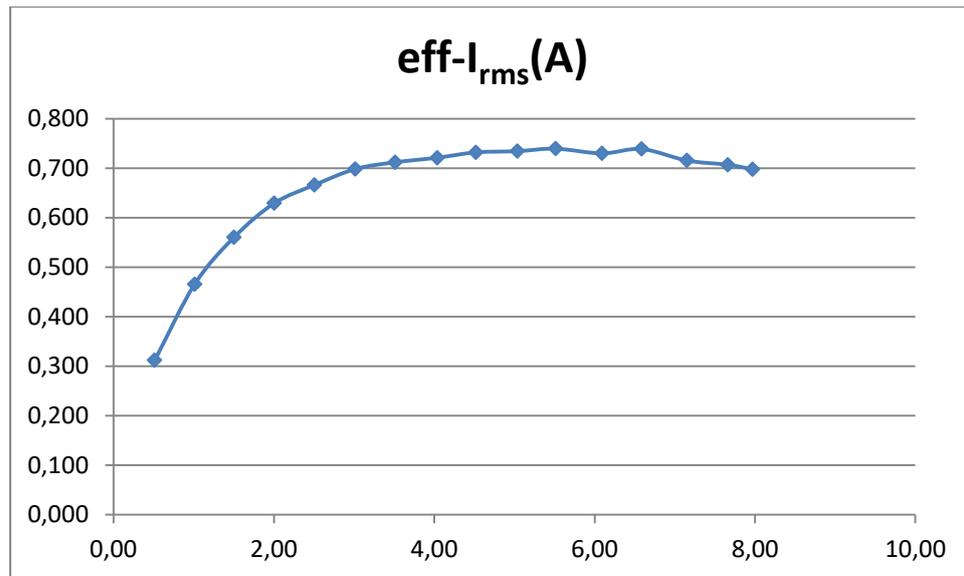


Σχήμα 9.29: Γραφική παράσταση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος σε συνάρτηση με το ρεύμα για σταθερή ταχύτητα περιστροφής 1000 σ.α.λ.

T(Nm)	I_{rms}(A)	V_{tavg}(V)	P_{el}(W)	P_{mech}(W)	eff
1,18	0,51	24,92	38,28	122,83	0,312
1,53	1,01	24,55	74,40	159,87	0,465
1,86	1,50	24,15	108,67	194,06	0,560
2,17	2,00	23,73	142,54	226,59	0,629
2,52	2,51	23,29	175,04	262,81	0,666
2,83	3,02	22,82	206,46	295,63	0,698
3,17	3,51	22,35	235,46	330,79	0,712
3,52	4,04	21,85	264,53	366,85	0,721

3,79	4,52	21,37	289,65	395,77	0,732
4,11	5,04	20,84	314,84	428,75	0,734
4,37	5,52	20,35	336,64	455,34	0,739
4,74	6,09	19,75	360,84	494,40	0,730
4,94	6,59	19,22	379,78	514,17	0,739
5,35	7,15	18,62	399,38	558,31	0,715
5,63	7,66	18,07	415,32	587,56	0,707
5,85	7,97	17,80	425,69	610,11	0,698

Πίνακας 9.15: Εύρεση της απόδοσης για λειτουργία υπό τριφασικό φορτίο στις 1000 σ.α.λ.

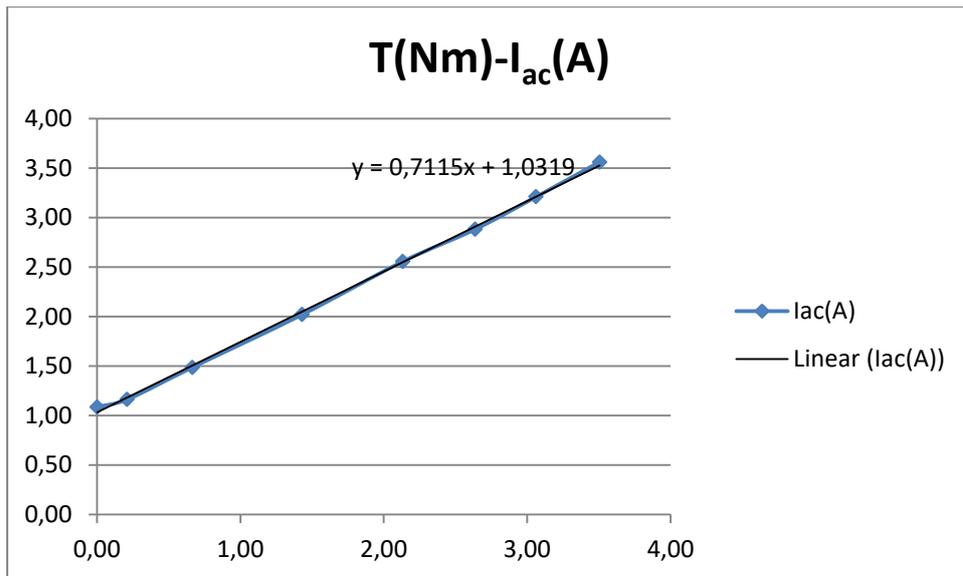


Σχήμα 9.30: Η μεταβολή της απόδοσης για μεταβαλλόμενο ρεύμα για σταθερή ταχύτητα περιστροφής 1000 σ.α.λ.

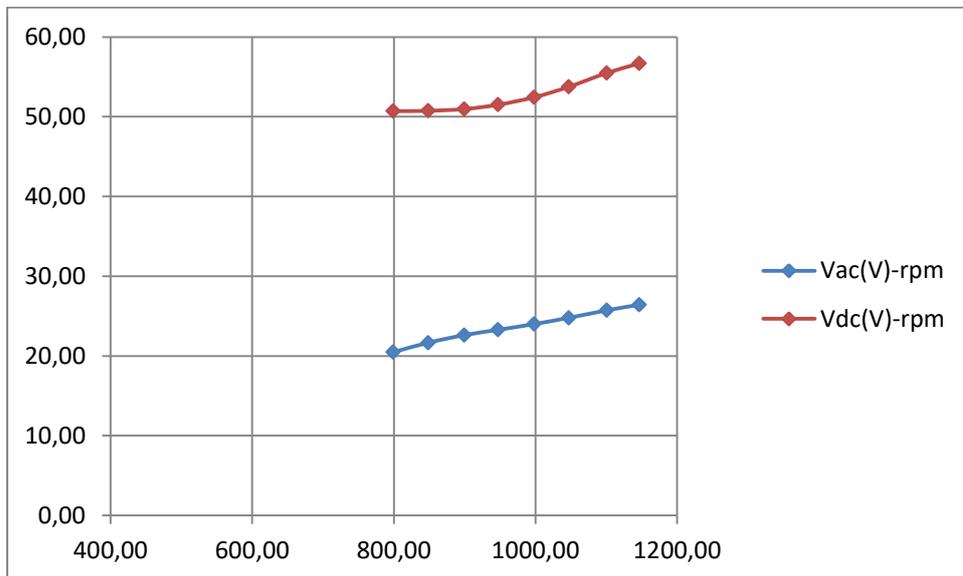
9.2.3.3. Μέτρηση με απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές

