



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

**Βελτιστοποίηση, προσομοίωση και κατασκευή μικρής
ανεμογεννήτριας για εφαρμογές χαμηλού κόστους και μελέτη
της AC και DC σύνδεσης.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Μ. Μεσσήνης

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2011



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

**Βελτιστοποίηση, προσομοίωση και κατασκευή μικρής
ανεμογεννήτριας για εφαρμογές χαμηλού κόστους και μελέτη
της AC και DC σύνδεσης.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Μ. Μεσσήνης

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 11^η Μαρτίου 2011.

.....

Νικόλαος Χατζηαργυρίου

.....

Σταύρος Σ. Παπαθανασίου

.....

Πάυλος Γεωργιλάκης

Αθήνα, Μάρτιος 2011

.....
Γεώργιος Μ. Μεσσήνης

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

Copyright © Γεώργιος Μ. Μεσσήνης, 2011

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη, βελτιστοποίηση, προσομοίωση και κατασκευή μιας μικρής γεννήτριας αξονικής ροής μονίμων μαγνητών χωρίς πυρήνα για αιολικές εφαρμογές σε σύνδεση στο δίκτυο.

Γίνεται μια εισαγωγή στην έννοια της ενδιάμεσης τεχνολογίας ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζονται οι βασικές αεροδυναμικές γνώσεις που χρειάζονται για τα πτερύγια και τον προσανατολισμό της Α/Γ. Επιπλέον γίνεται βιβλιογραφική έρευνα σε σχέση με τις γεννήτριες αξονικής ροής και παρουσιάζονται οι βασικές τοπολογίες, ενώ αναλύονται και βασικά θεωρητικά θέματα που θα βοηθήσουν στη διαστασιολόγηση.

Παρουσιάζεται η πλήρης διαδικασία της διαστασιολόγησης για μια γεννήτρια 3 kW που περιλαμβάνει την εύρεση των ονομαστικών συνθηκών λειτουργίας αλλά και όλων των διαστάσεων της γεννήτριας. Βρίσκονται αναλυτικά οι διαστάσεις των πηνίων και των μαγνητών όπως επίσης και το συνολικό βάρος και κόστος της γεννήτριας.

Με βάση την παραπάνω προσέγγιση ακολουθεί βελτιστοποίηση της σχεδίασης. Ο λόγος του πλάτους του μαγνήτη προς το πλάτος του πολικού βήματος καθώς και ο λόγος εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα βελτιστοποιούνται προκειμένου να επιτευχθεί το ελάχιστο κόστος. Επιπλέον εξετάζονται οι παράγοντες της συχνότητας και του πάχους του μαγνήτη.

Η βελτιστοποιημένη διάταξη προσομοιώνεται και κατασκευάζεται. Στη συνέχεια η γεννήτρια μετράται και τα πειραματικά αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά της προσομοίωσης.

Εξετάζεται η DC σύνδεση ανεμογεννήτριας ανάλογης κατασκευής. Αρχικά προσομοιώνεται η απευθείας σύνδεση γεννήτριας 850 W σε συσσωρευτές, ενώ στη συνέχεια προστίθεται εν σειρά αυτεπαγωγή για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Οι διατάξεις μετρώνται στο εργαστήριο και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά της προσομοίωσης.

Τέλος εξάγονται συμπεράσματα και κατατίθενται βελτιωτικές προτάσεις.

Λέξεις κλειδιά:

ενδιάμεση τεχνολογία, χαμηλό κόστος, αγροτική ηλεκτροδότηση, μικρές ανεμογεννήτριες, μηχανές αξονικής ροής, μόνιμοι μαγνήτες, βελτιστοποίηση, μικροδίκτυα, AC σύνδεση, DC σύνδεση, σύνδεση σε συσσωρευτές, σύνδεση αυτεπαγωγής, βελτίωση ενεργειακής απόδοσης.

Abstract

Subject of the present work is the study, optimization, simulation and construction of a small axial flux core less generator with permanent magnets for grid connected wind energy applications.

An introduction is made on the principles of appropriate technology applications while also presenting the basic concepts of aerodynamics and turbine orientation, that will be used.

The complete sizing process of a 3kW generator is presented, including the determination of the nominal operating conditions and the total set of dimensions of the generator. The dimensions of the coils and of the magnets are determined, as well as the total weight and cost of the generator.

According to the previous approach the design is optimized. The pole arce to pole pitch ratio and the ratio of the internal to the external diameter are optimized for lowest cost. Further more the factors of frequency and magnet thickness are examined.

The optimized design is simulated and constructed. The generator is tested in the laboratory and the resulting measurements are compared to the simulation results.

Further on, the DC coupling of a similar wind turbine is examined. Initially, the direct coupling of an 850W small wind turbine with batteries is simulated, and in continuation a series inductance is added for the improvement of the annual energy yield. The above arrangements are tested and measured in the laboratory and the results are compared with those of the simulation.

Finally, conclusions are drawn and proposals for improvements and further work are presented.

Key words:

appropriate technology, low cost, rural electrification, axial flux generators, permanent magnets, optimization, microgrids, AC coupling, DC coupling, direct battery connection, inductance connection, energy output enhancement.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον Κώστα Λατούφη και στον Πάνο Κοτσαμπόπουλο για τις υποδείξεις και την καθοδήγησή τους κατά τη διεξαγωγή της εργασίας. Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου, καθηγητή Ε.Μ.Π. για την υποστήριξη της πρωτοβουλίας της διπλωματικής και τις υποδείξεις του. Τον κ. Δημήτριο Παπαντώνη, καθηγητή Ε.Μ.Π., για τη βοήθειά του κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων στο εργαστήριο Υδροδυναμικής. Τους συναδέλφους που βοήθησαν στην κατασκευή. Όλους εκείνους κοντά μου που με ανέχτηκαν....

Στον Πατέρα μου

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Μικρές Ανεμογεννήτριες.....	15
1.2. Η ενδιάμεση τεχνολογία.....	15
1.2.1. Σχεδιασμός βασισμένος στην ενδιάμεση τεχνολογία.....	15
1.2.2. Κοινωνικές, οικονομικές και πολιτικές προεκτάσεις.....	17
1.3 Αεροδυναμικά χαρακτηριστικά.....	18
1.3.1. Βασικές έννοιες αεροδυναμικής.....	18
1.3.2. Χαρακτηριστικά ισχύος.....	20
1.3.3. Η κατανομή του ανέμου.....	22
1.3.4. Ο περιορισμός της ισχύος.....	24

2. ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ

2.1. Γεννήτριες αξονικής και ακτινικής ροής.....	27
2.2. Οι γεννήτριες αξονικής ροής μονίμων μαγνητών.....	29
2.2.1. Βασικά χαρακτηριστικά.....	29
2.2.2. Μονός δρομέας-μονός στάτης.....	31
2.2.3. Διπλός δρομέας-μονός στάτης.....	32
2.2.4. Διπλός στάτης-μονός δρομέας.....	33
2.2.5. Η συνδεσμολογία Torus.....	33
2.2.6. Συγκριτική μελέτη.....	35
2.3. Τα τυλίγματα.....	38
2.4. Θεωρητική ανάλυση.....	41
2.4.1. Μαγνητική ροή-HEΔ.....	41
2.4.2. Ανάλυση του τυλίγματος.....	43
2.4.2.1. Ανάπτυξη ροπής.....	43
2.4.2.2. Πυκνότητα ρεύματος.....	45
2.4.2.3. Αντίσταση και αυτεπαγωγή τυλίγματος.....	46
2.4.3. Το μαγνητικό κύκλωμα.....	47
2.4.4. Μελέτη απωλειών και ισοδύναμο κύκλωμα.....	49
2.4.4.1. Μελέτη απωλειών.....	49
2.4.4.2. Ισοζύγιο ενέργειας και ισοδύναμο κύκλωμα.....	50

3. ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ

3.1. Ονομαστικές στροφές-Ονομαστική τάση.....	53
3.2. Αριθμός πόλων-πηνίων, συχνότητα λειτουργίας.....	55
3.3. Οι μαγνήτες.....	56
3.3.1. Το είδος του μαγνήτη.....	56
3.3.2. Το σχήμα του μαγνήτη.....	57
3.3.3. Το πάχος του μαγνήτη.....	58
3.3.4. Λοιπές διαστάσεις μαγνήτη.....	59

3.3.4.1. Ορθογώνιος μαγνήτης.....	59
3.3.4.2. Τραπεζοειδής μαγνήτης.....	60
3.3.5. Ο λόγος πλάτους μαγνήτη προς πλάτος πολικού βήματος.....	61
3.3.6. Η πρώτη αρμονική της πυκνότητας μαγνητικής ροής.....	62
3.4. Εξωτερική και εσωτερική ακτίνα.....	63
3.4.1. Ισχύς και ροπή.....	63
3.4.2. Εξωτερική ακτίνα.....	63
3.4.3. Ο λόγος εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα.....	64
3.5. Ο στάτης και τα πηνία.....	65
3.5.1. Το πάχος του στάτη.....	65
3.5.2. Σπείρες και πάχος πηνίου.....	66
3.5.3. Ο συντελεστής πλήρωσης του πηνίου.....	67
3.5.4. Κατασκευαστικές διαστάσεις πηνίου.....	69
3.6. Το πάχος του σιδήρου.....	70
3.7. Κόστος και βάρος γεννήτριας.....	71
3.7.1. Οι μαγνήτες.....	72
3.7.2. Ο σίδηρος.....	73
3.7.3. Ο χαλκός.....	73
3.7.4. Η ρητίνη.....	74
3.7.5. Το κόντρα πλακέ.....	74
3.8. Γενικός αλγόριθμος διαστασιολόγησης.....	75
4. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	
4.1. Η διαστασιολόγηση σε Matlab-Octave.....	77
4.2. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.....	77
4.2.1. Το λογισμικό FEMM.....	77
4.2.2. Σχεδίαση της γεννήτριας.....	78
4.2.3. Μετακίνηση του δρομέα.....	78
4.3. Επαλήθευση της διαστασιολόγησης.....	79
4.3.1. Ο υπολογισμός της πρώτης αρμονικής της πυκνότητας μαγνητικής ροής.....	79
4.3.2. Το πάχος του στάτη.....	80
4.4. Οι επιδόσεις της γεννήτριας.....	80
5. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	
5.1. Εισαγωγή.....	85
5.2. Κριτήρια και μεταβλητές βελτιστοποίησης.....	85
5.3. Η απομονωμένη επίδραση των μεταβλητών.....	86
5.3.1. Το πλάτος μαγνήτη προς πλάτος πολικού βήματος.....	86
5.3.2. Ο λόγος εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα.....	89
5.3.3. Η επίδραση της συχνότητας.....	90
5.3.4. Η επίδραση του σχήματος του μαγνήτη.....	91
5.4. Η μέθοδος της βελτιστοποίησης.....	91
5.4.1. Τεχνικοί περιορισμοί.....	92

5.4.2. Η συνάρτηση ελαχίστου κόστους.....	95
5.4.3. Βελτιστοποίηση.....	97
5.4.3.1. Χρήση ορθογώνιου μαγνήτη.....	97
5.4.3.2. Χρήση τραπεζοειδούς μαγνήτη.....	98
5.4.3.3. Σύγκριση διατάξεων.....	100
5.4.4. Τελική διάταξη.....	101
5.5. Προσομοίωση του μαγνητικού πεδίου και επιδόσεις της γεννήτριας....	102
5.5.1. Το μαγνητοστατικό πρόβλημα	102
5.5.2. Μετακίνηση του δρομέα και επιδόσεις της γεννήτριας.....	105
6. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	
6.1. Η κατασκευή της γεννήτριας.....	109
6.1.1. Η κατασκευή του δρομέα.....	109
6.1.2. Η κατασκευή του στάτη.....	112
6.1.3. Η κατασκευή στήριξης και η συναρμολόγηση.....	114
6.2. Η μέτρηση της γεννήτριας.....	116
6.2.1. Η πειραματική διάταξη και τα μετρούμενα μεγέθη.....	116
6.2.1.1. Η ΗΕΔ της γεννήτριας και η DC τάση ανοιχτοκύκλωσης.....	117
6.2.1.2. Μέτρηση της μηχανικής ροπής, της τερματικής τάσης και της απόδοσης υπό ωμικό τριφασικό φορτίο.....	120
6.2.1.3. Μέτρηση της αντίστασης του τυλίγματος.....	124
6.2.1.4. Μέτρηση της γεννήτριας υπό μονοφασικό φορτίο...	125
6.2.1.5. Τα ονομαστικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας.....	126
6.2.1.6. Συμπεράσματα.....	127
7. ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	
7.1. Μικροδίκτυα.....	131
7.1.1. Γενικά, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.....	131
7.1.2. Διάταξη τυπικού μικροδικτύου.....	132
7.2. Τρόποι σύνδεσης ανεμογεννητριών.....	135
7.2.1. Η AC σύνδεση.....	135
7.2.1.1. Η γενική δομή της AC σύνδεσης.....	135
7.2.1.2. Μέθοδος μεγιστοποίησης αποδιδόμενης ισχύος (MPPT).....	137
7.2.2. Η DC σύνδεση.....	138
7.2.2.1. Σύνδεση απευθείας σε συσσωρευτές-Το μοντέλο της AC ανάλυσης.....	140
7.2.2.2. Σύνδεση απευθείας σε συσσωρευτές-Το μοντέλο της DC ανάλυσης.....	143
8. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ	
8.1. Υπολογισμός της ενεργειακής απόδοσης A/Γ.....	145
8.2. Η AC σύνδεση.....	146

8.3. Η DC σύνδεση.....	150
8.3.1. Η γεννήτρια 850 W που κατασκευάστηκε για DC σύνδεση....	151
8.3.2. Απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές.....	151
8.3.3. Σύνδεση με σύστημα μεγιστοποίησης ισχύος (MPPT).....	158
8.3.4. Βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης-Σύνδεση αυτεπαγωγής.	162
9. ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΕ DC ΣΥΝΔΕΣΗ	
9.1. Μέτρηση της γεννήτριας υπό συνθήκες ανοιχτοκύκλωσης.....	169
9.2. Μέτρηση της μηχανικής ροπής, της τερματικής τάσης και της απόδοσης υπό ωμικό τριφασικό φορτίο.....	173
9.3. Μέτρηση της γεννήτριας υπό μονοφασικό φορτίο.....	176
9.4. Μέτρηση της αντίστασης του τυλίγματος.....	179
9.5. Μέτρηση της λειτουργίας της γεννήτριας συνδεδεμένης σε συσσωρευτές.....	180
9.6. Μέτρηση της γεννήτριας με σύνδεση αυτεπαγωγής.....	185
10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	
10.1. Συμπεράσματα.....	191
10.1.1. Η γεννήτρια 3 kW.....	191
10.1.2. Η γεννήτρια 850 W.....	191
10.2. Προτάσεις.....	192
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	
A: Η επίδραση της γεωμετρίας της γεννήτριας στην κυματομορφή της ΗΕΔ.....	195
B: Προγράμματα σε Matlab.....	199
B.1. Διαστασιολόγηση της γεννήτριας με χρήση ορθογώνιων μαγνητών...	199
B.2. Διαστασιολόγηση της γεννήτριας με χρήση ορθογώνιων μαγνητών...	204
B.3. Προσομοίωση των επιδόσεων της γεννήτριας.....	209
B.4. Ανάλυση της λειτουργίας της γεννήτριας για σύνδεση με σύστημα MPPT.....	210
B.5. Προσομοίωση της λειτουργίας για απευθείας σύνδεση σε μπαταρία με δυνατότητα σύνδεσης αυτεπαγωγής.....	212
Βιβλιογραφία.....	217

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1. Μικρές Ανεμογεννήτριες

Η παγκόσμια ανησυχία για τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής έχει οδηγήσει στην ολοένα και αυξανόμενη παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Επιπλέον, το χαμηλό κόστος της ενέργειας αυτής έναντι άλλων συμβατικών (υδρογονάνθρακες κλπ) συμβάλλει ακόμα περισσότερο στην ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών η οποία εκφράζεται με τη δημιουργία αιολικών πάρκων, φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων, μονάδων καύσης βιομάζας κλπ.

Όσον αφορά την αιολική ενέργεια μεγάλα αιολικά πάρκα εγκαθίστανται σε περιοχές με ανέμους υψηλής ταχύτητας και παράγουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας συνήθως σε συνδυασμό με άλλες πηγές (γεννήτριες ντίζελ). Παράλληλα, οι ανεμογεννήτριες μικρής κλίμακας αποκτούν ολοένα και μεγαλύτερο ενδιαφέρον δρώντας συμπληρωματικά προς τα αιολικά πάρκα. Τέτοιες ανεμογεννήτριες έχουν ονομαστική ισχύ κάτω από 70 kW ενώ ανεμογεννήτριες με ισχύ κάτω από 10 kW χαρακτηρίζονται ως ιδιαίτερα μικρές.

Βασικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών αυτών είναι η καμπύλη ισχύος βάσει της οποίας μπορεί να βρεθεί η ενεργειακή απόδοση, το ποσό δηλαδή της ενέργειας που παράγεται σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα συνήθως ενός έτους. Η ενεργειακή απόδοση εξαρτάται από την κατανομή του ανέμου και είναι σημαντικό να γνωρίζουμε ότι οι μικρές ανεμογεννήτριες τοποθετούνται συνήθως σε περιοχές όπου ο άνεμος είναι αρκετά χαμηλός.

Όσον αφορά τη σύνδεση των γεννητριών αυτές μπορούν είτε να αποτελέσουν κομμάτι μιας αυτόνομης εγκατάστασης, είτε να συνδεθούν στο δίκτυο χαμηλής τάσης. Αυτόνομες εγκαταστάσεις συναντώνται εκεί όπου η σύνδεση με το δίκτυο είναι για κάποιο λόγο δύσκολη. Τέτοιες περιπτώσεις είναι οι δύσβατες περιοχές ή τα ιστοπλοϊκά.

Σήμερα, το ένα τρίτο περίπου του παγκόσμιου πληθυσμού δεν έχει πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι μικρές ανεμογεννήτριες μπορούν να κατασκευαστούν εύκολα και φθηνά και να ηλεκτροδοτήσουν σχολεία, κλινικές κ.ά. συμβάλλοντας στην άνοδο του βιοτικού επιπέδου των κατοίκων των αναπτυσσόμενων χωρών.

1.2. Η ενδιάμεση τεχνολογία

1.2.1. Σχεδιασμός βασισμένος στην ενδιάμεση τεχνολογία

Η «ενδιάμεση» τεχνολογία (intermediate technology) ή αλλιώς η «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 αυτή την κατεύθυνση.

Μια μικρή ανεμογεννήτρια (Α/Γ) 1kW κατασκευάστηκε πέρυσι [11] από τελειόφοιτους φοιτητές του ΕΜΠ στα πλαίσια διπλωματικών εργασιών και στα πλαίσια εφαρμογών ενδιάμεσης τεχνολογίας, κυρίως απευθυνόμενες σε αγροτικές περιοχές του αναπτυσσόμενου κόσμου, προσπαθώντας να ικανοποιεί συγκεκριμένα κριτήρια. Οι εφαρμογές ενδιάμεσης τεχνολογίας, με βάση το Consortium for Sustainable Village-Based Development [1], έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Απαιτούν μικρό αρχικό κεφάλαιο: Η μικρή Α/Γ που κατασκευάστηκε έχει συνολικό κόστος πρώτων υλών 600 ευρώ, χωρίς να συμπεριλαμβάνεται το κόστος του ιστού.

Δίνουν έμφαση στην χρήση τοπικών πρώτων υλών, έτσι ώστε να μειωθεί το κόστος και τα προβλήματα ανεφοδιασμού: Τα υλικά της Α/Γ είναι ξύλο, χάλυβας, πολυεστερική ρητίνη, χαλκός και μαγνήτες νεοδυμίου. Όλα τα υλικά μπορούν να βρεθούν τοπικά εκτός από τους μαγνήτες που έχουν αγοραστεί από το εξωτερικό.

Είναι πιο παραγωγικές από πολλές παραδοσιακές τεχνολογίες, αν και χρειάζονται σχετικά εντατική εργασία κατά την κατασκευή τους: Η Α/Γ που κατασκευάστηκε χρειάστηκε 600 εργατοώρες από ανειδίκευτους φοιτητές για να ολοκληρωθεί, αλλά παράγει ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πλήθος εφαρμογών.

Είναι αρκετά μικρές σε κλίμακα, έτσι ώστε να είναι οικονομικά προσιτές σε οικογενειακό ή κοινοτικό επίπεδο: Αυτού του τύπου η Α/Γ μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα οικιακό σύστημα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, είτε σε DC σύστημα για τη φόρτιση συσσωρευτών, είτε σε AC σύστημα στα πλαίσια ενός κοινοτικού μικροδικτύου.

Είναι δυνατή η κατανόηση της λειτουργίας τους, ο έλεγχός τους και η συντήρησή τους από τους ανθρώπους που χρησιμοποιούν την τεχνολογία χωρίς εξειδικευμένη εκπαίδευση: Η κατασκευή της Α/Γ έγινε από ομάδα προπτυχιακών φοιτητών του ΕΜΠ, χωρίς εξειδικευμένες μηχανουργικές γνώσεις. Η συγκεκριμένη κατασκευή έχει υλοποιηθεί σε πολλά μέρη του κόσμου με τη μορφή ολιγοήμερου πρακτικού και θεωρητικού σεμιναρίου, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα κατανόησης, ελέγχου και συντήρησης στους χρήστες.

Μπορεί να παραχθεί η τεχνολογία σε μικρές βιοτεχνίες ή εργαστήρια χωριών και κοινοτήτων: Η Α/Γ κατασκευάστηκε σε μικρό μηχανουργείο στην κατασκήνωση «Μελτέμι» στη Ραφήνα, με τον βασικό εξοπλισμό ενός μικρού εργαστηρίου.

Προϋποθέτουν τη συλλογική εργασία της κοινότητας για τη βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης: Συνολικά εργάστηκαν πέντε άτομα για την ολοκλήρωση της κατασκευής σε διάστημα τριών μηνών.

Προσφέρουν ευκαιρίες για τη συμμετοχή του τοπικού πληθυσμού σε αλλαγές και βελτιώσεις της τεχνολογίας και της διαδικασίας παραγωγής της: Οι φοιτητές που έχουν συμμετάσχει στο εργαστήριο κατασκευής της Α/Γ έχουν τη δυνατότητα να εξοικειωθούν με τις βασικές έννοιες λειτουργίας και σχεδιασμού γεννητριών, αεροδυναμικής και με τη χρήση βασικών μηχανουργικών εργαλείων και τεχνικών κατασκευής. Έτσι, αποκτάται η δυνατότητα τροποποίησης του σχεδιασμού της Α/Γ, όπως και βελτίωσης της διαδικασίας κατασκευής.

Είναι ευέλικτες και μπορούν να προσαρμοστούν σε διαφορετικά μέρη και σε μεταβαλλόμενες συνθήκες: Η Α/Γ μπορεί να σχεδιαστεί για σύνδεση σε AC ή DC σύστημα και για διαφορετικές τιμές ονομαστικής ισχύος. Επίσης, υπάρχει μια πληθώρα εναλλακτικών υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όπως π.χ. ο κέδρος για την κατασκευή των περυγίων, δίνοντας έτσι έμφαση σε τοπικά υλικά που βρίσκονται σε αφθονία.

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην παραγωγή χωρίς να προκαλούν βλάβες στο περιβάλλον: Η χρήση και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μία ανανεώσιμη πηγή, όπως είναι ο άνεμος, μειώνει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικές ρυπογόνες μορφές. Βέβαια, κατά την παραγωγή ορισμένων υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή της Α/Γ, προκαλούνται ρύποι (π.χ. στην παραγωγή χάλυβα) και επίσης χρησιμοποιούνται ορισμένα χημικά υλικά και παράγωγα πετρελαίου, όπως η πολυεστερική ρητίνη.

1.2.2. Κοινωνικές, οικονομικές και πολιτικές προεκτάσεις

Οι κοινωνικές, οικονομικές και πολιτικές προεκτάσεις της ενδιάμεσης τεχνολογίας μπορούν να συγκεντρωθούν στα εξής σημεία:

Επιτρέπει την πιο αποτελεσματική ικανοποίηση των τοπικών αναγκών, γιατί οι τοπικές κοινωνίες είναι ενεργά εμπλεκόμενες στον προσδιορισμό τους και στην πραγματοποίηση των απαιτούμενων εργασιών για την ικανοποίησή τους. Για τους ίδιους λόγους είναι πιο πιθανό αυτή η τεχνολογία να είναι εναρμονισμένη με τις τοπικές παραδόσεις και αξίες.

Συνιστά στην ανάπτυξη εργαλείων που διευρύνουν την ανθρώπινη εργασία και τις ανθρώπινες δεξιότητες, σε αντίθεση με την ανάπτυξη μηχανών που υποκαθιστούν την ανθρώπινη εργασία και εξαλείφουν τις ανθρώπινες δεξιότητες.

Αντιπροσωπεύει μια εύκολα αντιληπτή και ελεγχόμενη κλίμακα δραστηριοτήτων, οργάνωσης και σφαλμάτων, στην οποία άνθρωποι χωρίς εκπαίδευση στην οργάνωση και τη διοίκηση μπορούν να συνεργαστούν και να κατανοήσουν αυτό που κάνουν.

Επιτρέπει την οικονομικότερη λειτουργία αρκετών διαδικασιών, ελαχιστοποιώντας την ανάγκη μεταφοράς υλικών σε μία περίοδο που το κόστος της ενέργειας είναι αυξημένο, προκαλώντας μεγαλύτερη αλληλεπίδραση ανάμεσα στην τοπική βιομηχανία και επιτρέποντας μεγαλύτερη χρήση τοπικών πρώτων υλών και ανθρώπινου δυναμικού.

Καθιστά μη αναγκαίες πολλές ακριβές ή μη διαθέσιμες υπηρεσίες όπως την εύρεση οικονομικών πόρων, την εκπαίδευση, τη διαφήμιση, τη διοίκηση και την παροχή ενέργειας. Αποφεύγει την έλλειψη ελέγχου από την τοπική κοινωνία, που συνήθως συνεπάγεται η χρήση τέτοιων εξωτερικών υπηρεσιών.

Βοηθάει στην εγκαθίδρυση μιας αυτο-συντηρούμενης και συνεχώς επεκτάσιμης δεξαμενής δεξιοτήτων στην κοινότητα, που βασίζεται σε ήδη υπάρχουσες δεξιότητες.

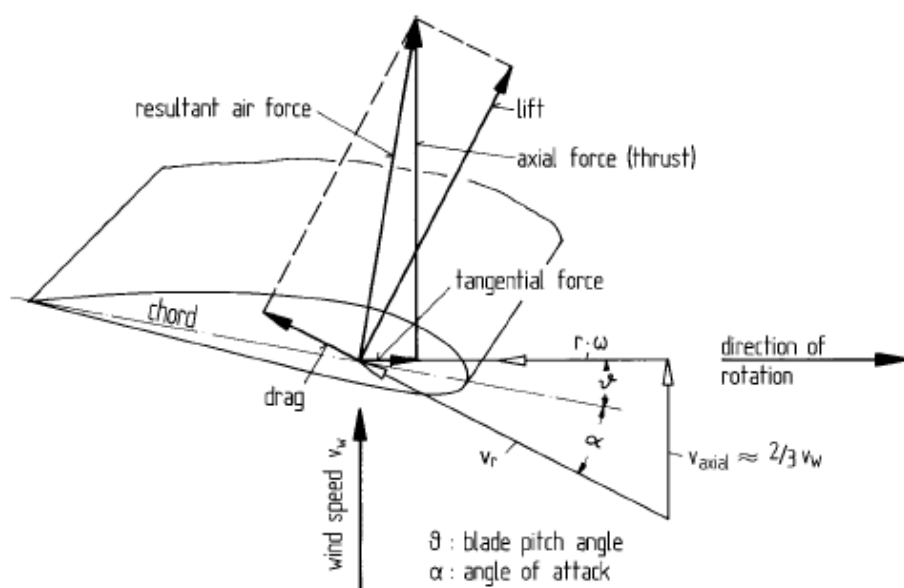
Παρέχει ένα μαξιλάρι ασφάλειας απέναντι στις επιρροές εξωτερικών οικονομικών αλλαγών, όπως π.χ. είναι η κατάρρευση της παγκόσμιας αγοράς ζάχαρης ή η ξαφνική μη διαθεσιμότητα φυτοφαρμάκων.

Βοηθάει στη μείωση της οικονομικής, κοινωνικής και πολιτικής εξάρτησης ανάμεσα σε άτομα, περιοχές και έθνη, αναγνωρίζοντας πως οι άνθρωποι μπορούν και θα κάνουν πράγματα για τις κοινότητές τους, εάν έχουν έναν τρόπο να τα υλοποιήσουν.

1.3. Αεροδυναμικά Χαρακτηριστικά

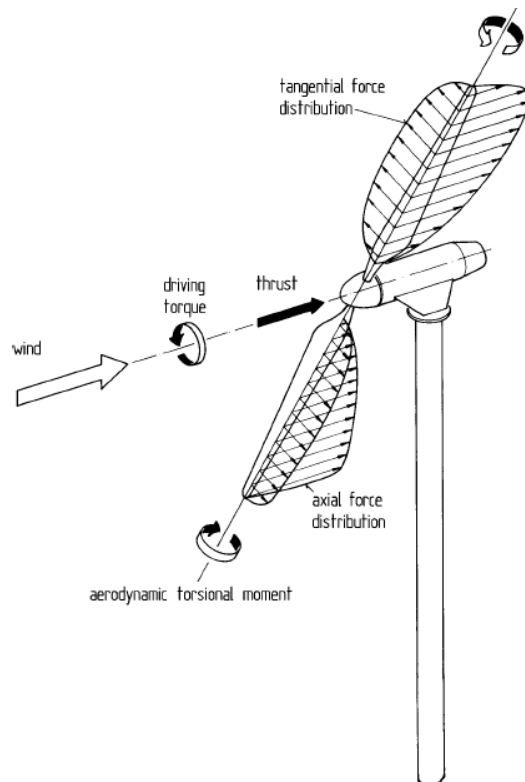
1.3.1. Βασικές έννοιες αεροδυναμικής

Ξεκινώντας τη σχεδίαση μιας ανεμογεννήτριας πρωταρχική εργασία είναι η κατανόηση της λειτουργίας του αεροδυναμικού συστήματος. Αυτό περιλαμβάνει την έλικα, το σύστημα προσανατολισμού καθώς και το σύστημα προστασίας furling. Η κατασκευή των φτερών γίνεται από ξύλο και περιγράφεται στο [2]. Τα ξύλινα φτερά μπορεί να μη φαίνονται η καλύτερη επιλογή, και δεν είναι όσον αφορά τις μεγάλες ανεμογεννήτριες, αλλά το μικρό τους βάρος, το χαμηλό τους κόστος καθώς και η ευκολία στην επεξεργασία τα καθιστούν ιδανικά για εφαρμογές χαμηλού κόστους. Φτερωτές για μικρές ανεμογεννήτριες μπορούν να κατασκευαστούν και με μείγματα ρητίνης, ωστόσο το κόστος των καλουπιών είναι απαγορευτικό και συμφέρει μόνο στην περίπτωση της μαζικής παραγωγής.



Σχήμα 1.1: Η αεροτομή του πτερυγίου μιας ανεμογεννήτριας.

Στο σχήμα 1.1 φαίνεται η αεροτομή του πτερυγίου μιας ανεμογεννήτριας. Η ακμή στην οποία προσπίπτει ο άνεμος ονομάζεται ακμή πρόσπτωσης (leading edge) ενώ η άλλη ακμή ονομάζεται ακμή διαφυγής (trailing edge). Η γραμμή που ενώνει τις δύο ακμές λέγεται χορδή της αεροτομής. Ο σχετικός άνεμος Vr που προσπίπτει στη φτερωτή αποτελείται από δύο συνιστώσες, την πραγματική ταχύτητα του ανέμου V_{axial} καθώς και τη μεταφορική ταχύτητα του άκρου του πτερυγίου ωR . Έτσι σχηματίζονται δύο γωνίες: η γωνία πρόσπτωσης α (angle of attack) καθώς και η γωνία βήματος πτερυγίου θ . Όπως τονίζεται στο [3] οι δύο γωνίες συχνά συγχέονται μεταξύ τους. Είναι σημαντικό πάντως να γίνει αντιληπτό ότι η γωνία πρόσπτωσης είναι αεροδυναμική παράμετρος ενώ η γωνία βήματος κατασκευαστική. Παρατηρώντας το σχήμα μπορεί κανείς απλά να θεωρήσει ότι καθώς προσπίπτει ο άνεμος ασκεί δύο δυνάμεις στη φτερωτή, τη δύναμη άνωσης (lift) και την τριβή (drag) που έχει την κατεύθυνση της σχετικής ταχύτητας ανέμου. Υπολογίζοντας τις δύο παραπάνω συνιστώσες για κάθε κομμάτι των φτερών μπορεί κανείς να βρει την κατανομή των αεροδυναμικών δυνάμεων στη φτερωτή. Αυτό ακριβώς φαίνεται στο σχήμα 1.2. Οι δυνάμεις χωρίζονται σε δυο ομάδες, μια στο επίπεδο περιστροφής (η εφαπτομενική δύναμη) και μια στο κάθετο επίπεδο (thrust). Ολοκληρώνοντας την εφαπτομενική δύναμη προκύπτει η ροπή που οδηγεί το δρομέα της γεννήτριας - η μηχανική ροπή, και ολοκληρώνοντας την κατανομή της thrust παίρνουμε τη συνολική της τιμή.



Σχήμα 1.2: Η κατανομή των δυνάμεων που ασκούνται σε μια φτερωτή.

Γενικά, και επιστρέφοντας στο σχήμα 1.1 η δύναμη άνωσης είναι η υπεύθυνη για την περιστροφική κίνηση της γεννήτριας, ενώ η δύναμη τριβής αντιτίθεται σε αυτή.

Προκειμένου λοιπόν να επιτευχθεί υψηλός αεροδυναμικός συντελεστής, με άλλα λόγια να μπορεί κανείς να αποσπάσει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μηχανική ενέργεια από τον άνεμο, ο λόγος αυτών των δύο πρέπει να ελαχιστοποιηθεί. Αυτόν ακριβώς το λόγο καθορίζει η γωνία πρόσπτωσης α , η ιδανική τιμή της οποίας ορίζεται γύρω στις 4° . Για κάθε σημείο όμως της φτερωτής η συνιστώσα του σχετικού ανέμου ωR αλλάζει αφού αλλάζει η ακτίνα, με αποτέλεσμα η γωνία α να αλλάζει και εκείνη. Δεδομένης λοιπόν της θεωρητικής βέλτιστης τιμής των 4° θα πρέπει να αλλάζει η γωνία θ προκειμένου να επιτυγχάνεται η βέλτιστη λειτουργία. Πιο κοντά στον άξονα της γεννήτριας, όπου η ακτίνα και άρα η συνιστώσα ωR είναι πολύ μικρή, η γωνία θ θα είναι μεγαλύτερη δίνοντας έτσι μια αίσθηση στρέψης στα φτερά.

1.3.2. Χαρακτηριστικά ισχύος

Είναι γνωστό ότι η μηχανική ισχύς που μπορεί να δεσμευτεί από τον άνεμο δίνεται από τη σχέση:

$$P_{air} = \frac{1}{2} \rho c_p \pi R_{turb}^2 v_w^3$$

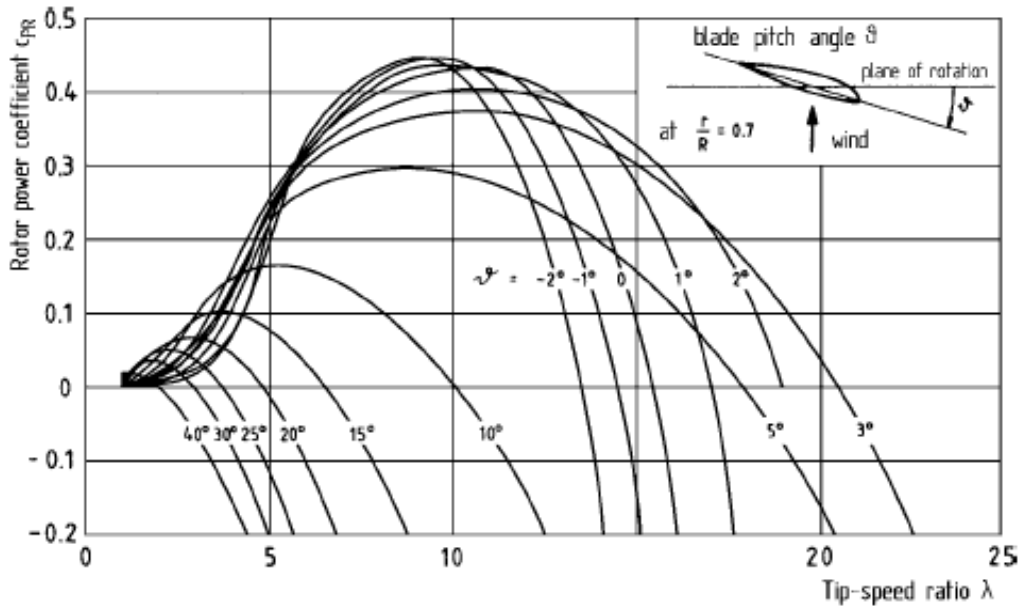
όπου:

- ρ η πυκνότητα του ανέμου
- c_p ο αεροδυναμικός συντελεστής
- R_{turb} η ακτίνα της φτερωτής
- v_w η ταχύτητα του ανέμου

Ο βασικός περιορισμός προκύπτει από το νόμο του Betz που αποδεικνύει ότι η μέγιστη τιμή του συντελεστή αυτού είναι το 0.593. Ο λόγος όμως αυτός δεν παραμένει σταθερός κατά τη λειτουργία μιας ανεμογεννήτριας αλλά αλλάζει σε σχέση με τον άνεμο, τις στροφές και την ακτίνα της φτερωτής. Πιο συγκεκριμένα εισάγεται στο σημείο αυτό ο λόγος ακροπτερυγίου λ για τον οποίο ισχύει:

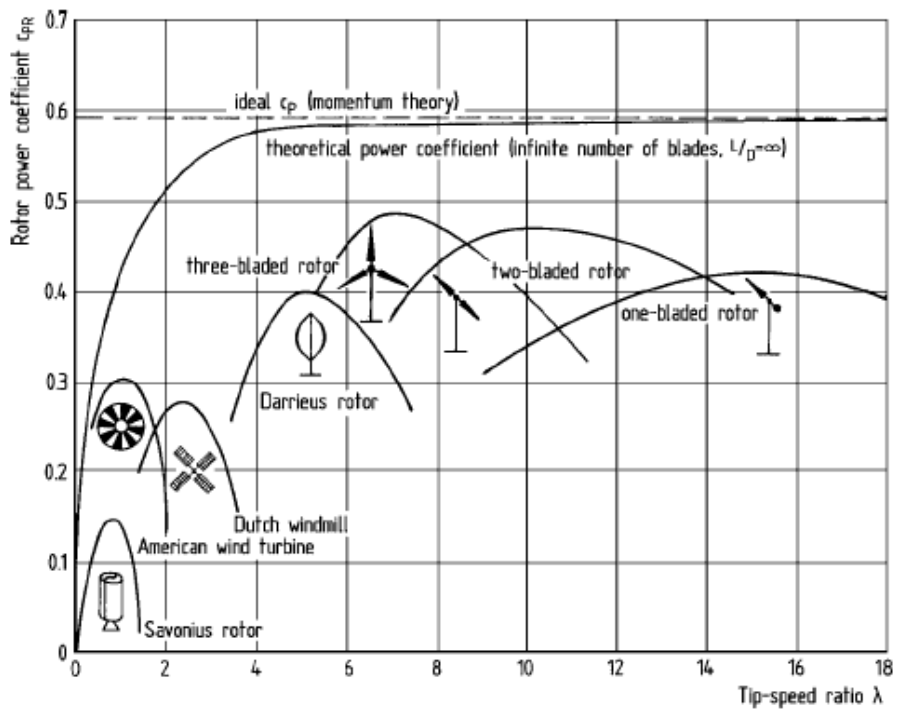
$$\lambda = \frac{\omega R_{turb}}{v_w}$$

όπου ω η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας. Γενικά λοιπόν ο αεροδυναμικός συντελεστής είναι συνάρτηση του λόγου ακροπτερυγίου. Στο σχήμα 1.3 φαίνονται ενδεικτικά κάποιες καμπύλες που δείχνουν τη μεταβολή του αεροδυναμικού συντελεστή σε σχέση με το λ και τη γωνία βήματος πτερυγίου θ .