rpm	T(Nm)	V _{ac} (V)	I _{ac} (A)	V _{dc} (V)	I _{dc} (A)	P _{el} (W)	P _{mech} (W)	eff
798,99	1,09	20,47	0,00	50,70	0,03	0,00	90,92	0,000
848,49	1,16	21,66	0,21	50,74	0,17	13,68	103,33	0,132
899,62	1,49	22,62	0,67	50,96	0,77	45,13	140,06	0,322
947,08	2,02	23,28	1,43	51,50	1,76	99,84	200,28	0,499
997,97	2,56	24,00	2,13	52,44	2,66	153,50	267,09	0,575
1046,84	2,88	24,78	2,64	53,74	3,32	196,05	315,80	0,621
1100,52	3,21	25,72	3,06	55,48	3,87	236,23	369,82	0,639
1146,67	3,56	26,43	3,50	56,69	4,46	277,83	427,51	0,650

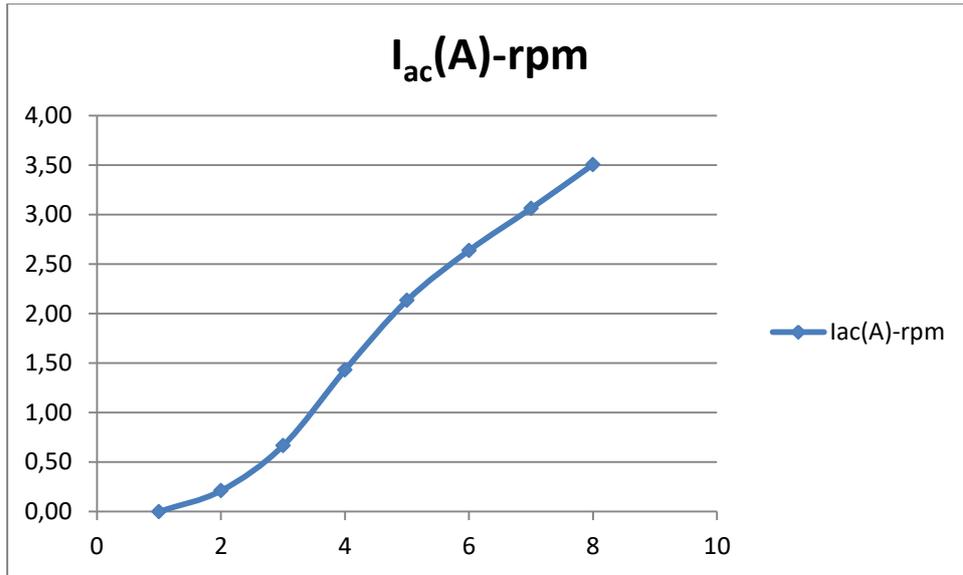
Πίνακας 9.16: Μετρήσεις και υπολογισμοί από το πείραμα με συσσωρευτές για τη γεννήτρια μονού δρομέα με πυρήνα.



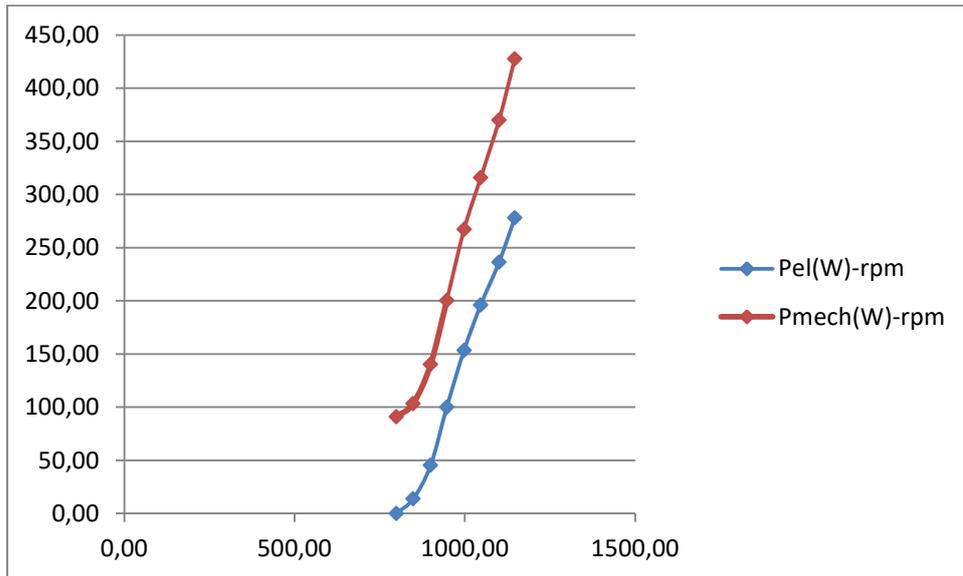
Σχήμα 9.31: Η μηχανική ροπή της γεννήτριας σε σχέση με το ρεύμα γραμμής.



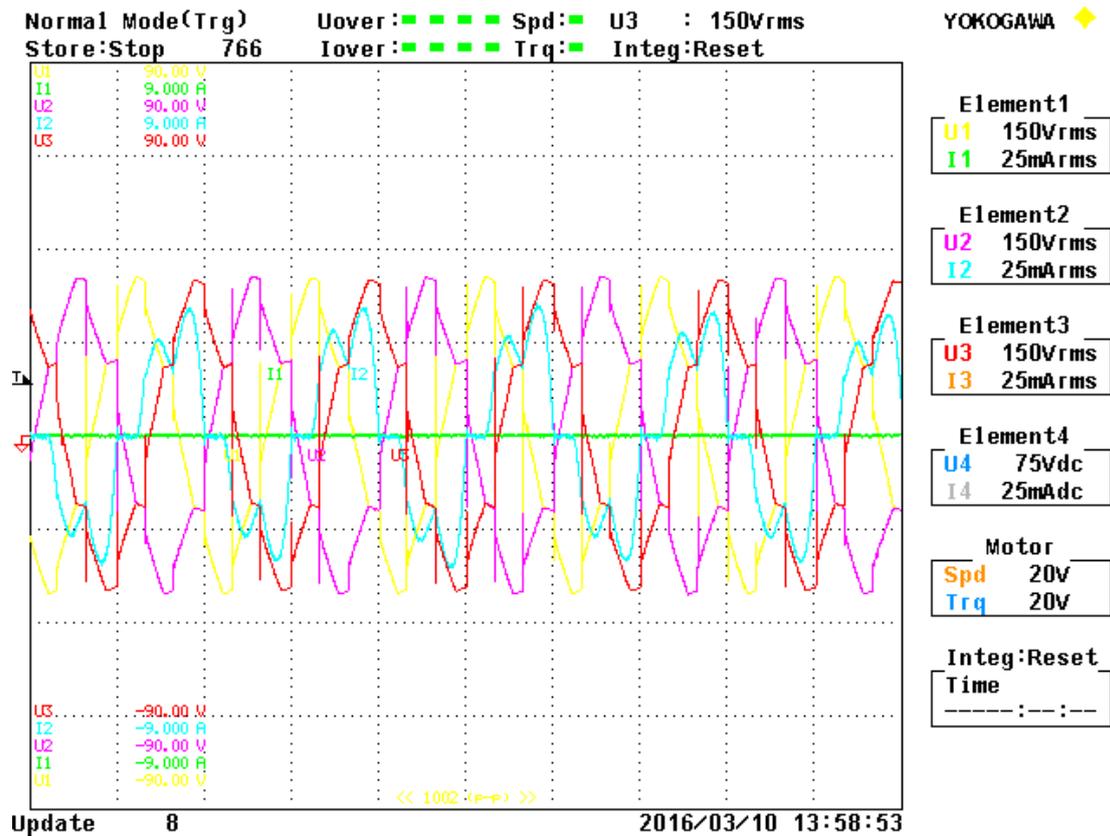
Σχήμα 9.32: Η τερματική τάση (dc και ac) της γεννήτριας σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής.