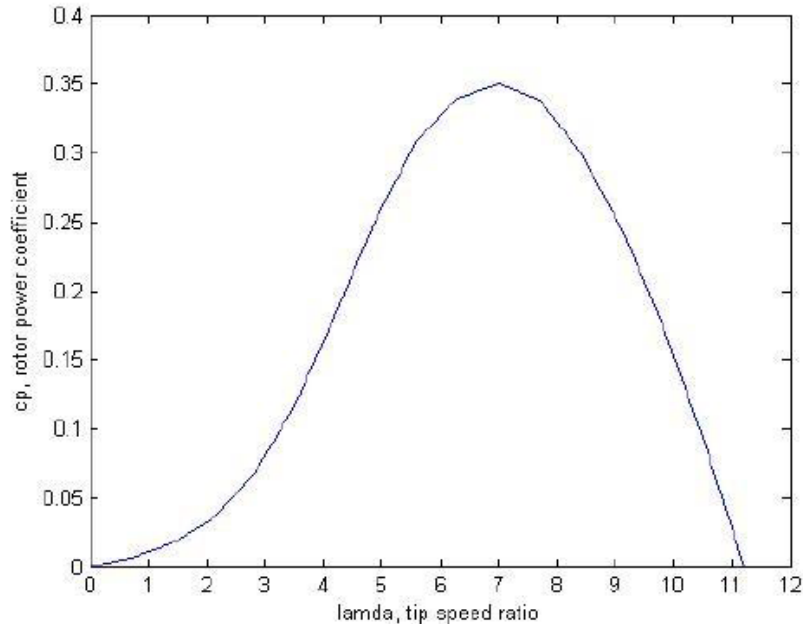
Σχήμα 1.3: Η μεταβολή του αεροδυναμικού συντελεστή σε σχέση με τον λόγο ακροπτερυγίου και τη γωνία βήματος πτερυγίου.

Οι καμπύλες αυτές έχουν να κάνουν με την κατασκευή της φτερωτής και κυρίως εξαρτώνται [3] από τον αριθμό των φτερών, το μήκος της χορδής κατά μήκος του φτερού, τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά και την κατανομή της γωνίας θ κατά μήκος των φτερών. Τα παραπάνω φαίνονται στο σχήμα 1.4.



Σχήμα 1.4: Οι καμπύλες C_p - λ για διάφορους τύπους φτερωτών.

Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή έχουν δοθεί από τον κατασκευαστή ορισμένες τιμές του αεροδυναμικού συντελεστή για συγκεκριμένα λ ώστε να βρεθεί η σχέση $c_p=f(\lambda)$ που θα βοηθήσει στην ανάλυση. Έτσι προέκυψε η εξής καμπύλη, η οποία προσεγγίζεται με ένα πολυώνυμο δεκάτου βαθμού:



Σχήμα 1.5: Η καμπύλη c_p - λ για τη φτερωτή που θα χρησιμοποιηθεί.

$$c_p(\lambda) = p1 \cdot \lambda^{10} + p2 \cdot \lambda^9 + p3 \cdot \lambda^8 + p4 \cdot \lambda^7 + p5 \cdot \lambda^6 + p6 \cdot \lambda^5 + p7 \cdot \lambda^4 + p8 \cdot \lambda^3 + p9 \cdot \lambda^2 + p10 \cdot \lambda^1 + p11$$

όπου:

$$p1 = -2.2042e-008, p2 = 1.1712e-006, p3 = -2.5915e-005, p4 = 0.00030705$$

$$p5 = -0.0020796, p6 = 0.0079564, p7 = -0.016329, p8 = 0.018201, p9 = -0.0064757$$

$$p10 = 0.0092843, p11 = 3.2532e-005$$

Ο βέλτιστος λόγος ακροπτερυγίου είναι 7 ενώ ο μέγιστος αεροδυναμικός συντελεστής είναι ίσος με 0.35.

1.3.3. Η κατανομή του ανέμου

Εκείνο που ενδιαφέρει περισσότερο σε μια ανεμογεννήτρια είναι η ενεργειακή της απόδοση. Πρόκειται ουσιαστικά για μια εκτίμηση ως προς την ενέργεια που μπορεί να δώσει η γεννήτρια σε ένα χρονικό διάστημα ενός συνήθως έτους. Από όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, αντιλαμβάνεται κανείς ότι από τη στιγμή που ο άνεμος σε μια περιοχή δεν είναι σταθερός, δε θα είναι σταθερή και η διαθέσιμη μηχανική ισχύς στην είσοδο της γεννήτριας, η οποία θα είναι δύσκολο να υπολογιστεί ούτως ή άλλως καθώς με την αλλαγή του ανέμου και των στροφών αλλάζει το λ και άρα το c_p . Γι' αυτό είναι απαραίτητη η χρήση μιας κατανομής για τον άνεμο. Σύμφωνα με το [4] η κατανομή της ταχύτητας του ανέμου σε μια θέση περιγράφεται συνήθως από τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Weibull:

$$h(v_w) = \frac{k}{c} \left(\frac{v_w}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v_w}{c}\right)^k}$$

όπου k η παράμετρος μορφής και c η παράμετρος κλίμακας. Για τον ελλαδικό χώρο συνήθως ισχύει $k=1,5-2$ και εδώ επιλέγεται η τιμή 2 που δίνει την κατανομή Rayleigh:

$$h(v_w) = \frac{2}{c^2} v_w e^{-\left(\frac{v_w}{c}\right)^2}$$

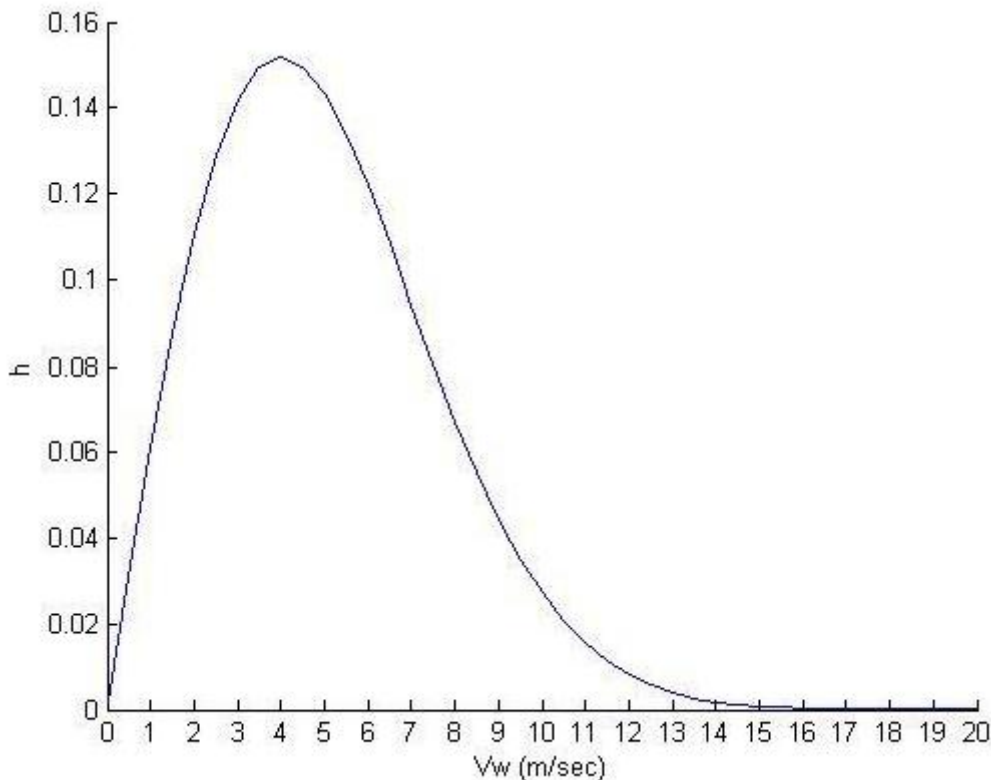
Η παράμετρος κλίμακας c καθορίζει τη μέση τιμή του ανέμου στη θέση που εξετάζεται. Γενικά ισχύει για την κατανομή Rayleigh:

$$\bar{V}_w \cong 0,866 \cdot c$$

οπότε προκύπτει η τελική κατανομή που εξαρτάται πλέον από τη μέση τιμή ανέμου:

$$h(v_w) = \frac{1,57 \cdot v_w}{\bar{v}_w^2} e^{-0,785\left(\frac{v_w}{\bar{v}_w}\right)^2}$$

Στην εργασία αυτή θα θεωρήσουμε ότι ο μέσος άνεμος είναι ίσος με 5m/s και έτσι προκύπτει και η μορφή της κατανομής που θα χρησιμοποιηθεί:



Σχήμα 1.6: Η στατιστική κατανομή του ανέμου για κατανομή Rayleigh και μέση τιμή ανέμου τα 5m/s.

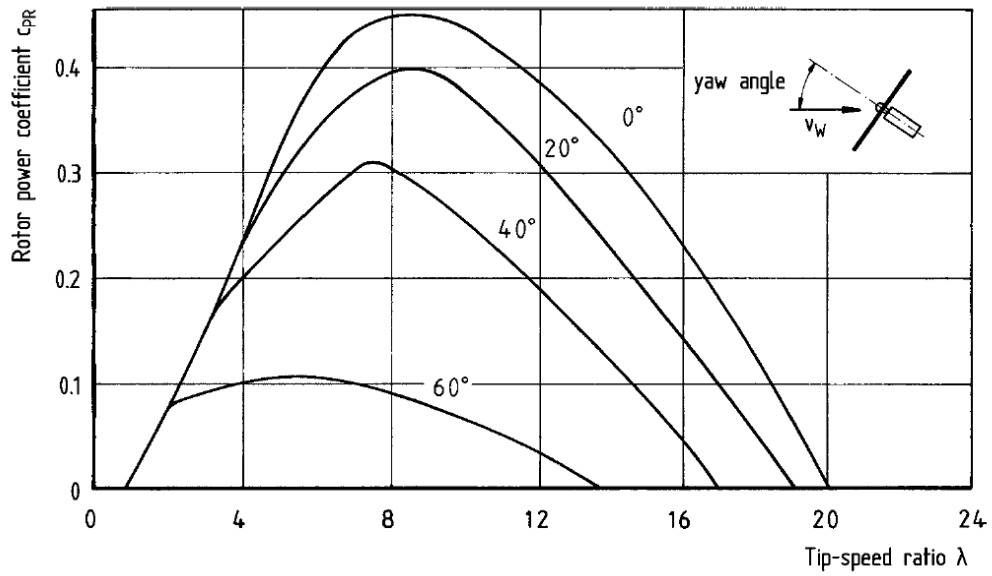
Γνωρίζοντας την κατανομή του ανέμου, με απλά λόγια δηλαδή πόσες φορές θα φυσήξει με κάποια συγκεκριμένη ταχύτητα, και άμα κανείς ξέρει την καμπύλη ισχύος (ποια η παραγόμενη ισχύς για κάθε άνεμο) της ανεμογεννήτριας μπορεί εύκολα να βρεθεί η ενέργεια που θα δώσει η γεννήτρια σε ένα χρόνο, αντικείμενο επόμενου κεφαλαίου.

1.3.4. Ο περιορισμός της ισχύος

Κάθε ανεμογεννήτρια είναι σχεδιασμένη για έναν συγκεκριμένο άνεμο στον οποίο θα δώσει τα ονομαστικά της. Όταν η λειτουργία λειτουργεί πάνω από τα ονομαστικά της υπάρχει κίνδυνος βλάβης. Ο κίνδυνος αυτός αναφέρεται αρχικά στην περίπτωση όπου θα φυσήξει άνεμος μεγαλύτερος από τον ονομαστικό οπότε και το ρεύμα που θα περάσει από το τύλιγμα θα είναι μεγαλύτερο με κίνδυνο υπερθέρμανσης. Δευτερευόντως, ο κίνδυνος αφορά τα ίδια τα φτερά που μπορεί να μην αντέχουν σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου. Υπάρχει λοιπόν ανάγκη να περιοριστεί η ισχύς από τα ονομαστικά και μετά.

Σε μεγάλες ανεμογεννήτριες αυτό γίνεται απλά αλλά αλλάζοντας τη γωνία βήματος θ, μειώνοντας έτσι το εμβαδόν της φτερωτής που βλέπει ο άνεμος και άρα και την ισχύ. Με την τεχνική αυτή (pitch control) μπορεί η ισχύς να διατηρηθεί ακριβώς στα ονομαστικά ακόμα και σε μεγαλύτερους ανέμους.

Αυτός είναι ο βασικός τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται ο έλεγχος της ισχύος. Πρόκειται όμως για μέθοδο πολύ ακριβή και ασύμφορη για εφαρμογές χαμηλού κόστους. Έτσι αναπτύχθηκε το σύστημα furling. Η λογική του συστήματος αυτού είναι ουσιαστικά να απομακρύνει την ανεμογεννήτρια από το μέτωπο του ανέμου όταν ο άνεμος αυξάνεται επικίνδυνα. Το σύστημα furling θα μπορούσε να θεωρηθεί μέρος του συστήματος Yaw. Πρόκειται για μια ουρά η οποία κατευθύνει τη γεννήτρια προς τον άνεμο όταν αλλάζει η διεύθυνσή του. Ανάλογα με το βάρος και την κατασκευή του συστήματος αυτού, για συγκεκριμένους (άνω των ονομαστικών) ανέμους ενεργοποιείται το σύστημα furling που πλέον απομακρύνει τη φτερωτή από τον άνεμο κατά τη γωνία yaw [3]. Ο περιορισμός της ισχύος (μέσω μείωσης του αεροδυναμικού συντελεστή c_p) φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.7: Ο περιορισμός του αεροδυναμικού συντελεστή μέσω της γωνία yaw.

Η ακριβής λειτουργία του συστήματος αυτού δεν είναι ωστόσο καθορισμένη και γι' αυτό δεν μπορούν να γίνουν ακριβείς υπολογισμοί της ισχύος για ανέμους άνω των ονομαστικών, και άρα ακριβείς υπολογισμοί της ενεργειακής απόδοσης μετέπειτα.

Κεφάλαιο 2-Σύγχρονες γεννήτριες αξονικής ροής μονίμων μαγνητών

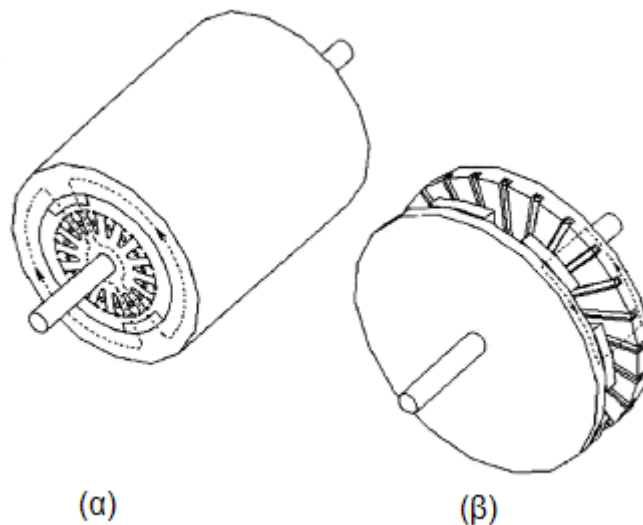
2.1. Γεννήτριες αξονικής και ακτινικής ροής

Αν και οι μηχανές μονίμων μαγνητών (PM) μας είναι γνωστές εδώ και αρκετό καιρό, ποτέ δε βρήκαν εκτενή χρήση καθώς η ποιότητα των μαγνητών δεν ήταν ικανοποιητική. Με τη βελτίωση όμως των μαγνητικών υλικών και ιδιαίτερα μετά την εισαγωγή του NdFeB οι μηχανές μονίμων μαγνητών ήρθαν και πάλι στο προσκήνιο.

Διακρίνουμε δύο βασικά ήδη τέτοιων μηχανών:

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

Η βασική δομική τους διαφορά, που παρατηρείται άμεσα στα σχήμα 2.1 είναι ότι η πρώτη έχει δισκοειδή δομή ενώ η δεύτερη κυλινδρική. Στην πρώτη περίπτωση η ροή ταξιδεύει στην ακτινική διεύθυνση ενώ στη δεύτερη στη διεύθυνση του άξονα της γεννήτριας.



Σχήμα 2.1: α) μηχανή ακτινικής ροής, β) μηχανή αξονικής ροής.

Οι μηχανές αξονικής ροής άργησαν ιδιαίτερα να χρησιμοποιηθούν κυρίως για τους παρακάτω λόγους:

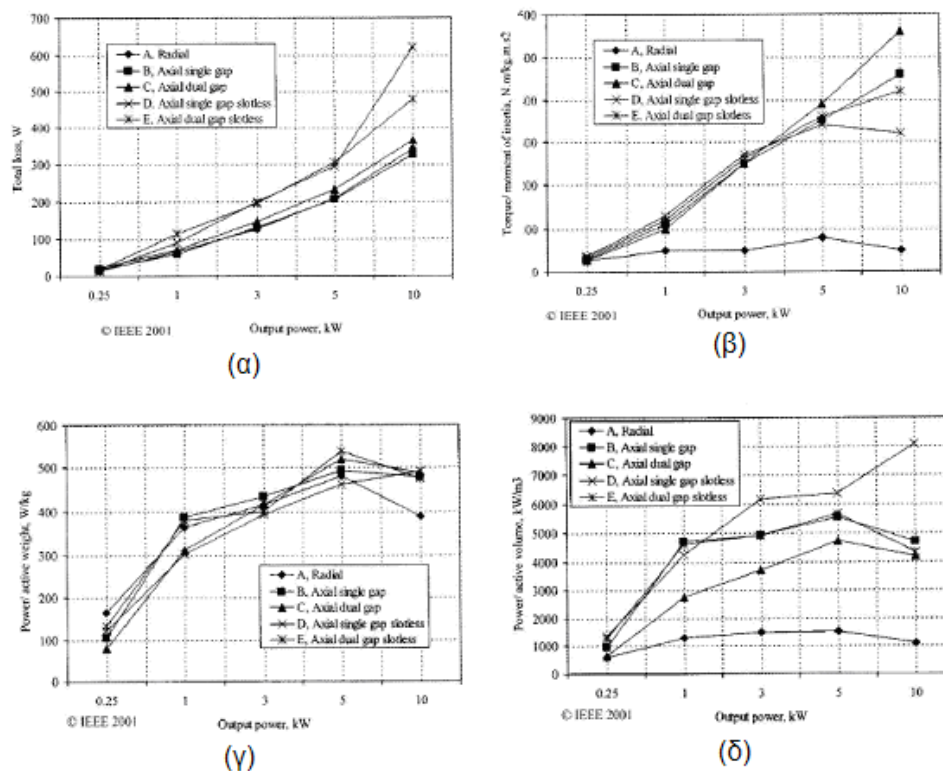
- Ανάπτυξη υψηλής ελκτικής δύναμης μεταξύ στάτη και δρομέα
- Δυσκολίες που κυρίως είχαν να κάνουν με την κατασκευή του πυρήνα της μηχανής
- Υψηλό κόστος κατασκευής
- Δυσκολία στην τελική συναρμολόγηση

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 εγκατάστασης μεγαλύτερου αριθμού πόλων και άρα χρήσης της μηχανής αυτής σε εφαρμογές υψηλής συχνότητας και χαμηλής ταχύτητας.
- 5) Τέλος, πολλοί δίσκοι μπορούν να συνδυαστούν για την επίτευξη υψηλότερης ισχύος ή ροπής.

Αξίζει όμως να αναφερθεί ότι από ένα σημείο και μετά (όταν η ακτίνα της μηχανής αξονικής ροής γίνει ίση με το διπλάσιο του μήκους μιας ακτινικής [5]) η μηχανή αξονικής ροής χάνει τα πλεονεκτήματά της που αφορούν το επίπεδο ισχύος που μπορεί αυτή να προσφέρει. Ή αντίστροφα, ένα υψηλό επίπεδο ισχύος απαιτεί μεγαλύτερο όγκο μηχανής αξονικής ροής παρά ακτινικής.

Μια διαγραμματική σύγκριση των δύο μηχανών φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 2.2: Σύγκριση διαφόρων μηχανών αξονικής ροής με μία ακτινικής. Φαίνονται τα εξής μεγέθη σε σχέση με την αποδιδόμενη ισχύ: α) Συνολικές απώλειες, β) ροπή, γ) ισχύς προς ενεργό βάρος, δ) ισχύς προς ενεργό όγκο.

Σύγκριση μιας μηχανής αξονικής ροής και μιας ακτινικής έχει γίνει στο [6]. Εκεί συγκρίνονται δύο μικρές γεννήτριες 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.

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 [7]. 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. Σύμφωνα με το συγγραφέα σημαντικότερο είναι να μειώσουμε το κόστος και έτσι προκρίνονται οι μηχανές ακτινικής ροής.

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.

2.2. Οι γεννήτριες αξονικής ροής μονίμων μαγνητών

2.2.1. Βασικά χαρακτηριστικά

Υπάρχουν αρκετά ήδη και διατάξεις μηχανών αξονικής ροής. Συνοπτικά μπορούμε να τις χαρτογραφήσουμε ως εξής:

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

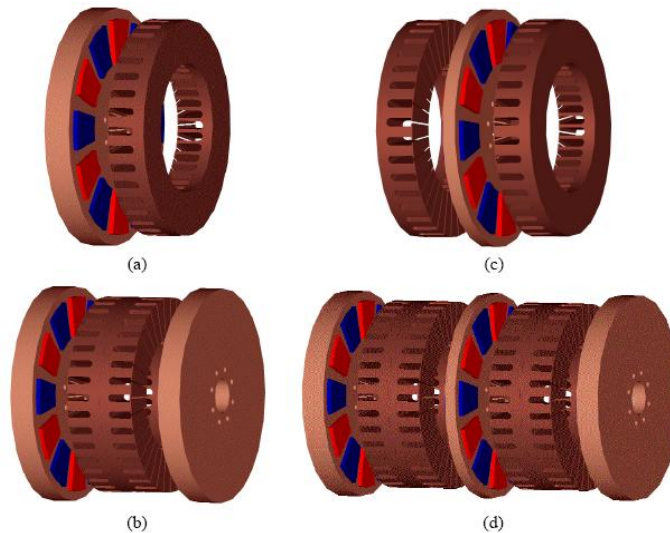
3) Πολλαπλών δίσκων

Πριν προχωρήσουμε στην επιλογή, ανάλυση και σύγκριση ορισμένων εκ των παραπάνω μηχανών καλό είναι να κάνουμε μια γενική αναφορά σε δύο από τα χαρακτηριστικά που επαναλαμβάνονται σε κάθε είδος. Τους 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 και ενισχύουν 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.

Το μειονέκτημα είναι η δημιουργία ροπής ευθυγράμμισης (Cogging Torque). 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. 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:



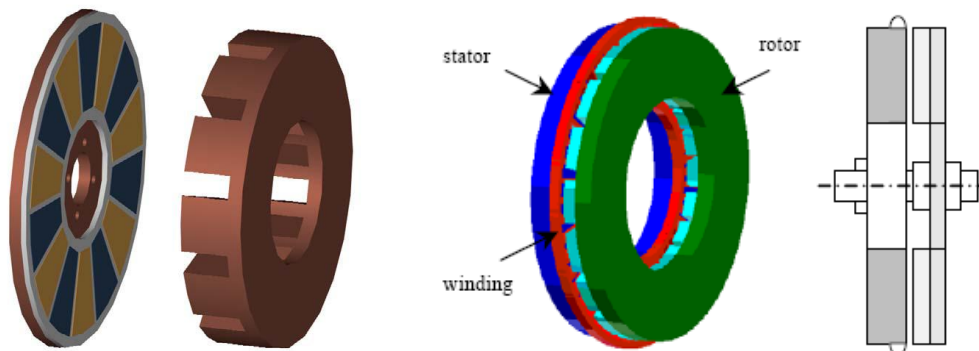
Σχήμα 2.3: Διάφορες τοπολογίες μηχανών με αύλακες.

Πυρήνας: Ανυπαρξία πυρήνα σημαίνει ανυπαρξία απωλειών υστέρησης και δινορρευμάτων. Με λίγα λόγια υψηλότερη απόδοση καθώς και γραμμική σχέση ροπής-ρεύματος. Τέλος, η απουσία σιδήρου έχει σαν αποτέλεσμα να μην υπάρχει ροπή ευθυγράμμισης και ελκτικές δυνάμεις μεταξύ στάτη και δρομέα και άρα η εκκίνηση και η κατασκευή να είναι πιο εύκολες.

Ανυπαρξία όμως πυρήνα σημαίνει και μεγαλύτερους μαγνήτες στη γεννήτρια καθώς ο πυρήνας είναι ουσιαστικά αυτός που ενισχύει το πεδίο. Αποτέλεσμα το υψηλότερο κόστος της μηχανής.

2.2.2. Μονός δρομέας-μονός στάτης

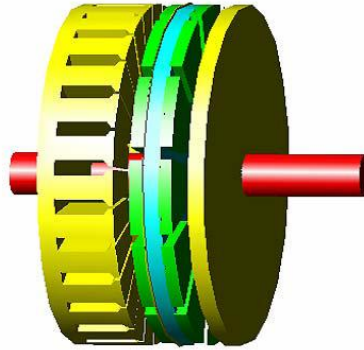
Η πιο απλή περίπτωση μηχανής αξονικής ροής είναι αυτή του μονού δρομέα-μονού στάτη. Η μηχανή αυτή αναλύεται εκτενώς στη βιβλιογραφία [8], [9], [10]. Στο δρομέα τοποθετούνται οι μαγνήτες, οι οποίοι εναλλάσσονται σε πολικότητα ενώ ο στάτης μπορεί να διαθέτει σιδερένιο πυρήνα και αύλακες όπως στο σχήμα:



Σχήμα 2.4: Η τοπολογία μονού δρομέα-μονού στάτη.

Στην περίπτωση αυτή, έχουμε ισχυρότερο πεδίο με λιγότερους μαγνήτες αλλά επίσης έχουμε υψηλή ροπή ευθυγράμμισης, Επιπλέον ασκείται μεγάλη ελκτική δύναμη μεταξύ του στάτη και του δρομέα που μπορεί να παραμορφώσει τους δίσκους. Απέναντι στο πρόβλημα αυτό έχουν αναπτυχθεί σύμφωνα με το [8] δύο άλλες

διατάξεις. Στην πρώτη περίπτωση τοποθετείται ένας ακόμα στάτης, όπως στο σχήμα, καθώς και επιπλέον μαγνήτες στην άλλη πλευρά του δρομέα με στόχο να εξισορροπηθεί η έλξη στάτη-δρομέα. Αντίστοιχη τοπολογία προκύπτει αν προσθέσουμε έναν ακόμα δρομέα.

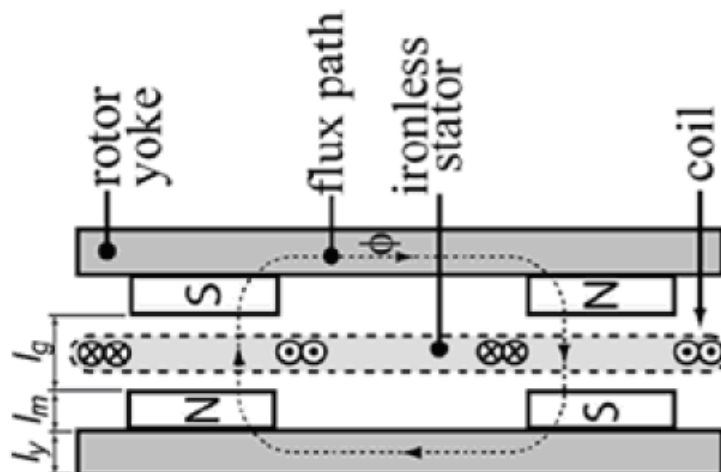


Σχήμα 2.5: Μονός δρομέας-μονός στάτη με επιπλέον στάτη για ισορροπία.

2.2.3. Διπλός δρομέας - μονός στάτης

Η τοπολογία αυτή έχει μελετηθεί εκτενώς στο [11]. Όπως βλέπουμε και στο σχήμα ο δρομέας είναι διπλός και φέρει τους μαγνήτες και στις δύο πλευρές του. Κάθε μαγνήτης έχει αντίθετη πολικότητα από τον απέναντι και τον διπλανό του. Το τύλιγμα είναι τοποθετημένο σε διαμαγνητικό, μη αγωγίμο στάτη (πιθανώς από ρητίνη). Μπορεί να είναι διανεμημένο ή συγκεντρωμένο.

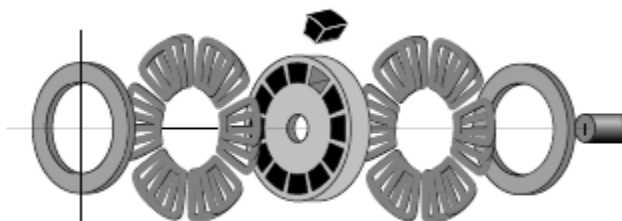
Μεγάλη σημασία δίνεται στο γεγονός ότι δεν υπάρχει πυρήνας. Αυτό σημαίνει ότι δεν έχουμε απώλειες υστέρησης και δινορρευμάτων καθώς και ροπή ευθυγράμμισης με το γνωστό μειονέκτημα του αυξημένου κόστους και της εύκολης κατασκευής. Η τοπολογία αυτή θα μας απασχολήσει εκτενώς στη συνέχεια.



Σχήμα 2.6: Το ευθύγραμμο ανάπτυγμα της τοπολογίας διπλού δρομέα-μονού στάτη.

2.2.4. Διπλός στάτης-μονός δρομέας

Σε αντιστοιχία με την προηγούμενη τοπολογία μπορούμε να έχουμε διπλό στάτη στο εξωτερικό ο οποίος θα φέρει τα τυλίγματα και στο εσωτερικό τον δρομέα με τους μαγνήτες. Η διάταξη έχει μελετηθεί στα [6], [12] και [13] και φαίνεται στο σχήμα 2.7 που ακολουθεί:



Σχήμα 2.7: Μηχανή αξονικής ροής διπλού στάτη-μονού δρομέα.

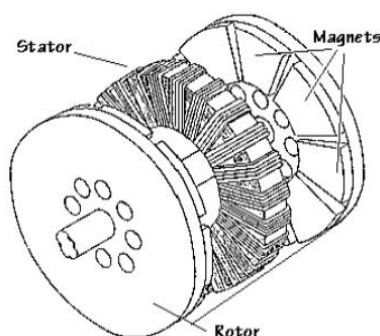
Κάθε μαγνήτης έχει αντίθετη πολικότητα από τον διπλανό του και ο δρομέας είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε οι μαγνήτες να έχουν επαφή με το διάκενο και στις δύο πλευρές τους. Σύμφωνα με το [13] η τοπολογία αυτή έχει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Πολύ χαμηλή ροπή ευθυγράμμισης
- Πολύ καλή ψύξη
- Μικρή σύγχρονη αντίδραση
- Μικρή ποσότητα σιδήρου και άρα ελαφριά κατασκευή

2.2.5. Συνδεσμολογία Torus

Μια άλλη πρόταση αξονικής γεννήτριας μονίμων μαγνητών που θα μελετήσουμε είναι η συνδεσμολογία Torus. Η μηχανή αυτή έχει πάρει το όνομά της από τη μορφή των τυλιγμάτων της και μπορεί να πάρει διάφορες μορφές [9] με το δρομέα στο εσωτερικό ή στο εξωτερικό, με αύλακες ή χωρίς, με πυρήνα ή χωρίς. Η τοπολογία αυτή μελετάται στα [14], [15] και [16].

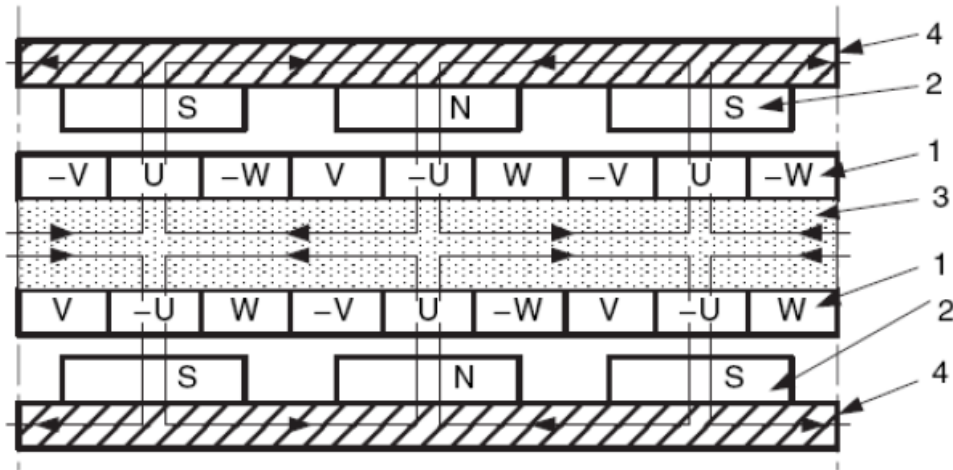
Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται μια απεικόνιση της μηχανής.



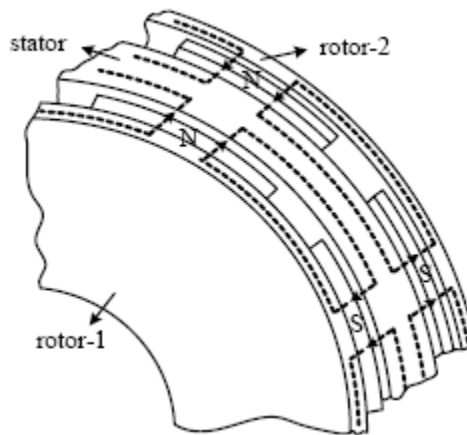
Σχήμα 2.8: Μηχανή διπλού δρομέα-μονού στάτη με τύλιγμα Torus.

Εκτός από την ύπαρξη του πυρήνα στη διάταξη αυτή, που όπως έχουμε δει μπορεί να προκαλέσει αρκετές δυσκολίες τόσο στη συναρμολόγηση όσο και κατά τη λειτουργία λόγω των απωλειών, η κατασκευή του τυλίγματος φαίνεται πολύπλοκη με την πρώτη ματιά.

Η διαδρομή που θα ακολουθήσει η ροή στην περίπτωση αυτή φαίνεται στα παρακάτω δύο σχήματα:



Σχήμα 2.9: Ευθύγραμμο ανάπτυγμα μηχανής Torus.



Σχήμα 2.10: Η ροή σε τρισδιάστατη απεικόνιση.

Η ροή φεύγει από τον μαγνήτη με βόρεια πολικότητα N, περνάει το διάκενο και ταξιδεύει μέσω του πυρήνα προς τον διπλανό μαγνήτη νότιας πολικότητας S περνώντας το διάκενο ακόμα μια φορά και κλείνοντας το μονοπάτι μέσω του υλικού του δρομέα κόβοντας ταυτόχρονα κάθετα τα τορροειδή τυλίγματα.

Σα γενικά χαρακτηριστικά της μηχανής αυτής θα μπορούσαμε να αναφέρουμε επιγραμματικά τα εξής:

1. Μεγάλος λόγος ισχύος προς βάρος και ροπής προς βάρος.

2. Μικρά άκρα τυλιγμάτων και άρα λιγότερες απώλειες χαλκού και καλύτερη απόδοση.
3. Μικρές τιμές της αυτεπαγωγής μαγνήτισης και σκέδασης της μηχανής (απουσία αυλάκων)
4. Πολύ χαμηλή έως ανύπαρκτη ροπή ευθυγράμμισης (απουσία αυλάκων).

Όπως έχουμε σημειώσει και παραπάνω η απουσία αυλάκων μας οδηγεί στη χρήση μεγαλύτερων μαγνητών και άρα στην αύξηση του κόστους της μηχανής.

2.2.6. Συγκριτική μελέτη

Σύμφωνα με το [13] η μηχανή διπλού στάτη μονού δρομέα είναι καλύτερη από τη μηχανή μονού δρομέα-μονού στάτη καθώς η τελευταία έχει το γνωστό μειονέκτημα της μεγάλης έλξης στάτη-δρομέα. Η ίδια μηχανή προτιμάται από την τοπολογία Torus καθώς η τελευταία δεν έχει καλή ψύξη και είναι αρκετά πολύπλοκη στην κατασκευή της. Επιπλέον η τοπολογία διπλού στάτη-μονού δρομέα χωρίς πυρήνα αναμένεται να έχει μικρότερη σύγχρονη αντίδραση απ' ό,τι η τοπολογία Torus.

Μια πολύ σημαντική συγκριτική μελέτη για μηχανές αξονικής ροής γίνεται στο [8]. Μελετώνται οι εξής τοπολογίες:

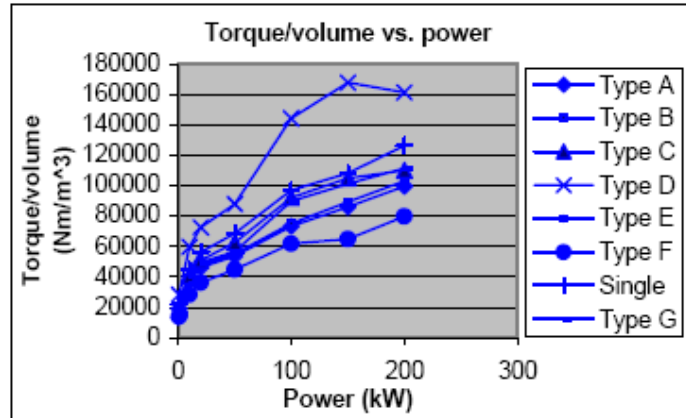
- A) Μηχανή ακτινικής ροής με εσωτερικό δρομέα
- B) Μηχανή ακτινικής ροής με εξωτερικό δρομέα
- C) Μηχανή αξονικής ροής διπλού στάτη-μονού δρομέα με αύλακες στον πυρήνα
- D) Μηχανή αξονικής ροής διπλού δρομέα-μονού στάτη με αύλακες στον πυρήνα
- E) Μηχανή αξονικής ροής μονής πλευράς με ισορροπία στο στάτη
- F) Μηχανή αξονικής ροής μονής πλευράς με ισορροπία στο δρομέα
- G) Μηχανή αξονικής ροής με τορροειδές τύλιγμα

Κάποια από τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για τη σύγκριση των παραπάνω μηχανών (ίδιων περίπου προδιαγραφών και για σύνδεση χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων) ήταν:

- 1) Ροπή προς όγκο και ροπή προς βάρος σε σχέση με την ισχύ
- 2) Βάρος μαγνητών σε σχέση με την ισχύ
- 3) Συνολικός όγκος σε σχέση με την ισχύ
- 4) Ενεργό υλικό προς ισχύ
- 5) Απόδοση προς ισχύ

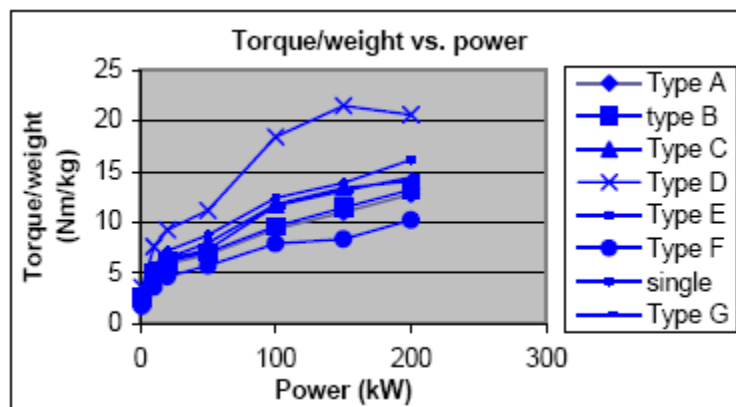
Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω:

- 1) Ροπή προς όγκο και ροπή προς βάρος σε σχέση με την ισχύ:



Σχήμα 2.11: Ροπή προς όγκο σε σχέση με την ισχύ.

Πρόκειται ουσιαστικά για την πυκνότητα ροπής η οποία θέλουμε να είναι υψηλή. Καλύτερη απόδοση με βάση το κριτήριο αυτό έχει η μηχανή αξονικής ροής διπλού δρομέα-μονού στάτη με αύλακες στον πυρήνα (D). Όλες οι υπόλοιπες φαίνονται να έχουν αρκετά όμοια συμπεριφορά μεταξύ τους που δεν προσεγγίζει όμως τη συμπεριφορά της πρώτης.