Σχήμα 9.33: Το ρεύμα της γεννήτριας μονού δρομέα σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής.



Σχήμα 9.34: Η μηχανική και η ηλεκτρική ισχύς σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής.



Σχήμα 9.35: Η κυματομορφή των τερματικών τάσεων και του ρεύματος για ονομαστική ταχύτητα περιστροφής.

Όπως ήταν αναμενόμενο, το σημείο μέγιστης απόδοσης για τη γεννήτρια μονού δρομέα με πυρήνα ήταν σε μεγαλύτερες στροφές από τις 750. Αυτό συνέβη, ενδεχομένως, λόγω του μη ακριβή τρόπου υπολογισμού των απωλειών του πυρήνα.

9.3. Μέτρηση της συνολικής απόδοσης του υδρ ηλεκτρικού συστήματος

Το υδρ ηλεκτρικό σύστημα έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε με παροχή $Q = 5 \text{ l/sec}$ και καθαρό υδραυλικό ύψος $H = 10,62 \text{ m}$ (που αντιστοιχεί σε πίεση 1,06 bar) να περιστρέφεται με ταχύτητα $n = 750 \text{ rpm}$ και να δίνει ισχύ εξόδου $P = 350 \text{ W}$. Κατά τη δοκιμή αυτή, θα χρησιμοποιηθεί η φυγοκεντρική αντλία DP NORMA 80-200(του Εργαστηρίου Υδροδυναμικής, που φαίνεται στο σχήμα 9.53) για να τροφοδοτήσει τον υδρ στρόβιλο με την απαιτούμενη παροχή και τη σωστή πίεση νερού.



Σχήμα 9.36: Η αντλία που χρησιμοποιήθηκε για την τροφοδότηση του υδροηλεκτρικού

Για τη λειτουργία της αντλίας υπάρχει δυνατότητα ελέγχου των στροφών μέσω του πίνακα ελέγχου του κινητήρα της.

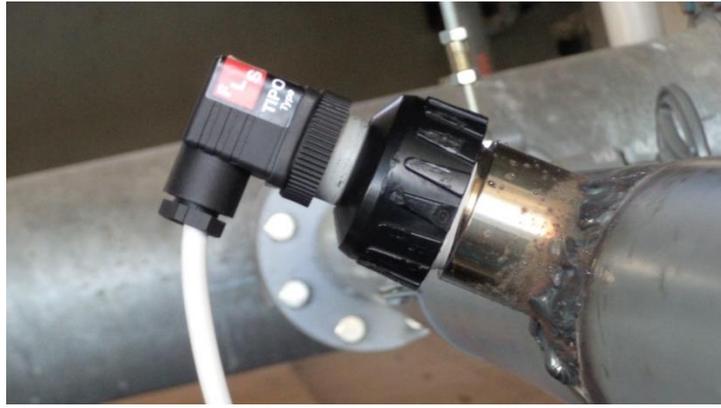


(α)

(β)

Σχήμα 9.37: Ο πίνακας ελέγχου του κινητήρα της αντλίας

Παράλληλα, μετρήθηκε η παροχή και η πίεση στον σωλήνα που καταλήγει στο υδροηλεκτρικό σύστημα.



Σχήμα 9.38: Το όργανο μέτρησης της παροχής νερού.



Σχήμα 9.39: Το μανόμετρο στο σωλήνα που καταλήγει στην υδρογεννήτρια

Η πίεση του νερού στο ύψος των ακροφυσίων μετρήθηκε με δύο τρόπους. Μετρήθηκε μέσω του μανομέτρου αλλά και με ψηφιακό τρόπο μέσω αισθητήρα για μεγαλύτερη ακρίβεια. Με αυτόν τον τρόπο ελέγχεται ότι το υδροηλεκτρικό λειτουργεί για το σχεδιαζόμενο υδραυλικό ύψος. Το φορτίο που βλέπει η γεννήτρια μεταβάλλεται καθώς μεταβάλλεται η τιμή της αντίστασης που έχει συνδεθεί στην έξοδό της. Με τον τρόπο αυτό αλλάζουν και οι στροφές της υδρογεννήτριας, αφού η παροχή Q και το ύψος υδατόπτωσης H διατηρούνται σταθερά. Τα ρεύματα και οι τάσεις μετρώνται με τη βοήθεια ψηφιακού παλμογράφου.



Σχήμα 9.40: Απεικόνιση της πειραματικής διάταξης από την πλευρά του υδροηλεκτρικού

9.3.1. Μέτρηση της απόδοσης του υδροηλεκτρικού συστήματος

Κατά τη δοκιμή αυτή, το υδροηλεκτρικό σύστημα καλείται να λειτουργήσει υπό σταθερά H και Q , τα οποία ελέγχονται μέσω της αντλίας (και του μανομέτρου και του παροχόμετρου), αλλά με μεταβαλλόμενη ταχύτητα περιστροφής n , η οποία προκύπτει από τις αλλαγές στο τριφασικό ωμικό φορτίο που έχει συνδεθεί στη γεννήτρια.