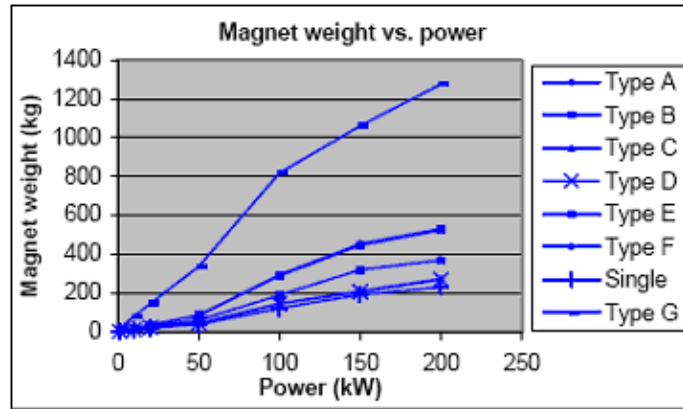
Σχήμα 2.12: Ροπή προς βάρος σε σχέση με την ισχύ.

Όσον αφορά τη ροπή προς βάρος σε σχέση με την ισχύ, τα αποτελέσματα είναι τα ίδια όπως και πριν.

2) Βάρος μαγνητών σε σχέση με την ισχύ

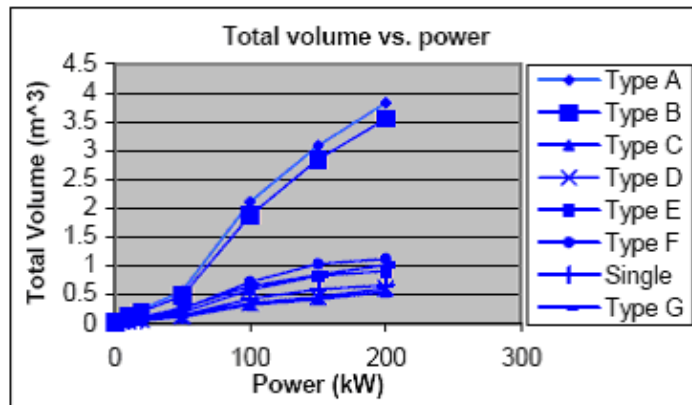
Το κριτήριο αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς έχει να κάνει όχι μόνο με το βάρος της μηχανής αλλά και με το συνολικό της κόστος αφού οι μαγνήτες είναι το πιο ακριβό συστατικό της στοιχείο.

Υψηλότερο βάρος έχουν οι γεννήτριες ακτινικής ροής, ενώ βλέπουμε ότι και πάλι η μηχανή αξονικής ροής διπλού δρομέα-μονού στάτη με αύλακες στον πυρήνα (D) έχει αρκετά χαμηλό βάρος σε σχέση με την ισχύ και είναι προτιμότερη.



Σχήμα 2.13: Βάρος μαγνητών σε σχέση με την ισχύ.

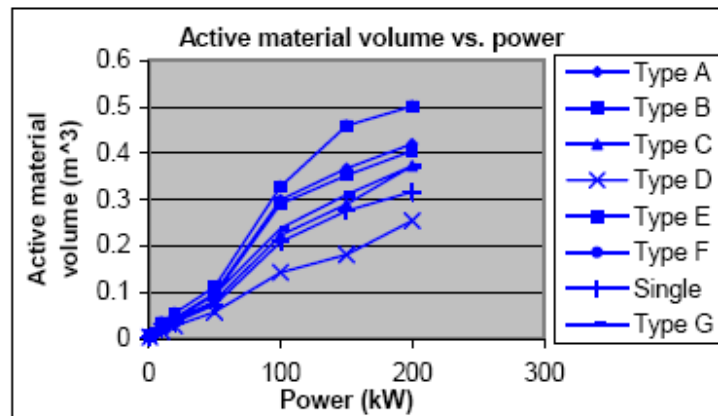
3) Συνολικός όγκος σε σχέση με την ισχύ



Σχήμα 2.14: Συνολικός όγκος σε σχέση με την ισχύ.

Και με βάση το κριτήριο αυτό η μηχανή (D) είναι άκρως ανταγωνιστική καθώς όπως παρατηρούμε έχει μια από τις χαμηλότερες καμπύλες όγκου-ισχύος.

4) Ενεργό υλικό προς ισχύ

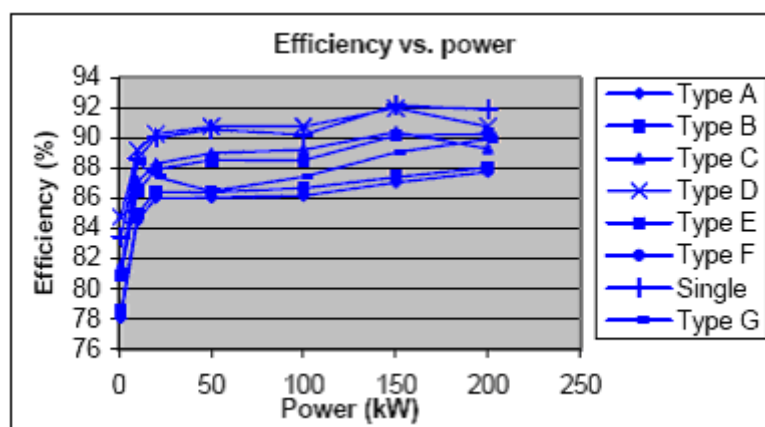


Σχήμα 2.15: Ενεργό υλικό σε σχέση με την ισχύ.

Και σε αυτήν την περίπτωση τα πράγματα είναι ξεκάθαρα. Η μηχανή αξονικής ροής διπλού δρομέα μονού στάτη με αύλακες στον πυρήνα χρησιμοποιεί τα λιγότερα δυνατά υλικά ακολουθούμενη από τη μηχανή Torus.

5) Απόδοση προς ισχύ

Αρκετά υψηλή απόδοση βλέπουμε ότι έχει και πάλι η μηχανή διπλού δρομέα-μονού στάτη μαζί με την Torus. Γενικά οι αποδόσεις κυμαίνονται από 86-92%, και αφού θέλουμε απόδοση της τάξης του 90% η μηχανή διπλού δρομέα-μονού στάτη είναι μια πολύ καλή επιλογή.



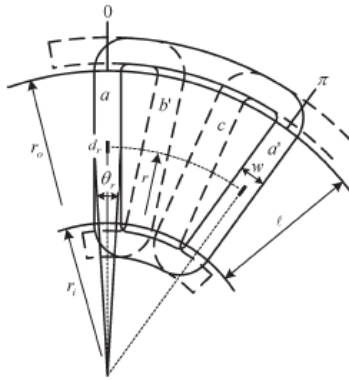
Σχήμα 2.16: Η απόδοση σε σχέση με την ισχύ.

2.3. Τα τυλίγματα

Η επιλεγμένη τοπολογία είναι αυτή του διπλού δρομέα-μονού στάτη χωρίς πυρήνα. Σε αυτήν την περίπτωση ο πυρήνας κατασκευάζεται ουσιαστικά από κάποιο διαμαγνητικό υλικό (συνήθως ρητίνη) και εκεί τοποθετείται το τύλιγμα. Κάθε πλευρά πηνίου αντιστοιχίζεται στον αντίστοιχο αύλακα ενός πυρήνα σιδήρου.

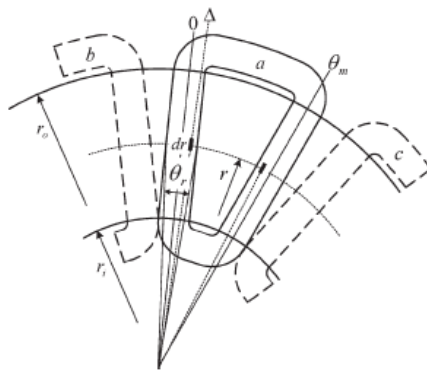
Τα τυλίγματα τα οποία μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε είναι τέσσερα:

1. Επικαλυπτόμενο τύλιγμα. Είναι διανεμημένο σε ισομετρικούς αύλακες όπως φαίνεται και στο σχήμα. Το ένα πηνίο τοποθετείται πάνω στο άλλο και γι' αυτό το τύλιγμα ονομάζεται επικαλυπτόμενο.



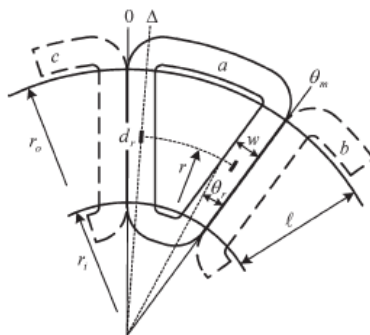
Σχήμα 2.17: Επικαλυπτόμενο τύλιγμα.

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



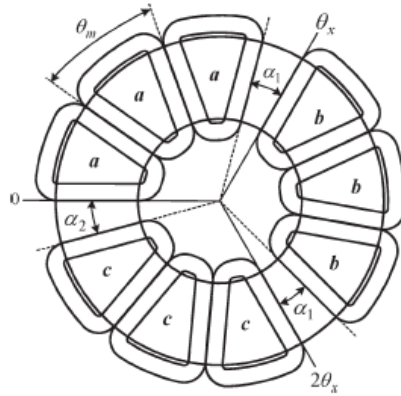
Σχήμα 2.18: Συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα μονής στρώσης.

3. Συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα διπλής στρώσης. Όπως και πριν τα πηνία είναι μη επικαλυπτόμενα. Σε κάθε όμως ιδεατό αύλακα συναντάμε δύο πλευρές διαφορετικών πηνίων. Οι δύο πλευρές εφάπτονται μεταξύ τους σε όλο τους το μήκος.



Σχήμα 2.19: 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 2.20: Συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα χωρισμένο σε ομάδες φάσεων.

Τα πλεονεκτήματα των συγκεντρωμένων τυλιγμάτων έναντι των επικαλυπτόμενων είναι τα εξής [17]:

- Μικρότερα άκρα τυλίγματος με αποτέλεσμα:
 1. Μικρότερη εξωτερική διάμετρο
 2. Μικρότερες απώλειες χαλκού
- Χαμηλότερο κόστος (λιγότερα πηνία)
- Ευκολότερη κατασκευή

Προκειμένου να κατασκευάσουμε ένα επικαλυπτόμενο τύλιγμα πρέπει να λυγίσουμε τα πηνία στην εξωτερική και εσωτερική διάμετρο του στάτη. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο έχουμε μεγαλύτερα άκρα τυλίγματος. Τέτοια ανάγκη δεν υπάρχει στα συγκεντρωμένα τυλίγματα.

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 του βέλτιστου αριθμητικού συνδυασμού πόλων και πηνίων. Σύμφωνα δε με το [18], όσο αυξάνεται ο αριθμός των πόλων τόσο αυξάνεται και η απόδοση του συγκεντρωμένου τυλίγματος έναντι του επικαλυπτόμενου. Είναι προφανές δε ότι επιλέγοντας επικαλυπτόμενο τύλιγμα μπορούμε να έχουμε περισσότερο χαλκό στη μηχανή, δηλαδή περισσότερα πηνία άρα και τη δυνατότητα παραγωγής μεγαλύτερης ισχύος για τον ίδιο όγκο γεννήτριας.

Στο [18] συγκρίνονται τα τρία είδη συγκεντρωμένων 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. Πρέπει όμως εδώ να

σημειώσουμε ότι το τύλιγμα αυτό έχει μεγαλύτερα άκρα σε σχέση με το συγκεντρωμένο μονής στρώσης.

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω επιλέγουμε να μελετήσουμε το συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα διπλής στρώσης.

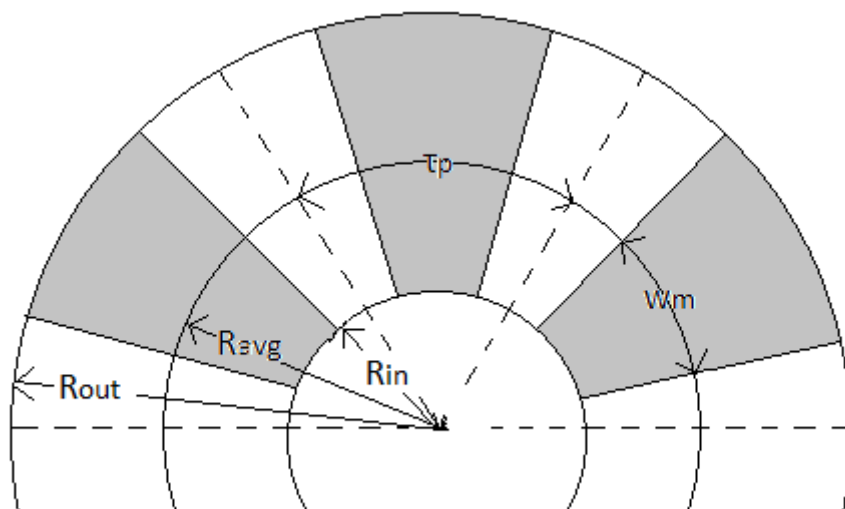
2.4. Θεωρητική Ανάλυση

2.4.1. Μαγνητική Ροή-HEΔ

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

$$\tau_p(r) = \frac{2\pi r}{p} \quad (2.1)$$

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

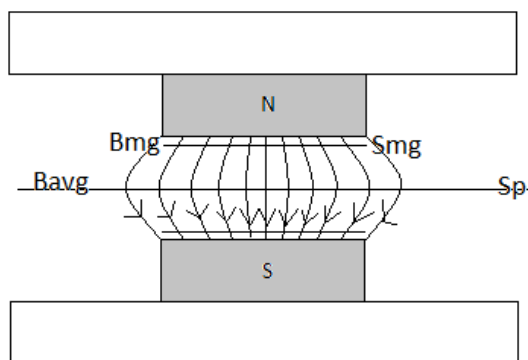


Σχήμα 2.21: Τα βασικά γεωμετρικά μεγέθη μιας γεννήτριας αξονικής ροής.

Στη συνέχεια ορίζουμε έναν πολύ σημαντικό για τη σχεδίασή μας συντελεστή, τον λόγο πλάτους μαγνήτη προς πολικό βήμα:

$$\alpha_i(r) = \frac{w_m(r)}{\tau_p(r)}$$

ο οποίος εξαρτάται και αυτός από την ακτίνα αναφοράς r . Ας υποθέσουμε τώρα την παρακάτω διάταξη μηχανής αξονικής ροής:



Σχήμα 2.22: Πλάγια όψη ενός πολικού βήματος μιας γεννήτριας αξονικής ροής.

Μπορούμε να πούμε παρατηρώντας το σχήμα ότι όλες οι δυναμικές γραμμές που διέρχονται από ένα εμβαδόν S_{mg} πολύ κοντά στην επιφάνεια του μαγνήτη θα διέρχονται (με διαφορετική πυκνότητα) και από ένα άλλο εμβαδόν S_p (το εμβαδόν του πολικού βήματος) στη μέση της γεννήτριας. Μπορούμε λοιπόν να γράψουμε:

$$\Phi_{avg} = \Phi_{mg} \leftrightarrow B_{mg} \cdot S_{mg} = B_{avg} \cdot S_{avg} \leftrightarrow \frac{B_{avg}}{B_{mg}} = \frac{S_{mg}}{S_p} \leftrightarrow \frac{w_m}{\tau_p} = \frac{B_{avg}}{B_{mg}} \leftrightarrow$$

$$\alpha_i = \frac{B_{avg}}{B_{mg}}$$

όπου:

- B_{avg} η μέση πυκνότητα μαγνητικής ροής στη μέση της γεννήτριας
- B_{mg} η πυκνότητα μαγνητικής ροής λίγο πάνω από την επιφάνεια του μαγνήτη

Να σημειώσουμε στο σημείο αυτό ότι η μέση τιμή του B στην επιφάνεια του μαγνήτη είναι πρακτικά ίση με την τιμή του B σε όποιο σημείο της τελευταίας θέλουμε, εξαιρουμένων των άκρων όπου το πεδίο συμπεριφέρεται διαφορετικά.

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

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

όπου $dS = \frac{2\pi r}{p} dr$

άρα γενικά θα ισχύει :

$$\Phi_f = \frac{B \cdot \pi}{p} (r_{out}^2 - r_{in}^2) \quad (2.2)$$

για κάποια περιοχή όπου η πυκνότητα μαγνητικής ροής είναι B .

Προκειμένου να υπολογίσουμε την ΗΕΔ θα θεωρήσουμε την πρώτη αρμονική του B καθώς δε γνωρίζουμε ότι η τελευταία είναι ημιτονοειδής. Μπορούμε λοιπόν να γράψουμε για το B που βλέπουν τα πηνία:

$$B = B_p \cdot \sin(\omega_e t)$$

Πλέον η πρώτη αρμονική του B στο διάκενο, B_p , θα χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς μας. Έτσι:

$$\Phi = B \cdot S = B_p \cdot S_p \cdot \sin(\omega_e t)$$

και για την ΗΕΔ:

$$E_f = k_w N_\varphi \frac{d\Phi}{dt}$$

όπου:

- k_w ο συντελεστής τυλίγματος
- N_ϕ ο αριθμός των ελιγμάτων ανά φάση. $N_\phi = qN_c$ όπου N_c τα ελίγματα ανά πηνίο και q τα πηνία ανά φάση.
- ω_e η ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα

Αντικαθιστώντας από τη σχέση για τη ροή το εμβαδόν S_p και ορίζοντας:

$l_a = r_{out} - r_{in}$ το ενεργό μήκος της γεννήτριας και

$r_{avg} = \frac{r_{out} + r_{in}}{2}$ η μέση ακτίνα της γεννήτριας και συχνότερη ακτίνα αναφοράς

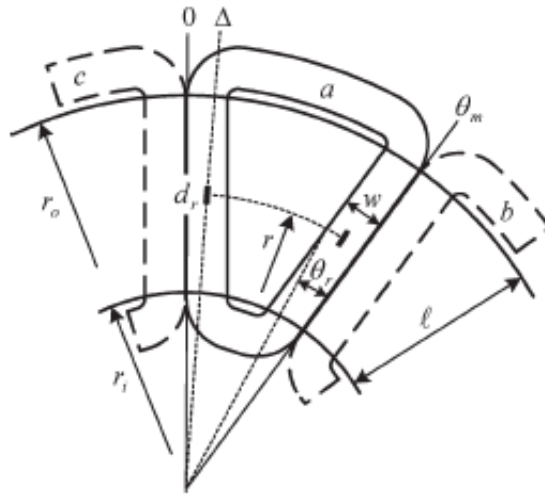
παίρνουμε τελικά μια έκφραση για την ΗΕΔ [18]:

$$E_f = \frac{N_c 2\sqrt{2} q \omega_e B_p k_w l_a r_{avg}}{p} \quad (2.3)$$

2.4.2. Ανάλυση του τυλίγματος

2.4.2.1. Ανάπτυξη ροπής

Όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή επιλέξαμε το συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσης για τη γεννήτριά μας. Το τύλιγμα αυτό αναλύεται διεξοδικά μαζί με άλλα στο [18] και εδώ θα παρουσιάσουμε μερικά στοιχεία της ανάλυσης που θα μας βοηθήσουν στην εξαγωγή μιας σχέσης για τη ροπή:



Σχήμα 2.23: Η γενική μορφή του συγκεντρωμένου τυλίγματος διπλής στρώσης.

$$T_d = k_{sc} k_{ec} k_r C_1 \quad (2.4)$$

Παρακάτω εξηγούνται όλοι οι συντελεστές της παραπάνω παράστασης:

$k_{sc} = k_{wc} \sqrt{\theta_{re}^q / p}$ ένας συντελεστής τυλίγματος για τον οποίο ισχύουν:

- $k_{wc} = k_p k_d$

- k_p συντελεστής βήματος
- k_D συντελεστής πλάτους (ίσος με 1 για το τύλιγμά μας)
- θ_{re} ηλεκτρική γωνία πάχους πλευράς πηνίου ίση με: $\theta_{re} = \left(\frac{r_{in}-l_a}{r_{avg}}\right) \frac{\pi}{3}$

$k_{ec} = (2 + \delta_c)^{-\frac{1}{2}}$ συντελεστής άκρων τυλίγματος για τον οποίο ισχύουν:

- $\delta_c = \frac{l_{ec}}{l_a}$
- $l_{ec} = 2(r_{out} + r_{in}) \frac{\theta_m - 0.6\theta_{re}}{p}$ (2.5)

τα άκρα τυλίγματος

- $\theta_m = \frac{\pi p}{Q}$ η ηλεκτρική γωνία βήματος πηνίου (Q ο συνολικός αριθμός πηνίων της γεννήτριας)
- $\delta_c = \frac{2}{p} \cdot \frac{1+k_d}{1-k_d} \cdot (\theta_m - 0.6\theta_{re})$

Στις παραπάνω σχέσεις εμφανίζεται ένας νέος συντελεστής που θα μας απασχολήσει στη συνέχεια και είναι πολύ σημαντικός για τη σχεδίαση, ο λόγος εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα:

$$k_d = \frac{r_{in}}{r_{out}} \quad (2.6)$$

Σύμφωνα με το [5] η βέλτιστη τιμή του συντελεστή αυτού προκειμένου να έχουμε βέλτιστη ροπή είναι $k_d = \frac{1}{\sqrt{3}}$ αλλά δεν πρέπει με κανέναν τρόπο να παρασυρθούμε από την τιμή αυτή που συχνά συναντάται στη βιβλιογραφία και να τη χρησιμοποιήσουμε και εμείς. Εξάλλου, εξετάζοντας τις μηχανές του Hugh Piggott [32] που είναι κατασκευασμένες με την ίδια λογική θα βρούμε ότι ο συντελεστής αυτός ξεπερνά πολύ τη βέλτιστη τιμή του.

Συνεχίζοντας την ανάλυσή μας για εξαγωγή μιας σχέσης για τη ροπή συναντάμε το συντελεστή ακτίνας:

$$k_r = \sqrt{(1 - k_d)(1 + k_d)^3}$$

και το συντελεστή μηχανής:

$$C_1 = r_{out}^2 B_p \sqrt{\frac{1.5 P_{cu} k_f t_w}{\rho_t}}$$

όπου:

- k_f ο συντελεστής πλήρωσης του πηνίου. Ή αλλιώς το ποσοστό της ιδεατής στη γεννήτριά μας αύλακας που μπορεί να καλυφθεί με χαλκό. Οι τιμές που μπορεί να πάρει ο συντελεστής αυτός κυμαίνονται από 0.4-0.6 και θα συζητηθούν στο κεφάλαιο της διαστασιολόγησης.
- t_w το αξονικό πάχος του πηνίου
- ρ_t η ειδική αντίσταση του χαλκού σε θερμοκρασία t

Συνδυάζοντας όλα τα παραπάνω παίρνουμε την τελική σχέση για τη ροπή:

$$T_d = k_{sc} k_{ec} k_r \sqrt{\frac{1.5 P_{cu} k_f t_w}{\rho_t}} r_{out}^2 B_p \quad (2.7)$$

Στην ίδια εργασία αποδεικνύεται μετά από διαδικασία βελτιστοποίησης ότι για να έχω μέγιστη ροπή η μέγιστη τιμή της γωνίας θ_{re} είναι:

$$\theta_{reopt} = \theta_{remax} = \frac{r_{in}}{2r_{avg}} \theta_m = \frac{k_d}{1 + k_d} \theta_m$$

τιμή την οποία θα χρησιμοποιήσουμε από εδώ και πέρα. Σε κάθε περίπτωση πάντως η τιμή αυτή μπορεί να αλλάξει ανάλογα με τα κριτήρια με βάση τα οποία σχεδιάζουμε τη γεννήτριά μας.

2.4.2.2. Πυκνότητα ρεύματος

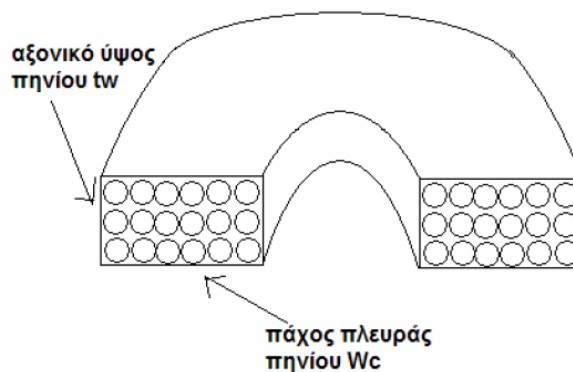
Ένα στοιχείο το οποίο είναι πολύ σημαντικό όσον αφορά το τύλιγμα και επηρεάζει όλη τη δομή και το μέγεθος της γεννήτριας είναι η μέγιστη πυκνότητα ρεύματος που μπορεί να υποστεί το τύλιγμα. Συνηθισμένες τιμές της είναι $J_{max}=4-5A/mm^2$ για μηχανές μονίμων μαγνητών. Στην περίπτωση όμως μιας μηχανής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

Πιο συγκεκριμένα μπορούμε να γράψουμε:

$$J_{max} = \frac{I_a}{sc}$$

όπου:

- I_a το ρεύμα της γεννήτριας
- sc το εμβαδόν διατομής μιας σπείρας ενός πηνίου



Σχήμα 2.24: Το αξονικό ύψος και το πάχος πλευράς ενός πηνίου.

Για τη διατομή του πηνίου όπως τη βλέπουμε στο σχήμα 2.24 μπορούμε να γράψουμε:

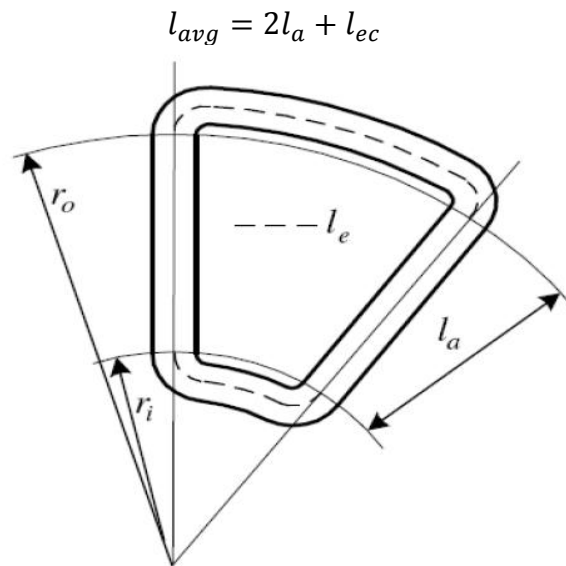
$$J_{max} = \frac{N_c I_a}{t_w w_c k_f} \quad (2.8)$$

όπου w_c το πάχος πηνίου.

2.4.2.3. Αντίσταση και αυτεπαγωγή τυλίγματος

Σε αυτό το σημείο 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. Ας μην ξεχνάμε δε ότι η αγορά του χαλκού θα γίνει με βάση το βάρος του.

Το μέσο μήκος ελίσματος l_{avg} μπορούμε να πούμε ότι είναι ίσο με το διπλάσιο ενεργό μήκος (κάθε πλευρά του πηνίου έχει μήκος όσο το ενεργό μήκος l_a) συν τα άκρα τυλίγματος l_{ec} όπως αυτά υπολογίστηκαν από τη σχέση (2.5):



Σχήμα 2.25: Κάτοψη του πηνίου όπου φαίνονται και τα άκρα τυλίγματος.

Γνωρίζοντας το συνολικό μήκος ενός ελίσματος μπορούμε πλέον να βρούμε την αντίσταση ενός πηνίου με N_c ελίσματα:

$$R_c = N_c \rho_t \frac{l_{avg}}{sc} = N_c \rho_t \frac{(2l_a + l_{ec})}{sc} \quad (2.9)$$

όπου ρ_t η ειδική αντίσταση του χαλκού και t_c η θερμοκρασία στην οποία λειτουργεί η γεννήτρια:

$$\rho_t = \rho_{20}(1 + 0.0039(t_c - 20)) \quad \rho_{20} = 1.68 \cdot 10^{-8}$$

Η αυτεπαγωγή μιας φάσης του τυλίγματος L_s έχει υπολογιστεί στο [17] και είναι:

$$L_s = \frac{q \cdot l_{avg}^2 \cdot N_c^2}{t_w} \cdot 10^{-7} \cdot K_n \quad (2.10)$$

όπου K_n η σταθερά του Nagaoka :

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

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

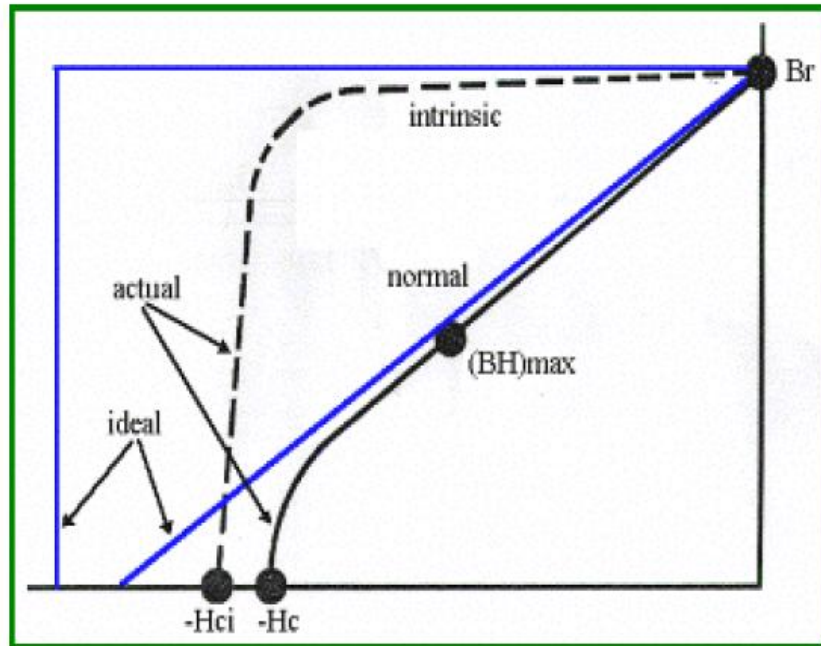
Τέλος, η μάζα χαλκού που θα χρησιμοποιηθεί υπολογίζεται απλά από τον τύπο της πυκνότητας:

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

όπου ρ_{cu} η πυκνότητα του χαλκού.

2.4.3. Το μαγνητικό κύκλωμα

Πολύ χρήσιμη στην ανάλυσή μας είναι και η ανάλυση του μαγνητικού κυκλώματος της γεννήτριας. Πριν όμως ξεκινήσουμε την ανάλυσή μας, ας δούμε εν συντομία από τι χαρακτηρίζεται ένας μόνιμος μαγνήτης.



Σχήμα 2.26: Γενική μορφή της καμπύλης απομαγνήτισης.

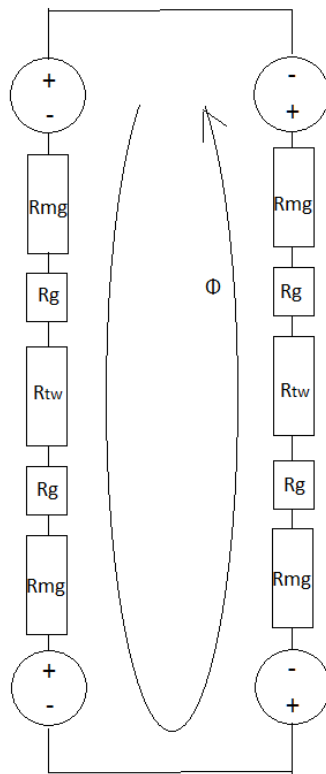
Ένας μόνιμος μαγνήτης χαρακτηρίζεται σχεδόν πλήρως από την καμπύλη απομαγνήτισής του, που φαίνεται παραπάνω. Στην καμπύλη αυτή μας ενδιαφέρει το μέγεθος της παραμένουσας μαγνήτισης B_r (Tesla) περισσότερο καθώς και η συνεχούσα δύναμη H_c (kA/m). Γενικά, ο μαγνήτης πρέπει να λειτουργεί στο σημείο εκείνο 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:

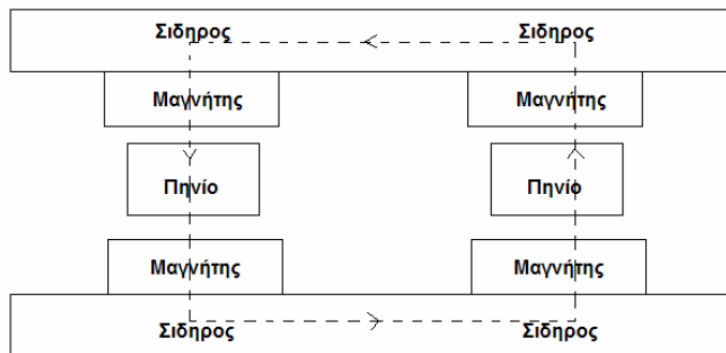
$$B_{mg} = \frac{B_r}{2} \quad (2.11)$$

Φυσικά κάθε μόνιμος μαγνήτης έχει δικές του χαρακτηριστικές στις οποίες ο σχεδιαστής θα πρέπει να προσαρμοστεί.

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



Σχήμα 2.27: Το μαγνητικό κύκλωμα της γεννήτριας.



Σχήμα 2.28: Η πλάγια όψη της γεννήτριας που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή του κυκλώματος.

Η ανάλυση του μαγνητικού κυκλώματος έχει γίνει στο [5] από όπου προκύπτει η σχέση:

$$B_{mg} = \frac{B_r}{1 + \mu_{rrec} \frac{(g + 0.5t_w)}{h_m} k_{sat}} \quad (2.12)$$

όπου:

- μ_{rrec} η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του μαγνήτη $\mu_{rrec} = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_r}{H_c}$ και μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού ίση με $4\pi 10^{-7}$.
- $k_{sat}=1$ αφού δεν υπάρχει κορεσμός (δεν υπάρχει πυρήνας)
- 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. Στην περίπτωση μας όμως δεν υπάρχει πυρήνας και θα πρέπει να θεωρήσουμε ότι το πεδίο εξασθενεί στο μέσο τουλάχιστον της γεννήτριας. Έτσι, μια πιο καλή προσέγγιση θα μπορούσε να γίνει θεωρώντας ότι στα διάκενα της γεννήτριας έχουμε πεδίο B_{mg} ενώ στην περιοχή των πηνίων (ύψος t_w) έχουμε B_{max} , τη μέγιστη δηλαδή τιμή της κυματομορφής του B καθώς αναφερόμαστε στο σημείο που βρίσκεται στη μέση της γεννήτριας και στη μέση των μαγνητών όπου μεγιστοποιείται το B .

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

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

τη 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 το την πυκνότητα μαγνητικής ροής σε κάθε σημείο μπορούμε να γράψουμε και την παρακάτω σχέση η οποία φυσικά απαιτεί επαλήθευση μέσω προσομοίωσης στον υπολογιστή πριν χρησιμοποιηθεί:

$$t_w = \frac{2}{B_{max}} \left\{ \frac{h_m}{\mu_{rrec}} (B_r - B_{mg}) - B_{mg} g \right\} \quad (2.13)$$

2.4.4. 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.

2.4.4.1. Μελέτη απωλειών

Απώλειες στο στάτη:

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

$$P_{cu} = 3I_{ac}^2 R_{phase} \quad (2.14)$$

Στην παρούσα εργασία το επιδερμικό φαινόμενο έχει αγνοηθεί . Στο [5] υπολογίζονται οι απώλειες χαλκού συμπεριλαμβανομένου και του επιδερμικού φαινομένου.

-Απώλειες δινορρευμάτων: Συνήθως οι απώλειες δινορρευμάτων εμφανίζονται στον πυρήνα της γεννήτριας. Η ανυπαρξία πυρήνα εξαλείφει τις απώλειες αυτές. Απώλειες δινορρευμάτων εξακολουθούν όμως να υπάρχουν στο τύλιγμα, σε τέτοιο βαθμό που κρίνεται σκόπιμο να υπολογιστούν [17]:

$$P_{eddy} = \frac{\pi l_a s c^4 B_p^2 \omega_e^2 Q N_c N_p}{32 \rho_{cu}} \quad (2.15)$$

όπου:

- $N_p=1$ ο αριθμός των παράλληλων κλώνων
- ρ_{cu} η ειδική αντίσταση του χαλκού

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 αποτελούνται από δύο συνιστώσες: Τις απώλειες τριβών στα ρουλεμάν και τις απώλειες ανεμισμού, Οι τελευταίες είναι πολύ μικρές και αγνοούνται. Για τις απώλειες τριβών είναι γνωστό [5]:

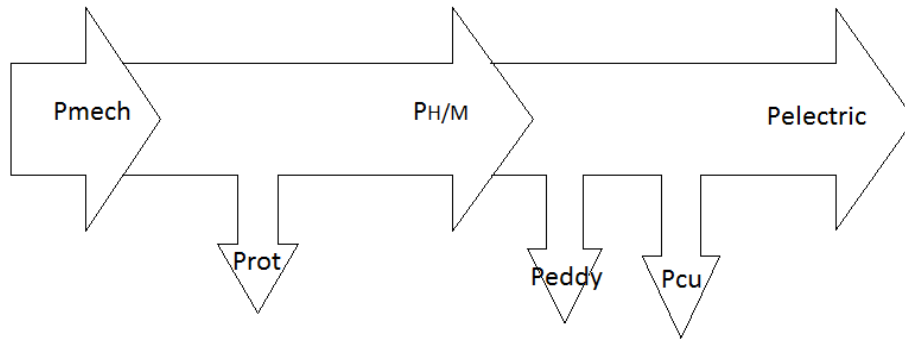
$$P_{rot} = 0.06 k_{fb} (m_r + m_{sh}) n \quad (2.16)$$

όπου:

- k_{fb} συντελεστής τριβών με τιμές 1-3 m^2/s^2
- m_r η μάζα του δρομέα
- m_{sh} η μάζα του άξονα
- n οι στροφές της γεννήτριας

2.4.4.2. Ισοζύγιο Ενέργειας-Ισοδύναμο Κύκλωμα

Με βάση την παραπάνω ανάλυση σχηματίζουμε το ισοζύγιο ενέργειας:

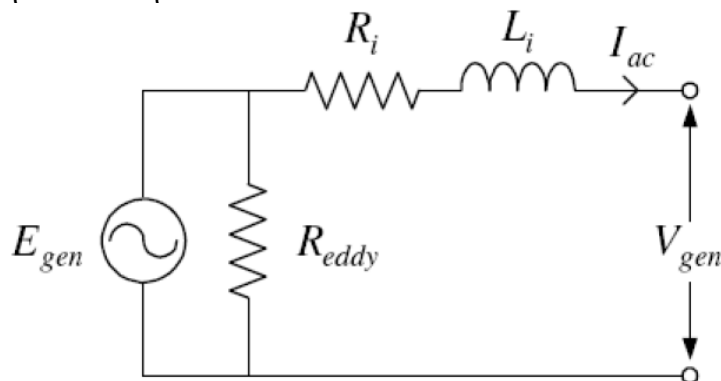


Σχήμα 2.29: Το ισοζύγιο ενέργειας της γεννήτριας αξονικής ροής μονίμων μαγνητών χωρίς τυρήνα.

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 $P_{H/M} = P_{mech} - P_{rot}$. Στη συνέχεια αφαιρώντας τις απώλειες του τυλίγματος (δινორρευμάτων και ωμικές) προκύπτει η ηλεκτρική ισχύς (ισχύς εξόδου):

$$P_{\eta\lambda} = P_{H/M} - P_{rot} = P_{mech} - P_{rot} - P_{eddy} - P_{cu}$$

Τα παραπάνω κωδικοποιούνται και στο παρακάτω ισοδύναμο κύκλωμα, όπου η R_{eddy} έχει τοποθετηθεί για να παρουσιάσει τις απώλειες δινორρευμάτων και δεν είναι μια πραγματική αντίσταση.



Σχήμα 2.30: Το ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας.

Η απόδοση στη συνέχεια βρίσκεται απλά γύρω στο 90% συνήθως:

$$\eta = \frac{P_{\eta\lambda}}{P_{\eta\lambda} + P_{cu} + P_{eddy} + P_{rot}} \quad (2.17)$$

3. Διαστασιολόγηση της γεννήτριας αξονικής ροής.

Στο σημείο αυτό θα περιγράψουμε την πλήρη διαστασιολόγηση μιας γεννήτριας αξονικής ροής με μόνιμους μαγνήτες 3kW. Η διαδικασία θα βασιστεί στα θεωρητικά στοιχεία του προηγούμενου κεφαλαίου και θα γίνει εκτενέστερη ανάλυση των διάφορων συντελεστών που εμπλέκονται στη διαδικασία. Η σύνδεση της γεννήτριας θα είναι AC. Με λίγα λόγια η γεννήτρια θα συνδέεται στο δίκτυο. Η έξοδος της γεννήτριας (AC) θα ανορθώνεται με έναν μη ελεγχόμενο τριφασικό ανορθωτή διόδων και έπειτα θα εισέρχεται σε έναν αντιστροφέα ο οποίος θα εκτελεί εκτός των άλλων λειτουργία MPPT. Μέσω του ανορθωτή και του αντιστροφέα η γεννήτρια θα συνδέεται στο δίκτυο.