Αρχικά, μπαίνει σε λειτουργία η αντλία και αυξάνονται αργά οι στροφές της, ενώ παράλληλα ανοίγει σταδιακά και πολύ αργά η κεντρική βαλβίδα (για την αποφυγή μεταβατικών φαινομένων, αλλά και για την ομαλή απομάκρυνση του αέρα που μπορεί να έχει εγκλωβιστεί στον σωλήνα). Για να επιτευχθεί η λειτουργία του υδροηλεκτρικού στις επιθυμητές συνθήκες (παροχής και ύψους υδατόπτωσης) θα πρέπει η ένδειξη του μανομέτρου να είναι 1,06 με βάση τις θεωρητικές μετρήσεις. Η υδρογεννήτρια ξεκινά να περιστρέφεται και το φορτίο ρυθμίζεται ώστε να φθάσει την ονομαστική ταχύτητα περιστροφής της (750 σ.α.λ. στα 50 Hz), η οποία μετράται μέσω της συχνότητας στον παλμογράφο. Όταν συμβαίνει τελικά αυτό, η παροχή που φαίνεται να δίνει η αντλία είναι $Q = 4,978 \text{ l/sec}$, η οποία μετράται μέσω της συχνότητας στον παλμογράφο.

Η ταχύτητα περιστροφής n της γεννήτριας μεταβάλλεται και για κάθε τιμή αυτής μετρώνται οι φασικές τάσεις και το ρεύμα στην έξοδο της γεννήτριας. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της συχνότητας λειτουργίας, των τερματικών φασικών τάσεων και του ρεύματος στην έξοδο της γεννήτριας. Επιπλέον, έχουν υπολογιστεί η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς P_{el} , η ισχύς εισόδου P_{in} μέσω των H και Q , η ταχύτητα περιστροφής n και η απόδοση του συστήματος η_{total} .

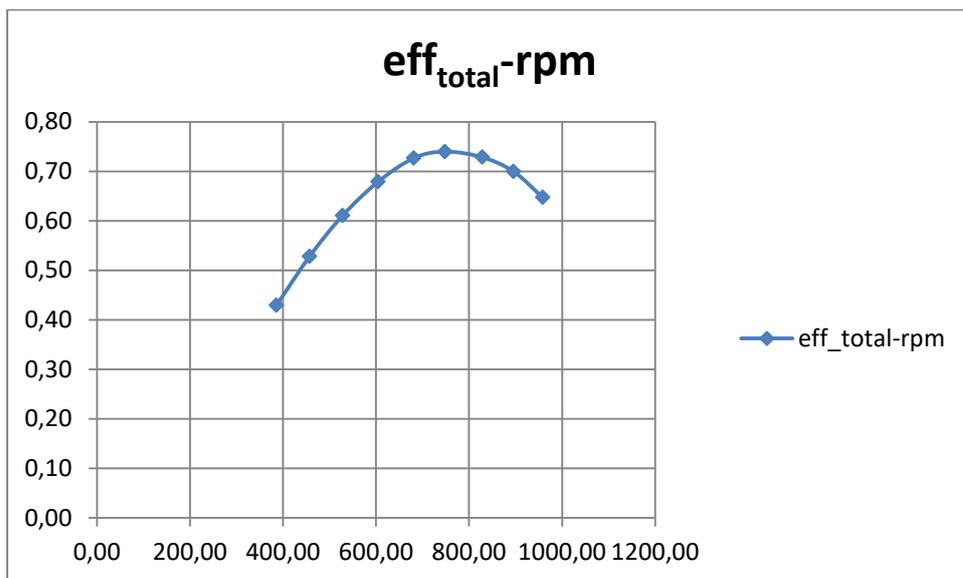
9.3.2. Μέτρηση για τη γεννήτρια χωρίς πυρήνα της απόδοσης του υδροηλεκτρικού συστήματος

9.3.2.1. Μέτρηση με μεταβαλλόμενο ωμικό φορτίο για τη γεννήτρια χωρίς πυρήνα

Στο σχήμα φαίνεται η μεταβολή της απόδοσης του υδροηλεκτρικού συστήματος σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής. Όπως φαίνεται, το υδροηλεκτρικό σύστημα παρουσιάζει μέγιστη απόδοση 73,9 % στις ονομαστικές στροφές.

$n(\text{rpm})$	$f(\text{Hz})$	$I(\text{A})$	$V_{ta}(\text{V})$	$V_{tb}(\text{V})$	$V_{tc}(\text{V})$	$V_{tavg}(\text{V})$	$P_{el}(\text{W})$	$P_{in}(\text{W})$	η_{total}
385,94	25,73	5,97	12,34	12,26	11,87	12,15	217,63	506,79	0,43
456,97	30,46	5,66	15,95	15,87	15,44	15,75	267,56	506,79	0,53
528,30	35,22	5,28	19,77	19,68	19,19	19,55	309,53	506,79	0,61
604,11	40,27	4,84	23,92	23,83	23,31	23,69	343,94	506,79	0,68
681,34	45,42	4,39	28,22	28,12	27,55	27,96	368,28	506,79	0,73
748,48	49,90	3,92	32,20	32,09	31,46	31,92	374,92	506,79	0,74
828,31	55,22	3,36	36,97	36,85	36,16	36,66	369,18	506,79	0,73
895,70	59,71	2,91	41,01	40,88	40,13	40,68	354,55	506,79	0,70
958,13	63,88	2,46	44,86	44,71	43,91	44,49	328,11	506,79	0,65

Πίνακας 9.17: Οι φασικές τάσεις και τα ρεύματα του στην έξοδο του υδροηλεκτρικού συστήματος όταν αυτό λειτουργεί υπό σταθερά H και Q αλλά για διαφορετικές στροφές.



Σχήμα 9.41: Μεταβολή της απόδοσης του υδροηλεκτρικού συστήματος σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής για σταθερές τιμές υδραυλικού ύψους και παροχής

Γίνεται ένας προσεγγιστικός υπολογισμός της απόδοσης του υδροστροβίλου χρησιμοποιώντας και τη γραφική παράσταση της ροπής T σε σχέση με το ρεύμα I της γεννήτριας κατά τη δοκιμή τροφοδότησης τριφασικού φορτίου. Η εξίσωση που συσχετίζει τη ροπή με το ρεύμα έχει βρεθεί μέσω των πειραματικών αποτελεσμάτων προσεγγιστικά να δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