3.1. Ονομαστικές στροφές-Ονομαστική Τάση

Ξεκινώντας τη διαστασιολόγηση μιας ανεμογεννήτριας το πρώτο που πρέπει κανείς να αποφασίσει είναι η ηλεκτρική ισχύς που θέλει να παράγει. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα κατασκευαστεί γεννήτρια 3kW. Θεωρώντας απόδοση 90% η μηχανική ισχύς στην είσοδο της γεννήτριας θα είναι:

$$P_{μηχ} = \frac{P_{ηλ}}{\eta} = \frac{3000}{0.9} = 3330 \text{ W} \quad (3.1)$$

Η ισχύς αυτή αντιστοιχεί στην ισχύ που αποσπά η φτερωτή από τον άνεμο που δίνεται από τον τύπο:

$$P_{air} = \frac{1}{2} \rho C_p \pi R_t^2 v_w^3 \quad (3.2)$$

Εξαρτάται δηλαδή έντονα από τον άνεμο για τον οποίο σχεδιάζεται η γεννήτρια. Γνωρίζοντας τον άνεμο αυτό εύκολα βρίσκεται η ακτίνα της φτερωτής:

$$R_t = \sqrt{\frac{2P_{air}}{\rho C_p v_w^3}}$$

Η επιλογή ανέμου θα καθορίσει την ακτίνα της φτερωτής επηρεάζοντας με αυτόν τον τρόπο έντονα το κόστος αλλά και την πολυπλοκότητα της κατασκευής. Καθώς όσο μεγαλώνει η φτερωτή τόσο μεγαλώνει το κόστος της αλλά και τόσο πιο δύσκολο είναι να κατασκευαστεί. Μια βιαστική επιλογή θα έλεγε να σχεδιαστεί η γεννήτρια στο μέσο άνεμο που επικρατεί στην περιοχή στην οποία πρόκειται να εγκατασταθεί. Είναι όμως βέβαιο ότι πολύ συχνά οι άνεμοι θα είναι αρκετά υψηλότεροι και η γεννήτρια δε θα μπορεί να τους εκμεταλλευθεί (θα κόβει το αεροδυναμικό φρένο) μειώνοντας έτσι την ενεργειακή απόδοση έντονα. Σε αυτό το σημείο αναφερόμαστε όμως στη φτερωτή, η οποία για μέσο άνεμο π.χ. 5m/s θα είναι ίση με 6,4 m. Είναι

προφανές ότι το μέγεθος αυτό είναι τεράστιο για μια τόσο μικρή γεννήτρια, το κόστος θα είναι τεράστιο και η κατασκευή από ξύλο αδύνατη. Επιλέγουμε λοιπόν έναν υψηλότερο άνεμο, αλλά όχι παράλογο ψηλό, γύρω στα 10 m/s (θα μπορούσαμε ίσως και στα 9m/s), που δίνει μια φτερωτή λογικού μήκους:

$$R_{turb} = \sqrt{\frac{2 \cdot 3330}{1.2 \cdot 0.35 \cdot \pi \cdot 10^3}} = 2.25 \text{ m}$$

Έτσι η κατασκευή γίνεται πιο απλή και φθηνή και η γεννήτρια μπορεί χωρίς πρόβλημα να ανταποκριθεί σε ανέμους από 0-10 m/s. Έτσι ονομαστικός άνεμος στη σχεδίαση θεωρούνται τα 10 m/s όπου η γεννήτρια θα αποδίδει 3 kW ηλεκτρικής ισχύος. Η γεννήτρια θα μπαίνει στο σύστημα στα 3 m/s και θα διατηρεί λόγω του MPPT πάντα το λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου ίσο με $\lambda_{opt}=7$. Ισχύει για τις στροφές:

$$\lambda_{opt} = \frac{\omega R_{turb}}{v_w} = \frac{2\pi n R_{turb}}{60 v_w} \rightarrow n = \frac{60 v_w \lambda_{opt}}{2\pi R_{turb}} \quad (3.3)$$

$$\text{Άρα για } v_w = v_{wcutin} = 3 \frac{m}{s} \rightarrow n_{cutin} = \frac{7 \cdot 60 \cdot 3}{2 \cdot \pi \cdot 2.25} \rightarrow n_{cutin} = 89 \text{ ΣΑΛ}$$

$$\text{και για } v_w = v_{wnom} = 10 \frac{m}{s} \rightarrow n_{nom} = \frac{7 \cdot 60 \cdot 10}{2 \cdot \pi \cdot 2.25} \rightarrow n_{nom} = 297 \text{ ΣΑΛ}$$

Αφού καθορίστηκε το εύρος λειτουργίας των στροφών, πρέπει να καθοριστεί το εύρος των τάσεων τις οποίες θα αναπτύσσει η γεννήτρια.

Όταν η γεννήτρια είναι ανοιχτοκυκλωμένη (σε κατάσταση cut-in, λίγο πριν μπει στο σύστημα) η ΗΕΔ της E_f είναι ίση με την τερματική της τάση. Δηλαδή $E_{fcutin} = V_{tcutin}$. Η τερματική αυτή τάση θα είναι ίση με την τάση στην οποία αρχίζει να λειτουργεί ο αντιστροφέας (κάτω όριο του εύρους λειτουργίας του). Ο WindyBoy 3300 της SMA έχει π.χ. εύρος λειτουργίας 200-500 V. Η τάση της γεννήτριας, όπως έχει ήδη αναφερθεί, πρώτα ανορθώνεται και μετά φτάνει στον αντιστροφέα:

$$E_{fcutin} = \frac{V_{WBcutin}}{\sqrt{3} \cdot 1.35}$$

Γενικά, για μη ελεγχόμενη τριφασική ανόρθωση ισχύει [19]:

$$V_{dc} = \sqrt{3} \cdot 1.35 \cdot V_{ac} \quad (3.4)$$

όπου V_{ac} η φασική τάση πριν τον ανορθωτή.

Άρα με βάση τα παραπάνω η τάση εισόδου της γεννήτριας θα είναι: $E_{fcutin} = 85,5 \text{ V}$

Για την ονομαστική ΗΕΔ:

$$\frac{E_{fnom}}{E_{fcutin}} = \frac{n_{nom}}{n_{cutin}} \rightarrow E_{fnom} = \frac{n_{nom}}{n_{cutin}} E_{fcutin} \rightarrow E_{fnom} = 286 \text{ V} \quad (3.5)$$

Η παραπάνω τάση όταν ανορθωθεί γίνεται ίση με 670 V, που σημαίνει ότι ο αντιστροφέας που θα επιλεγεί θα πρέπει να έχει εύρος 200-700 V τουλάχιστον για να λειτουργεί σωστά. Σε άλλη περίπτωση ο αντιστροφέας θα εμποδίζει τη γεννήτρια να ανέβει στα ονομαστικά της περιορίζοντας την ισχύ και χαλώντας το MPPT. Περιληπτικά τα παραπάνω φαίνονται στον Πίνακα 3.1:

	Cut-in	Ονομαστικά (nom)
V _w (άνεμος)	3 m/s	10 m/s
n (στροφές)	89 ΣΑΛ	297 ΣΑΛ
E _f (HEΔ)	85.5 V	286 V

Πίνακας 3.1: Ονομαστική λειτουργία και λειτουργία cut-in

Στην περίπτωση εκείνη που το εύρος του αντιστροφέα είναι δεδομένο και δεν μπορεί να αλλάξει (π.χ. εύρος 200-500 V) η διαστασιολόγηση πρέπει να συνεχιστεί ως εξής:

$$E_{f_{cutin}} = \frac{200}{\sqrt{3} \cdot 1,35} = 85,5 \text{ V}$$

$$E_{f_{nom}} = \frac{500}{\sqrt{3} \cdot 1,35} = 213,8 \text{ V}$$

Στα ονομαστικά θέλω άνεμο 10 m/s με $\lambda=7$ όπως και πριν, άρα $n_{nom}=297$ ΣΑΛ, οπότε:

$$\frac{E_{f_{nom}}}{E_{f_{cutin}}} = \frac{n_{nom}}{n_{cutin}} \rightarrow n_{cutin} = \frac{E_{f_{cutin}}}{E_{f_{nom}}} n_{nom} \rightarrow n_{cutin} = 213,8 \text{ V}$$

Το οποίο συνεπάγεται για τον άνεμο:

$$v_{w_{cutin}} = \frac{2\pi n_{cutin} R_{turb}}{60 \lambda_{opt}} = 4 \text{ m/s}$$

Αν επιλέγαμε λοιπόν η γεννήτρια να μπαίνει στα 4 m/s ο αντιστροφέας θα ήταν κατάλληλος για χρήση. Με μειωμένη ενεργειακή απόδοση αφού οι -αρκετά συχνοί σε αστικό περιβάλλον, αλλά χαμηλού ενεργειακού περιεχομένου- άνεμοι 3-4 m/s δε θα ήταν πλέον εκμεταλλεύσιμοι.

3.2. Αριθμός πόλων-πηνίων, συχνότητα λειτουργίας

Σε μια σύγχρονη γεννήτρια ισχύει η σχέση:

$$n_{nom} = \frac{120f}{p} \quad (3.6)$$

όπου p ο αριθμός των πόλων και f η συχνότητα λειτουργίας σε Hz. Για $f_{nom}=50$ Hz είναι:

$$p = \frac{120f_{nom}}{n_{nom}} = 20$$

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 φυσικά 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 [18] βρέθηκε ότι ο αριθμός των πόλων και των πηνίων πρέπει, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η ροπή, να τηρεί την εξής σχέση:

$$\frac{2Q}{3p} = 0.5 \quad (3.7)$$

Με λίγα λόγια πρέπει ο αριθμός των πόλων να διαιρείται με το 4 και ο αριθμός των πηνίων με το 3. Προκύπτουν έτσι οι εξής συνδυασμοί πόλων-πηνίων:

$$8 - 6, \quad 12 - 9, \quad 16 - 12, \quad 20 - 15, \quad 24 - 18, \quad 28 - 21$$

Για $p=20$ πόλους (40 μαγνήτες) τα πηνία θα είναι $Q=15$ άρα $q=5$ πηνία/φάση.

Η συχνότητα που έχει επιλεγεί δεν είναι φυσικά δεσμευτική και μπορεί να λάβει τιμές από 30-60 Hz. Π.χ. για ονομαστική συχνότητα 40 Hz θα είναι $p=16$ και $Q=12$. Η ονομαστική συχνότητα λειτουργίας είναι και αυτή μία σημαντική παράμετρος για τη διαστασιολόγηση της γεννήτριας που πρέπει να επιλεγεί πριν ξεκινήσουμε. Η επιλογή της επιδρά τόσο στο κόστος, όσο και στην ποιότητα της γεννήτριας και οδηγεί σε διαφορετικές παραμέτρους κατασκευής.

Μικρή ονομαστική συχνότητα σημαίνει λιγότερους πόλους και άρα λιγότερους μαγνήτες. Οι μαγνήτες είναι σημαντικοί ρυθμιστές του κόστους (το πιο ακριβό υλικό) και άρα μικρότερος αριθμός μαγνητών μπορεί να σημαίνει μικρότερο κόστος. Από την άλλη μεριά, μια υψηλή ονομαστική συχνότητα μπορεί μεν να οδηγεί σε περισσότερους μαγνήτες και μεγαλύτερο κόστος, αλλά ταυτόχρονα έχει άλλα πλεονεκτήματα: Σύμφωνα με το [18] γεννήτριες με περισσότερους πόλους έχουν καλύτερη ροπή για το συγκεκριμένο τύλιγμα, ενώ ταυτόχρονα τα πηνία που απαιτούνται, αν και περισσότερα, θα έχουν λιγότερες σπείρες, και άρα θα είναι πιο εύκολο να κατασκευαστούν, καθώς το τύλιγμα όπως θα δούμε αργότερα γίνεται με το χέρι.

3.3. Οι Μαγνήτες

3.3.1. Το είδος του μαγνήτη

Βασικό χαρακτηριστικό της γεννήτριας είναι οι μόνιμοι μαγνήτες που περιλαμβάνει, οι οποίοι της εξασφαλίζουν διέγερση δίχως επιπλέον τυλίγματα αλλά και εύκολη κατασκευή. Υπάρχουν διάφορα είδη μόνιμων μαγνητών. Τέτοιοι είναι οι μαγνήτες Alnico, που αν και είναι πολύ ισχυροί και ανθεκτικοί στη θερμότητα

απομαγνητίζονται εύκολα. Υπάρχουν επίσης και οι ferittes. Οι μαγνήτες αυτοί είναι λιγότερο ισχυροί από τους προηγούμενους, αλλά έχουν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στη θερμοκρασία και απομαγνητίζονται δυσκολότερα. Είναι επιπλέον φθινοί και έχουν μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση εμποδίζοντας την ανάπτυξη δινορρευμάτων.

Οι πιο σύγχρονοι όμως μαγνήτες είναι οι σπάνιες γαίες και κυρίως οι μαγνήτες νεοδυμίου (NdFeB). Οι μαγνήτες αυτοί είναι πολύ ισχυροί αλλά έχουν το βασικό μειονέκτημα ότι δεν αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες (μέχρι 250°C) και διαβρώνονται εύκολα. Η διάβρωση αντιμετωπίζεται με ειδικά βερνίκια. Βασικό πλεονέκτημα των μαγνητών αυτών είναι η δυνατότητα χρήσης τους σε εφαρμογές σε εφαρμογές με υψηλό λόγο κόστους προς απόδοση, που είναι και στόχος αυτής της εργασίας [5]. Για τους παραπάνω λόγους οι μαγνήτες νεοδυμίου επιλέγονται για την κατασκευή.

Οι μαγνήτες αυτοί κατασκευάζονται σε διάφορους βαθμούς. Ο βαθμός του μαγνήτη εκφράζει το πόσο ισχυρός είναι ο τελευταίος με βάση την παραμένουσα μαγνητισή του. Όσο πιο ισχυρός ο μαγνήτης, τόσο πιο ακριβός. Οι βαθμοί ξεκινάνε από N30 και φτάνουν μέχρι τους πολύ ισχυρούς N52. Η επιλογή του βαθμού είναι στην ευχέρεια του σχεδιαστή που πρέπει να έχει υπόψη του τα εξής: Η ανυπαρξία πυρήνα του δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει ό,τι μαγνήτη θέλει χωρίς το πρόβλημα των δινορρευμάτων. Επίσης γενικά, χρησιμοποιώντας έναν ισχυρό μαγνήτη μειώνεται ο όγκος της γεννήτριας και άρα είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται ισχυροί μαγνήτες για εφαρμογές υψηλής πυκνότητας ισχύος. Όχι όμως και για εφαρμογές χαμηλού κόστους όπως αυτές που εξετάζονται σε αυτήν την εργασία. Ένα τελευταίο ζήτημα έχει να κάνει με τις σπείρες των πηνίων. Έχοντας ένα ισχυρότερο μαγνητικό πεδίο στη γεννήτρια, και δεδομένου του εμβαδού των πηνίων, χρειάζονται λιγότερες σπείρες προκειμένου να αναπτυχθεί ίδια τάση. Έτσι προκύπτει μια κατασκευή με λιγότερο χαλκό και πηνία με λιγότερες σπείρες που κατασκευάζονται ευκολότερα. Βασικό μειονέκτημα, εκτός του κόστους είναι ότι ισχυροί μαγνήτες έλκονται με μεγαλύτερες δυνάμεις. Αυτό οδηγεί το σχεδιαστή σε πιο χοντρό σίδηρο στο δρομέα προκειμένου να αντέξουν οι δύο δίσκοι και να μη λυγίσουν. Έτσι η κατασκευή μπορεί να γίνει πιο βαριά.

Ο μαγνήτης λοιπόν που επιλέχθηκε για τη γεννήτρια αυτή είναι ο NdFeB N40 όπου N40 ο βαθμός. Πρόκειται για έναν μαγνήτη που δεν είναι πολύ ισχυρός, αλλά είναι αρκετά φθηνός και δημοφιλής στην αγορά για εφαρμογές χαμηλού κόστους.

3.3.2. 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.

Οι δισκοειδείς μαγνήτες έχουν μελετηθεί στο [20] και έχουν αποδειχθεί οι χειρότεροι. Μεγάλο τους μειονέκτημα είναι ότι χωράει λίγο μαγνητικό υλικό στο δρομέα, ενώ επίσης ταιριάζουν μόνο με κυκλικά πηνία. Χρήση τέτοιων μαγνητών μπορεί να γίνει

για γεννήτριες μικρής ισχύος αλλά όσο μεγαλώνει η ισχύς και μειώνονται οι στροφές, απαιτείται ολοένα και μεγαλύτερη διάμετρος για να χωρέσει περισσότερο μαγνητικό υλικό, καθιστώντας τους δισκοειδείς μαγνήτες τη λάθος επιλογή. Μια ακόμα γεννήτρια με δισκοειδείς μαγνήτες έχει μελετηθεί στο [21].

Συγκρίνοντας τους τραπεζοειδείς με τους ορθογώνιους μαγνήτες τα αποτελέσματα είναι σχετικά κοντινά. Το σχήμα των μαγνητών δεν επηρεάζει τόσο πολύ την κυματομορφή της τάσης στο επίπεδο που μελετάμε εμείς. Μπορούμε όμως να πούμε γενικά τα εξής:

Όσον αφορά τους ορθογώνιους μαγνήτες, είναι πιο δημοφιλείς και μπορεί κανείς πιο εύκολα να τους βρει στο εμπόριο, σε μεγάλη ποικιλία διαστάσεων και σε 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. Να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι οι μαγνήτες κατασκευάζονται με καλούπι που έχει το μεγαλύτερο κόστος όταν γίνεται μια τέτοια παραγγελία.

Οι τραπεζοειδείς μαγνήτες έχουν τα εξής όμως πλεονεκτήματα: Σταθερό λόγο πλάτους μαγνήτη προς πολικό βήμα a_i κάτι που μπορεί να βοηθήσει σε μια πιο απλή ανάλυση αλλά και σε μια πιο ημιτονοειδή κυματομορφή της τάσης όπως θα αποδειχθεί και παρακάτω. Επιπλέον, η χρήση τραπεζοειδών μαγνητών επιτυγχάνει μεγαλύτερη μαγνητική ροή καθώς για τον ίδιο όγκο γεννήτριας οι τραπεζοειδείς μαγνήτες μπορούν να είναι μεγαλύτεροι από τους ορθογώνιους. Αυτό τους καθιστά ιδανικούς για εφαρμογές μικρού όγκου, όπου και ο η παραμικρή μαγνητική ροή μπορεί να επηρεάσει το τελικό αποτέλεσμα.

Στο [22] μελετώνται δύο διαφορετικά σχήματα μαγνητών, ημικυκλικοί και τραπεζοειδείς, σχετικά με τις αρμονικές που παράγουν. Οι τραπεζοειδείς αποδεικνύονται καλύτεροι. Επιπλέον, γεννήτριες με τραπεζοειδείς μαγνήτες μελετώνται στα [10, 29, 30, 31, 33], ενώ γεννήτριες με ορθογώνιους στα [23, 24, 25, 26, 27, 28].

3.3.3. Το πάχος του μαγνήτη

Το πάχος του μαγνήτη είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει αρκετά τη σχεδίαση αλλά μπορεί να αποφασιστεί σχετικά αυθαίρετα πριν από τη διαστασιολόγηση. Το πρώτο βασικό θέμα που προκύπτει είναι το πάχος του σιδήρου που συγκρατεί τους μαγνήτες. Όχι όσον αφορά τη μηχανική αντοχή αυτή τη φορά, αλλά μάλλον το μαγνητικό κορεσμό στο σίδηρο. Το πάχος του σιδήρου πρέπει να είναι περίπου ίσο με το πάχος του μαγνήτη για να μην υπάρχει κορεσμός. Το θέμα αυτό θα το εξετάσουμε και αργότερα όταν θα ορίσουμε το πάχος του σιδήρου του δρομέα.