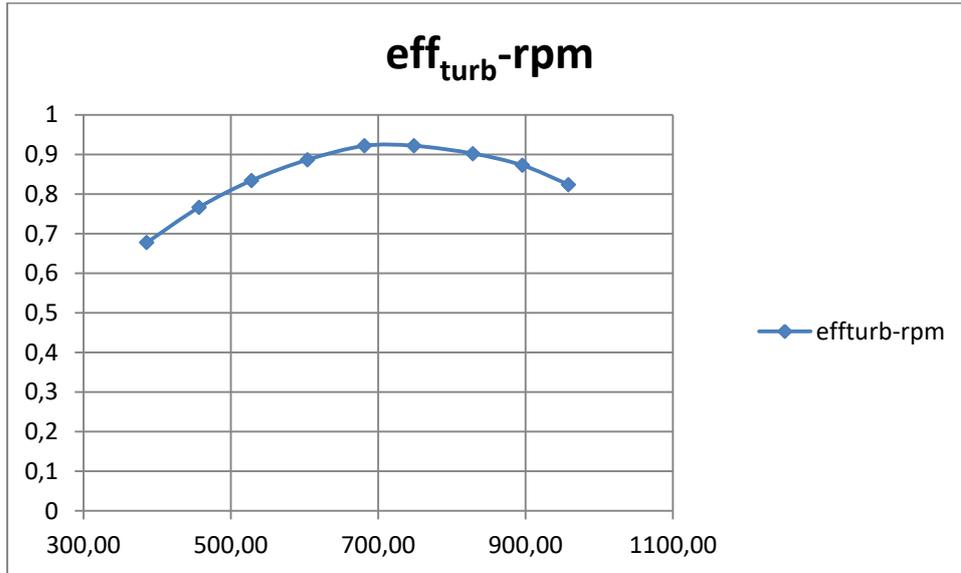
$$T = 1,2343 * I + 1,1274$$

Όταν η ταχύτητα περιστροφής του υδροστροβίλου είναι κοντά στην ονομαστική, το ρεύμα που διαρρέει τη γεννήτρια είναι $I = 3,92 \text{ A}$. Άρα, σύμφωνα με τον παραπάνω τύπο, η μηχανική ροπή της γεννήτριας θα είναι ίση με $T = 5,97 \text{ Nm}$. Επομένως, η μηχανική ισχύς στην είσοδο της γεννήτριας θα είναι ίση με $P_{mech} = T * \omega = T * \frac{\pi * n}{30} = 468,88 \text{ W}$. Άρα, η απόδοση του υδροστροβίλου σε αυτή την ταχύτητα περιστροφής και τις συνθήκες φόρτισης, θα είναι ίση με $n_{turb} = \frac{P_{mech}}{P_{in}} = \frac{468,10}{506,79} = 0,923 = 92,3\%$. Κατά τον ίδιο τρόπο, μπορεί να υπολογιστεί η απόδοση του υδροστροβίλου για όλες τις ταχύτητες περιστροφής, όπως στον πίνακα 8.28 και να σχεδιαστεί η καμπύλη της απόδοσης σε σχέση με τις στροφές, όπως στο σχήμα 8.74. Η καμπύλη της απόδοσης έχει την αναμενόμενη μορφή, αν και η υπολογιζόμενη απόδοση του υδροστροβίλου είναι μικρότερη από την απόδοση που είχε δοθεί από τον κατασκευαστή και είχε χρησιμοποιηθεί κατά τη σχεδίαση, λόγω της όχι απόλυτα σωστής τοποθέτησης του στροβίλου από άποψη κεντραρίσματος του άξονά του και ευθυγράμμισης του ώστε η δέσμη να προσπίπτει στο κέντρο του σκαφιδίου. Ένα άλλο πρόβλημα ήταν και η ταλάντωση του άξονα κατά την περιστροφή του ειδικά στις μεγαλύτερες ταχύτητες γεγονός που οδήγησε σε μείωση της απόδοσης του στροβίλου. Στο ίδιο γεγονός οφείλεται και η μετατόπιση του σημείου μέγιστης απόδοσης σε λίγο χαμηλότερες στροφές από τις ονομαστικές, αν και η διαφορά στην απόδοση είναι πολύ μικρή.

n(rpm)	I(A)	T'(Nm)	P _{in} (W)	P _{mech} (W)	eff _{turb}
385,94	5,97	8,49	506,79	343,3061	0,677416
456,97	5,66	8,12	506,79	388,374	0,766344
528,30	5,28	7,64	506,79	422,8202	0,834314

604,11	4,84	7,10	506,79	449,2843	0,886533
681,34	4,39	6,55	506,79	467,0412	0,921571
748,48	3,92	5,96	506,79	467,1515	0,921789
828,31	3,36	5,27	506,79	457,1975	0,902148
895,70	2,91	4,71	506,79	442,1388	0,872434
958,13	2,46	4,16	506,79	417,5543	0,823923

Πίνακας 9.18: Μηχανική ισχύς στην είσοδο της γεννήτριας και απόδοση του υδροστροβίλου για διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής, όταν το σύστημα λειτουργεί υπό σταθερά H και Q



Σχήμα 9.42: Η καμπύλη μεταβολής της απόδοσης του υδροστροβίλου σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής του.

Ακολουθώντας, υπολογίζονται οι αδιάστατες παράμετροι ύψους και παροχής Ψ και Φ , οι οποίες σχετίζονται με το H και το Q αντίστοιχα, σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους και σχεδιάζεται η γραφική παράσταση Φ - Ψ , όπως φαίνεται στο σχήμ 8.75. Στον πίνακα 8.29 παρατίθενται οι υπολογισμένες τιμές των παραμέτρων Φ και Ψ για $Q = 4,98 \text{ l/sec}$ και $H = 10,62$.

$$\Psi = 2 * g * \frac{H}{u^2}$$

$$\Phi = \frac{Q}{R^2 * u}$$

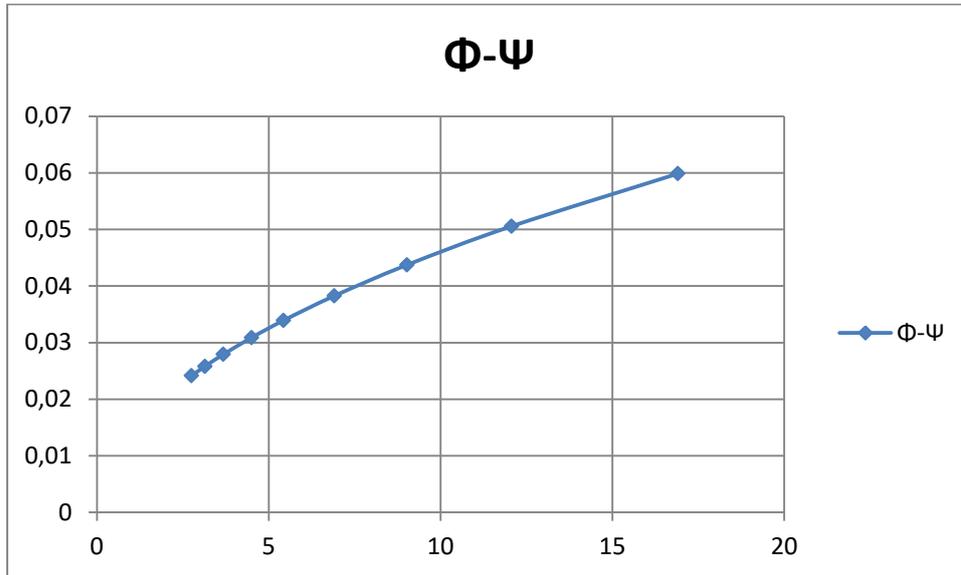
Όπου $R = \frac{pcd}{2}$: η ακτίνα του υδροστροβίλου (από τον άξονά του μέχρι το κέντρο του σκαφιδίου)

Και $u = \omega * R$: η γραμμική ταχύτητα ενός σκαφιδίου του υδροστροβίλου

n(rpm)	u(m/s)	Ψ	Φ
385,94	3,510114	16,91146	0,059867
456,97	4,156068	12,06308	0,050562
528,30	4,804841	9,025378	0,043735

604,11	5,494315	6,902342	0,038247
681,34	6,196735	5,426224	0,033911
748,48	6,807334	4,496446	0,03087
828,31	7,533434	3,671449	0,027894
895,70	8,146298	3,139807	0,025796
958,13	8,714061	2,743989	0,024115

Πίνακας 9.19: Οι αδιάστατες παράμετροι ύψους και παροχής Ψ και Φ για $H = 10,62m$ και $Q = 4,98l/sec$.



Σχήμα 9.43: Χαρακτηριστική λειτουργίας του υδροηλεκτρικού συστήματος μέσω των αδιάστατων παραμέτρων $\Phi - \Psi$.

Με χρήση των αδιάστατων αυτών παραμέτρων μπορεί να γίνει αναγωγή και να σχεδιαστεί η χαρακτηριστική λειτουργίας $H - Q$ του υδροηλεκτρικού συστήματος για μία οποιαδήποτε σταθερή ταχύτητα περιστροφής.

9.3.2.2. Μέτρηση σε σύνδεση με συσσωρευτές για τη γεννήτρια χωρίς πυρήνα

rpm	$V_{ac}(V)$	$I_{ac}(A)$	$V_{batt}(V)$	$I_{dc}(A)$	$P_{el}(W)$	$P_{hydro}(W)$	eff_{tot}
661,35	27,15	4,38	56,90	5,85	357,02	515,35	0,717

Πίνακας 9.20: Η απόδοση της γεννήτριας σε απ' ευθείας σύνδεση με μπαταρίες 48V.

rpm	$V_{ac}(V)$	$I_{ac}(A)$	$V_{dcon}(V)$	$I_{dc}(A)$	$P_{el}(W)$	$P_{hydro}(W)$	eff
753,77	32,83	3,78	69,74	5,01	371,97	524,49	0,709

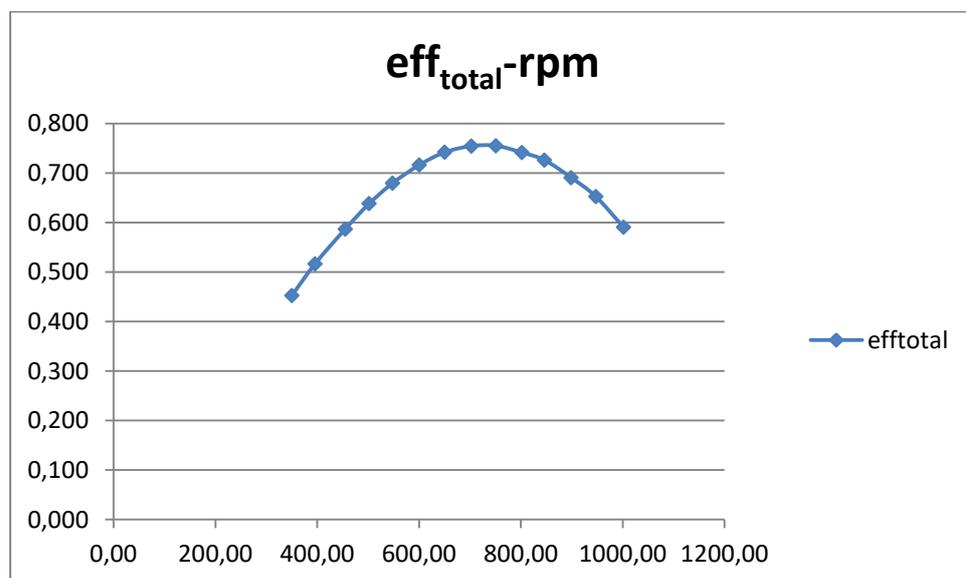
Πίνακας 9.21: Η απόδοση της γεννήτριας σε σύνδεση μέσω dc-dc μετατροπέα σε μπαταρίες 48V.

9.3.3. Μέτρηση της απόδοσης του υδροηλεκτρικού συστήματος για τη γεννήτρια διπλού δρομέα με πυρήνα

9.3.3.1. Μέτρηση με μεταβαλλόμενο φορτίο για τη γεννήτρια διπλού δρομέα με πυρήνα

rpm	$I_{rms}(A)$	$V_{ta}(V)$	$V_{tb}(V)$	$V_{tc}(V)$	$V_{tavg}(V)$	$P_{el}(W)$	$P_{in}(W)$	eff_{total}
350,26	7,08	10,84	10,99	10,82	10,88	231,17	510,68	0,453
395,51	6,89	12,70	12,88	12,70	12,76	263,64	510,68	0,516
454,89	6,50	15,28	15,52	15,30	15,36	299,58	510,68	0,587
502,05	6,23	17,32	17,59	17,35	17,42	325,83	510,68	0,638
547,84	5,95	19,32	19,64	19,38	19,45	346,89	510,68	0,679
600,59	5,58	21,69	22,06	21,76	21,84	365,74	510,68	0,716
650,56	5,24	23,93	24,35	24,03	24,10	378,85	510,68	0,742
702,82	4,84	26,32	26,79	26,44	26,51	385,24	510,68	0,754
750,71	4,47	28,50	29,01	28,65	28,72	385,59	510,68	0,755
802,10	4,05	30,90	31,46	31,06	31,14	378,58	510,68	0,741
846,57	3,72	32,96	33,55	33,12	33,21	370,68	510,68	0,726
899,04	3,29	35,41	36,06	35,60	35,69	352,62	510,68	0,690
947,23	2,93	37,66	38,35	37,86	37,96	333,18	510,68	0,652
1001,52	2,48	40,22	40,94	40,42	40,53	301,66	510,68	0,591

Πίνακας 9.22: Οι φασικές τάσεις και τα ρεύματα στην έξοδο του υδροηλεκτρικού συστήματος όταν αυτό λειτουργεί υπό σταθερά H και Q αλλά για διαφορετικές στροφές



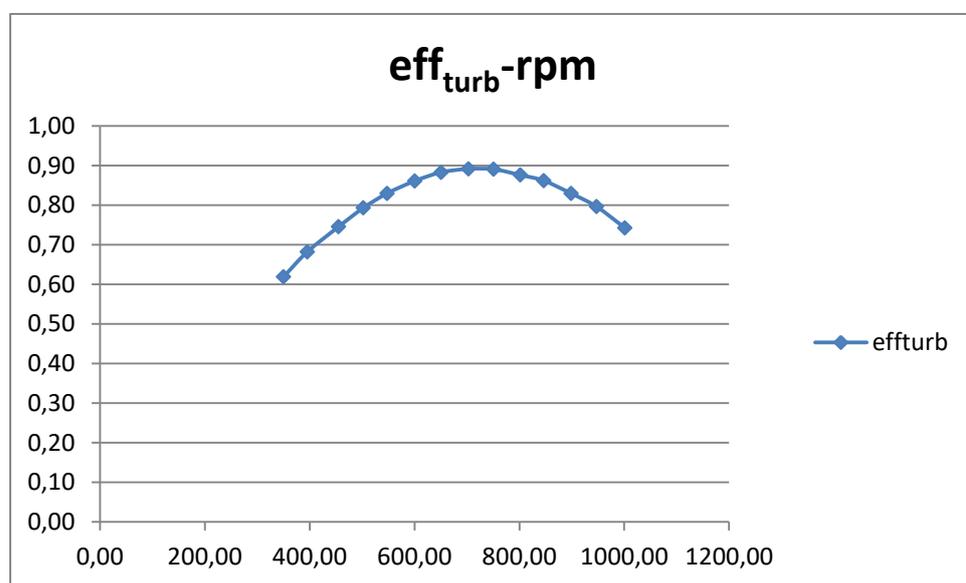
Σχήμα 9.44: Μεταβολή της απόδοσης του υδροηλεκτρικού συστήματος σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής για σταθερές τιμές υδραυλικού ύψους και παροχής

\

rpm	$I_{rms}(A)$	$T'(Nm)$	$P_{in}(W)$	$P_{mech}(W)$	eff_{turb}
350,26	7,08	8,62	510,68	316,20	0,619
395,51	6,89	8,41	510,68	348,28	0,682
454,89	6,50	7,99	510,68	380,51	0,745
502,05	6,23	7,70	510,68	404,78	0,793

547,84	5,95	7,38	510,68	423,64	0,830
600,59	5,58	6,99	510,68	439,64	0,861
650,56	5,24	6,62	510,68	450,71	0,883
702,82	4,84	6,18	510,68	455,19	0,891
750,71	4,47	5,78	510,68	454,71	0,890
802,10	4,05	5,32	510,68	447,22	0,876
846,57	3,72	4,96	510,68	439,94	0,861
899,04	3,29	4,50	510,68	423,45	0,829
947,23	2,93	4,10	510,68	406,48	0,796
1001,52	2,48	3,61	510,68	378,99	0,742

Πίνακας 9.23: Μηχανική ισχύς στην είσοδο της γεννήτριας και απόδοση του υδροστροβίλου για διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής, όταν το σύστημα λειτουργεί υπό σταθερά H και Q



Σχήμα 9.45: Η καμπύλη μεταβολής της απόδοσης του υδροστροβίλου σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής του.

9.3.3.2. Μέτρηση σε σύνδεση με συσσωρευτές για τη γεννήτρια διπλού δρομέα με πυρήνα

rpm	V _{ac} (V)	I _{ac} (A)	V _{batt} (V)	I _{dc} (A)	P _{el} (W)	P _{hydro} (W)	eff _{tot}
692,85	26,19	5,02	57,01	6,27	394,56	513,27	0,769

Πίνακας 9.24: Η απόδοση της γεννήτριας σε απ' ευθείας σύνδεση με μπαταρίες 48V.

rpm	V _{ac} (V)	I _{ac} (A)	V _{dccon} (V)	I _{dc} (A)	P _{el} (W)	P _{in} (W)	eff _{tot}
742,38	28,58	4,65	62,58	5,77	398,94	515,03	0,775

Πίνακας 9.25: Η απόδοση της γεννήτριας σε σύνδεση μέσω dc-dc μετατροπέα σε μπαταρίες 48V.

9.3.4. Μέτρηση για τη γεννήτρια με πυρήνα μονού δρομέα της απόδοσης του υδροηλεκτρικού συστήματος

9.3.4.1. Μέτρηση σε σύνδεση με συσσωρευτές για τη γεννήτρια διπλού δρομέα με πυρήνα

rpm	V _{ac} (V)	I _{ac} (A)	V _{batt} (V)	I _{dc} (A)	P _{el} (W)	P _{in} (W)	eff _{tot}
1104,49	25,99	2,55	56,67	3,21	198,60	510,92	0,389

Πίνακας 9.26: Η απόδοση της γεννήτριας σε απ' ευθείας σύνδεση με μπαταρίες 48V.

rpm	V _{ac} (V)	I _{ac} (A)	V _{dccon} (V)	I _{dc} (A)	P _{el} (W)	P _{in} (W)	eff _{tot}
1126,81	27,12	2,16	59,46	2,69	175,61	510,92	0,34

Πίνακας 9.27: Η απόδοση της γεννήτριας σε σύνδεση μέσω dc-dc μετατροπέα σε μπαταρίες 48V.

Σύμφωνα με το [32] ένας turgo υδροστρόβιλος μπορεί να φτάσει απόδοση μέχρι και 87%. Ο υδροστρόβιλος που μετρήσαμε εμφανίζει απόδοση 90%. Αυτό όπως αναλύθηκε και παραπάνω συμβαίνει λόγω του σφάλματος κατά τη μέτρηση της μηχανικής ροπής της γεννήτριας.

Η σύγκριση της γεννήτριας μονού δρομέα χωρίς πυρήνα με τη γεννήτρια διπλού δρομέα με πυρήνα έδειξε ότι η δεύτερη παρουσίασε βελτιωμένη απόδοση με σημαντική μείωση του κόστους.

Η γεννήτρια με πυρήνα μονού δρομέα δεν παρουσίασε τόσο καλά αποτελέσματα, αλλά δεν ήταν διαστασιολογημένη για 750 σ.α.λ., οπότε στη μέτρηση με τον υδροστρόβιλο στις 1000 σ.α.λ., ο υδροστρόβιλος λειτουργούσε με χαμηλή απόδοση. Παρ' όλα αυτά έδειξε ότι σε υψηλότερες στροφές είχε ικανοποιητική απόδοση.

Βιβλιογραφία

- [1] Μ. Νικ. Μέγα, "Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα Σε Ορεινές Περιοχές Και Οι Επιπτώσεις Τους Στο Περιβάλλον", Αθήνα, 2009.
- [2] Σ. Ι. Γκιάλα – Φήκαρη, «Μελέτη, σχεδίαση και κατασκευή μικρού υδροηλεκτρικού συστήματος με υδρογεννήτρια 350 W για αγροτικές εφαρμογές χαμηλού κόστους», Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., 2012.
- [3] Adam Harvey, Andy Brown, Priyantha Hettiarachi, Allen Inversin, "Micro - Hydro Design Manual", Intermediate Technology Publications, 2006.
- [4] Κατερινόπουλος Φίλιππος, "Μικροϋδροηλεκτρικά Έργα: Τεχνολογία, Διαδικασία Μελέτης και Εφαρμογές", Αθήνα 2007.
- [5] Γ. Μεσσήνης, «Βελτιστοποίηση, προσομοίωση και κατασκευή μικρής ανεμογεννήτριας για εφαρμογές χαμηλού κόστους και μελέτη της AC και DC σύνδεσης», Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., 2011.
- [6] "Hydro Empowerment Network", <http://www.hpnet.org/about-us.html> .
- [7] B. P. Koirala, D. Vaghela, M. Hiremath, R. Kulenthiran, "Analysis of Status, Opportunities and Challenges of Community Micro-hydro Systems in South and South-East Asia", Symposium: UC Berkeley, April 10 – 12, 2014.
- [8] Jon Sumanik-Leary, "Small wind turbines for decentralised rural electrification: case studies in Peru, Nicaragua and Scotland", Thesis, The University of Sheffield, 2013.
- [9] Παπαντώνης Δ.Ε., "Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα", Εκδόσεις Συμείων, Αθήνα, 2001.
- [10] Philip Maher, Nigel Smith, "Pico hydro for village power", 2001.
- [11] Scott Davis, "Serious Microhydro _ Water power solutions from the experts", New Society Publishers, Canada 2010.
- [12] Arthur Williams, "PUMPS AS TURBINES – A user's guide", Intermediate Technology Publications, 1997.
- [13] R. J. Wang, "Design Aspects and Optimisation of an Axial Field Permanent Magnet Machine with an Ironless Stator", Dissertation, University of Stellenbosch, March 2003.
- [14] K. Nilsson, E. Segergren and M. Leijon, "Simulation of Direct Drive Generators Designed for Underwater Vertical Axis Turbines", Fifth European Wave Energy Conference, 2003.
- [15] F. Rossouw, "Analysis and Design of Axial Flux Permanent Magnet Wind Generator System for Direct Battery Charging Applications", thesis MScEng, Stellenbosch University, 2009.
- [16] T. Rovio, Vihriälä H., Söderlund L., Kriikka J., "Axial and radial flux generators in small scale wind power production", In: Helm, P., Zervos, A. (eds.), Proceedings of 2001 European Wind Energy Conference, Copenhagen, Denmark, 2-6 July 2001 s. 1094-1097.
- [17] M. Dubois, H. Polinder, J. Ferreira, "Axial and radial-flux permanent magnet generators for direct-drive wind turbines", In P Helm (Ed.), Proceedings (pp. 5-8). Munich: WIP, January 2001.
- [18] Α. Γ. Τρουλλάκη, «Μελέτη διαφορετικών μαγνητικών υλικών για τοπικά κατασκευασμένες μικρές ανεμογεννήτριες αξονικής ροής σε εφαρμογές αγροτικής ηλεκτροδότησης», Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., 2014.

- [19] M. Kamper, R. Wang, F. Rossouw, "Analysis and Performance Evaluation of Axial Flux Air-Cored Stator Permanent Magnet Machine with Concentrated Coils", Electric Machines & Drives Conference, 2007. IEMDC '07. IEEE International , vol.1, no., pp.13- 20, 3-5 May 2007.
- [20] J. Gieras, R. Wang, M. Kamper, "Axial flux permanent magnet brushless machines", second edition, Springer, 2008.
- [21] A. Shea, D. C. Ludois, "Reduction of Permanent Magnets in Small-Scale Wind Turbines", University of Wisconsin -Madison, 2013.
- [22] Paul Cunningham & Ian Woofenden, "Micro-hydro Electricity Basics", Homepower Magazine (<http://homepower.com/basics/hydro/>).
- [23] Francis G. Hanejko, Hung G. Phan and Howard G. Rutz ,Hoeganaes Corporation, Riverton, "Powder Metallurgy Materials for AC Magnetic Applications", Presented at PM²TEC '96 World Congress June 16-21, 1996 - Washington D.C.
- [24] Lall, C., Baum, L. W., "High Performance Soft Magnetic Components by Powder Metallurgy and Injection Molding", Modern Developments in Powder Metallurgy, Vol. 18, compiled by P. Ulf Gummesson and Donald A. Gustafson, 1988.
- [25] Hanejko, F. , Rutz, H., Oliver, C., "Effects of Processing and Materials on Soft Magnetic Performance of Powder Metallurgy Parts", Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials, 1992, Vol. 6, compiled by Joseph M. Capus and Randall M. German, pp 375-404, Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ.
- [26] H. G. Rutz, F. G. Hanejko, and G. W. Ellis Hoeganaes Corporation Riverton, "The manufacture of electromagnetic components by the powder metallurgy process", Presented at PM²TEC '97 International Conference on Powder Metallurgy & Particulate Materials June 29 - July 2,1997 Chicago.
- [27] Hanejko, F.G., Ellis, G.W., Hale, T.J., "Application of High Performance Material Processing - Electromagnetic Products," Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, Vol. 2, pp.8- 13-8-26, Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, 1998.
- [28] Michael L. Marucci & K. S. Narasimhan Hoeganaes Corporation, Cinnaminson, "Advances, Applications, and Opportunities for Coated Iron Powder for Electromagnetic Applications", Presented at PM²TEC2003, Las Vegas.
- [29] Hanejko, F.G., Marucci, M.L., "Soft Magnetic Materials Utilizing Conventional and Warm Compaction Technology," SAE World Congress 2003 paper No. 2003-01-0448.
- [30] Narasimhan, K.S., Miller, T.J., "42 Volt Architecture on Powder Metallurgy-Opportunities," SAE World Congress 2003 paper No. 2003-01-0443.
- [31] Μ. Πίσσας, "ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ : Μαγνητικές μετρήσεις υλικών", ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος», Αθήνα 2015
- [32] Hugh Piggot, "A Wind Turbine Recipe Book-The axial flux windmill plans", Metric Edition, January 2009
- [33] K.C. Latoufis, G.M. Messinis, P.C. Kotsampopoulos and N.D. Hatzigrygiou, 'Axial Flux Permanent Magnet Generator Design for Low Cost Manufacturing of Small Wind Turbines', National Technical University of Athens, Reprinted from Wind Engineering, 2012.

[34] S.J. Williamson , B.H. Stark, J.D. Booker, "Performance of a low-head pico-hydro Turgo turbine", Faculty of Engineering, University of Bristol, University Walk, Bristol BS8 1TR, UK