Κατά τα άλλα το πάχος του μαγνήτη επηρεάζει σημαντικά τη σχεδίαση καθώς αλλάζει την κατανομή του πεδίου στο διάκενο, με λίγα λόγια την πρώτη αρμονική της πυκνότητας μαγνητικής ροής B_p . Δεν έχει βρεθεί σε αυτήν την εργασία κάποια

ανάλυση που να δείχνει πώς ακριβώς μεταβάλλονται τα πεδία, αλλά αυτό θα προκύψει και αργότερα από τις προσομοιώσεις. Το σίγουρο είναι ότι μειώνοντας το πάχος του μαγνήτη, μειώνεται και το πάχος του πηνίου όπως φαίνεται και από τη σχέση (2.12). Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε πηνία πολύ λεπτά τα οποία δύσκολα θα κατασκευαστούν με το χέρι. Το τελευταίο είναι συνέπεια του ότι μαγνήτες με μεγαλύτερο πάχος είναι γενικά πιο ισχυροί. Έτσι, αν π.χ. αυξηθεί 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 t_w του πηνίου.

Η κατασκευασιμότητα του πηνίου μετράται μέσω του λόγου αξονικού πάχους προς πάχος πλευράς $\frac{t_w}{w_c}$. Ο λόγος αυτός που δεν είναι σταθερός και έχει εξαχθεί μετρώντας διάφορα πηνία από τις μηχανές του Hugh Piggot [32] αλλά και εμπειρικά εξετάζοντας τη διαδικασία κατασκευής ενός πηνίου θα αποτελέσει σημαντικό περιορισμό για τη σχεδίαση της γεννήτριας. Σε αυτήν την εργασία ο λόγος αυτός έχει ως μέγιστη τιμή το 0,4. Για μεγαλύτερες τιμές τα πηνία δεν είναι αποδεκτά.

3.3.4. Λοιπές διαστάσεις μαγνήτη

Στη συνέχεια πρέπει να προσδιοριστούν οι λοιπές διαστάσεις του μαγνήτη. Η διαδικασία είναι απλή είτε ο μαγνήτης είναι ορθογώνιος, είτε είναι τραπεζοειδής. Σε κάθε περίπτωση οι δύο διαστάσεις του μαγνήτη που πρέπει να βρεθούν είναι το πλάτος του w_m καθώς και το μήκος του l_m το οποίο θα είναι περίπου ίσο με αυτό που έχουμε ως τώρα ονομάσει ενεργό μήκος $r_{out}-r_{in}$. Στην πραγματικότητα το ενεργό μήκος της γεννήτριας είναι το μήκος του μαγνήτη, το οποίο όπως βλέπουμε και στο σχήμα δε συμπίπτει ακριβώς με αυτό που ως τώρα ονομάζαμε ενεργό μήκος. Όταν όμως η γεννήτρια είναι μεγάλη και έχει πολλούς πόλους (και άρα μαγνήτες) η διαφορά αυτή είναι πολύ μικρή και πιθανότατα θα μπορούσε να αγνοηθεί. Εδώ πάντως υπολογίζεται γεωμετρικά. Σε κάθε περίπτωση απαιτείται η γνώση του α_i καθώς και της εξωτερικής και εσωτερικής ακτίνας προκειμένου να βρεθούν οι διαστάσεις του μαγνήτη που θα χρησιμοποιηθεί.

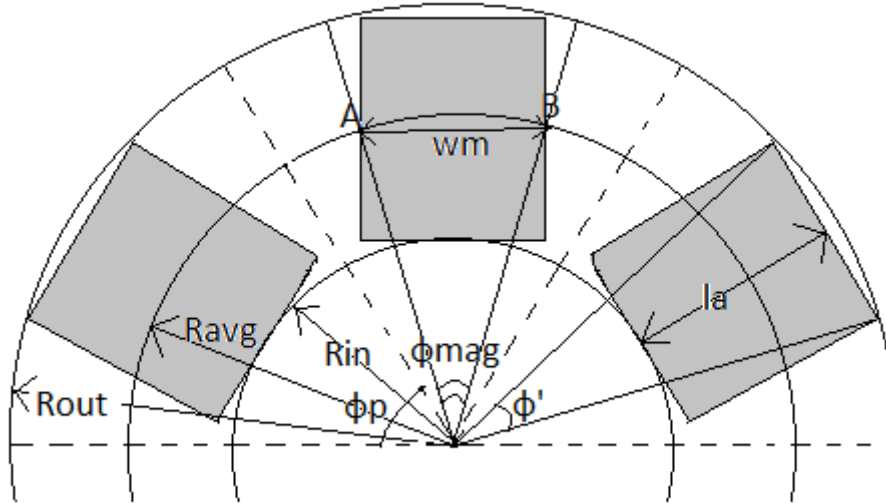
3.3.4.1. Ορθογώνιος Μαγνήτης

Γνωρίζοντας το α_i μπορούμε να βρούμε τη γωνία του μαγνήτη:

$$\varphi_{mag} = \alpha_i \varphi_p = \alpha_i \frac{2\pi}{p} \quad (3.8)$$

όπου φ_p η γωνία του πολικού βήματος. Έτσι μπορεί να βρεθεί το τόξο AB που αντιστοιχεί στο μέσο πλάτος του μαγνήτη w_m το οποίο ψάχνουμε:

$$AB = \alpha_i \frac{2\pi r_{avg}}{p} \quad (3.9)$$



Σχήμα 3.1: Η γεωμετρία του ορθογώνιου μαγνήτη.

Το τόξο αυτό θα βλέπαμε αν κάναμε το ευθύγραμμο ανάπτυγμα της γεννήτριας σε μία τομή ακριβώς στη μέση της. Η πραγματική όμως διάσταση του μαγνήτη είναι:

$$w_m = 2r_{avg} \sin\left(\frac{\varphi_{mag}}{2}\right) \quad (3.10)$$

Όσο για το μήκος του το ζήτημα περιπλέκεται λίγο παραπάνω καθώς ο ορθογώνιος μαγνήτης δεν έχει σταθερό α_i , έτσι πρέπει πρώτα να βρεθεί το α_i στην εξωτερική ακτίνα ή πιο απλά η γωνία φ' που αντιστοιχεί στην εξωτερική ακτίνα, όπως φαίνεται και στο σχήμα:

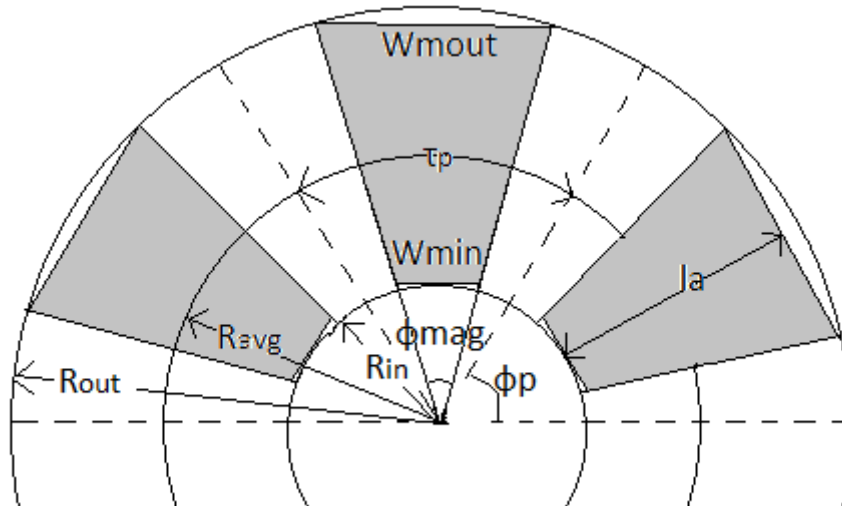
$$\varphi'_{mag} = 2 \sin^{-1}\left(\frac{w_m}{2r_{out}}\right) \quad (3.11)$$

$$l_a = r_{out} \cos\left(\frac{\varphi'_{mag}}{2}\right) - r_{in} \quad (3.12)$$

Οπότε καθορίστηκαν πλήρως οι διαστάσεις του ορθογώνιου μαγνήτη. Το τελευταίο μήκος είναι το ενεργό μήκος της γεννήτριας και χρησιμοποιείται ως έχει σε υπολογισμούς και προσομοιώσεις, αν και η πρώτη ακόμα εκτίμησή του δεν είναι πολύ μακρινή.

3.3.4.2. Τραπεζοειδής μαγνήτης

Στον τραπεζοειδή μαγνήτη οι υπολογισμοί είναι πιο απλοί λόγω του σταθερού λόγου α_i . Η γωνία του μαγνήτη παραμένει σταθερή για όλο το μήκος του, όπως ακριβώς κάνει και ο λόγος της γωνίας του μαγνήτη με τη γωνία του πολικού βήματος. Εξάλλου ο λόγος αυτός είναι ακριβώς το α_i . Οι υπολογισμοί πρέπει να ξαναγίνουν και εδώ με τη βοήθεια του παρακάτω σχήματος:



Σχήμα 3.2: Η γεωμετρία του τραπεζοειδούς μαγνήτη

$$\varphi_{mag} = a_i \varphi_p = a_i \frac{2\pi}{p} \quad (3.13)$$

$$l_a = r_{out} \cos\left(\frac{\varphi_{mag}}{2}\right) - r_{in} \quad (3.14)$$

$$w_{mout} = 2r_{out} \sin\left(\frac{\varphi_{mag}}{2}\right) \quad (3.15)$$

$$w_{min} = 2r_{in} \tan\left(\frac{\varphi_{mag}}{2}\right) \quad (3.16)$$

Οι παραπάνω είναι οι κατασκευαστικές διαστάσεις του μαγνήτη. Οι αντίστοιχες του ευθύγραμμου αναπτύγματος θα περιλαμβάνουν τα τόξα και θα είναι:

$$w_{mavg} = a_i r_{avg} \quad (3.17)$$

$$w_{mout} = a_i r_{out} \quad (3.18)$$

$$w_{min} = a_i r_{in} \quad (3.19)$$

Αυτό που πρέπει γενικά να προσέξει κανείς κάνοντας τη διαστασιολόγηση είναι η διάκριση μεταξύ πραγματικών μεγεθών και των μεγεθών του ευθύγραμμου αναπτύγματος που θα χρησιμοποιηθεί αργότερα για την προσομοίωση της γεννήτριας στον υπολογιστή.

3.3.5. Ο λόγος πλάτους μαγνήτη προς πλάτος πολικού βήματος

Ο λόγος αυτός είναι ένας απ' τους πιο σημαντικούς παράγοντες όλης της διαστασιολόγησης και πρέπει να δοθεί μεγάλη προσοχή στην επιλογή του καθώς επηρεάζει όλη τη δομή της γεννήτριας, το κόστος της αλλά και τα χαρακτηριστικά της εξόδου της.

Πολύ συχνά στη βιβλιογραφία θα συναντηθεί η βέλτιστη τιμή του λόγου αυτού ως $\frac{2}{\pi}$ [5, 17]. Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι η τιμή αυτή είναι βέλτιστη μόνο και μόνο επειδή παράγονται έτσι ημιτονοειδείς τάσεις. Κατά τα άλλα τα πεδία παραμένουν μη-ημιτονοειδή. Ημιτονοειδής τάση χρειάζεται μόνο για να μην υπάρχουν αρμονικές στη γεννήτρια οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν θόρυβο και ανεπιθύμητες ροπές. Τα προβλήματα αυτά όμως μπορούν να λυθούν με άλλους τρόπους και για εφαρμογές χαμηλού κόστους και μικρής ισχύος, όπως είναι η παρούσα, δεν πρέπει να μας απασχολούν. Γεγονός είναι ότι ο λόγος αυτός μπορεί να αλλάξει κατά βούληση του σχεδιαστή. Επιπλέον πρέπει να είναι γνωστό ότι προσθέτοντας ανορθωτή στη διάταξη θα εισαχθούν στην κυματομορφή της τάσης και του ρεύματος πολλές αρμονικές.

Μια γενική ματιά πάντως θα έδειχνε ότι αυξάνοντας το α_i σε μια γεννήτρια δεδομένης εξωτερικής ακτίνας, μεγαλώνουν οι μαγνήτες, και έτσι, αυξάνοντας το μαγνητικό υλικό αυξάνεται και η ισχύς στην έξοδο. Αντίστροφα, δεδομένης της ισχύος της γεννήτριας, μεγάλο α_i οδηγεί σε μικρότερο όγκο -αλλά όχι κατ' ανάγκη και σε μικρότερο βάρος- γεννήτριας. Υψηλή τιμή του συντελεστή αυτού οδηγεί σε μαγνήτες μεγαλύτερης επιφάνειας, και άρα σε μεγαλύτερη ελκτική δύναμη μεταξύ των δίσκων του δρομέα που σημαίνει σίδηρος μεγαλύτερου πάχους και πιο βαριά κατασκευή.

Ο λόγος αυτός επιδρά στο κόστος της γεννήτριας (αφού ελέγχει τον κύριο παράγοντα κόστους, τους μαγνήτες), στον όγκο, στο βάρος, στην απόδοση και στην κυματομορφή της τάσης. Όλα τα παραπάνω θα φανούν καλύτερα μετά τη μοντελοποίηση του συστήματος και την προσομοίωσή του στον υπολογιστή οπότε και θα επανέλθουμε στο συγκεκριμένο ζήτημα.

3.3.6. Η πρώτη αρμονική της πυκνότητας μαγνητικής ροής

Η μεγαλύτερη δυσκολία που συναντήθηκε σε αυτή την εργασία ήταν ο προσδιορισμός του μέτρου της πρώτης αρμονικής της μαγνητικής ροής στο διάκενο B_p . Η εύρεση κάποιας θεωρητικής σχέσης για τον υπολογισμό του ήταν αδύνατη και μόνο για $\alpha_i=2/\pi$ γίνεται μια εκτίμηση:

$$B_p = \frac{2\sqrt{3}B_{mg}}{\pi}$$

Φυσικά η σχέση αυτή δεν ισχύει σε κάθε άλλη περίπτωση και δε χρησιμεύει στη διαστασιολόγηση.

Το B_p εκφράζει την κατανομή του πεδίου στο διάκενο. Έτσι μπορούμε να υποθέσουμε ότι εξαρτάται αφενός από το είδος του μαγνήτη, αφετέρου από τη γεωμετρία. Το είδος του μαγνήτη είναι δεδομένο και αυτό που θα αλλάζει από εδώ και πέρα είναι η γεωμετρία, δηλαδή το α_i , το πάχος του μαγνήτη h_m καθώς και η μεταξύ τους απόσταση t_w . Το πάχος του μαγνήτη είναι επίσης δεδομένο και ίσο με 10 mm και καθορίζει άμεσα όπως έχουμε δει (δεδομένου του είδους του μαγνήτη) το t_w . Έτσι, μοναδική μεταβλητή στην ανάλυση μένει ο λόγος πλάτους μαγνήτη προς πολικό βήμα α_i .

Ο υπολογισμός λοιπόν του B_p εμποδίζει τη γραμμική εξέλιξη της διαδικασίας. Η εξάρτηση όμως μόνο από το α_i είναι μια καλή προσέγγιση που μπορεί να γίνει. Έτσι, υπολογίζοντας στον υπολογιστή το B_p για πολλές τιμές του α_i μπορούμε να εξαγάγουμε όπως θα δούμε παρακάτω μια σχέση υπολογισμού για την πρώτη αρμονική του πεδίου.

3.4. Εξωτερική και εσωτερική ακτίνα

Στο σημείο αυτό θα παρουσιαστεί ένας τρόπος υπολογισμού της εξωτερικής και εσωτερικής ακτίνας της γεννήτριας. Η διαδικασία θα βασιστεί στην ανάλυση που έγινε στο κεφάλαιο 2 για τη ροπή της γεννήτριας.

3.4.1. Ισχύς και Ροπή

Η σχέση (2.4) υπολογίζει την ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας. Η ροπή αυτή αντιστοιχεί στην ηλεκτρομαγνητική ισχύ της γεννήτριας. Η ισχύς αυτή μπορεί να βρεθεί θεωρώντας όπως έχει ήδη γίνει απόδοση $\eta = 90\%$ και γνωρίζοντας τη ζητούμενη ηλεκτρική ισχύ στην έξοδο (3 kW). Εδώ τίθεται ένα θέμα διαστασιολόγησης [2] που θέλει προσοχή. Η γεννήτρια δεν πρέπει να διαστασιολογηθεί ακριβώς για 3 kW αλλά για λίγο παραπάνω ώστε να αντέχει σε περίπτωση ριπών ανέμου μεγαλύτερων από 10m/s. Αν και αυτή η μέθοδος είναι αρκετά αμφίβολη, εδώ θα χρησιμοποιηθεί η $P_{max} = 1.1 \cdot P_{nom}$ για ασφάλεια στη διαστασιολόγηση. Πάντως η ισχύς που μπορεί να παραχθεί από μια ριπή ανέμου είναι πολύ μεγαλύτερη από την παραπάνω. Όμως η διάρκεια της είναι πολύ μικρή. Ισχύει:

$$T_d = \frac{P_{H/Mmax}}{\omega_{mech}} = \frac{60P_{H/Mmax}}{2\pi n_{nom}} = \frac{60P_{\eta\lambda max}}{\eta 2\pi n_{nom}} = \frac{1.1 \cdot 60P_{\eta\lambda nom}}{\eta 2\pi n_{nom}} = 117 Nm \quad (3.20)$$

3.4.2. Εξωτερική Ακτίνα

Ακολουθεί ο υπολογισμός της εξωτερικής ακτίνας της γεννήτριας. Θα χρησιμοποιηθεί η σχέση (2.7) του κεφαλαίου 2:

$$T_d = k_{sc} k_{ec} k_r \sqrt{\frac{1.5 P_{cu} k_f t_w}{\rho_t}} r_{out}^2 B_p \quad (3.21)$$

όπου

$$P_{cu} = 3I_a^2 R_{phase} \quad (3.22)$$

$$I_a = J_{max} s_c \quad (3.23)$$

$$R_{phase} = \rho_{cu} \frac{N_{phase} l_{avg}}{s_c} \quad (3.24)$$

$$k_f = \frac{N_c s_c}{w_c t_w} = \frac{N_{phase} s_c}{q w_c t_w} \quad (3.25)$$

$$w_c = 2r_{avg} \sin\left(\frac{\theta_{re}}{p}\right) = r_{out}(k_d + 1) \sin\left(\frac{\theta_{re}}{p}\right) \quad (3.26)$$

$$l_{avg} = 2l_a + l_{ec} = 2r_{out} \left\{ (1 - k_d) + \frac{\theta_m - 0,6\theta_{re}}{p} (1 + k_d) \right\} = 2r_{out}\Lambda \quad (3.27)$$

Αντικαθιστώντας όλες τις παραπάνω σχέσεις και λύνοντας το τριώνυμο που προκύπτει (η διαδικασία δεν προσφέρει κάτι και παραλείπεται) εξάγεται η σχέση:

$$r_{out} = \sqrt[3]{\frac{T_d}{k_{wc}k_{ec}k_r J_{max} t_w k_f B_p \sqrt{4,5q(k_d + 1) \sin\left(\frac{\theta_{re}}{p}\right)} 2\Lambda}} \quad (3.28)$$

όπου

$$\Lambda = (1 - k_d) + \frac{\theta_m - 0,6\theta_{re}}{p} (1 + k_d) \quad (3.29)$$

Η μέγιστη πυκνότητα ρεύματος στο τύλιγμα μπορεί να φτάσει και τα 6.5 A/mm² σύμφωνα με το [5] για γεννήτριες μέχρι 10 kW. Ωστόσο εδώ επιλέγεται η ασφαλής τιμή των 6 A/mm². Όλοι οι υπόλοιποι συντελεστές της παραπάνω παράστασης έχουν βρεθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο όπου μπορεί κανείς να ανατρέξει για τον υπολογισμό τους. Δύο συντελεστές, ο συντελεστής πλήρωσης k_f και ο λόγος εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα k_d δεν καθορίζονται ακόμα και η τιμή τους θα συζητηθεί στη συνέχεια.

3.4.3. Ο λόγος εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα

Από τη στιγμή που θα υπολογιστεί η εξωτερική ακτίνα εύκολα βρίσκεται και η εσωτερική:

$$r_{in} = k_d r_{out} \quad (3.30)$$

Ο λόγος αυτός πρέπει επίσης να επιλεγεί από το σχεδιαστή ανάλογα με τα κριτήρια με τα οποία κάνει τη σχεδίαση. Στη βιβλιογραφία συναντάται συχνά η τιμή $k_d = \frac{1}{\sqrt{3}}$ ως βέλτιστη για μέγιστη ροπή [5, 18]. Η τιμή αυτή δεν είναι φυσικά δεσμευτική και είναι μάλλον πολύ μικρή για εφαρμογές χαμηλού κόστους, όπως θα φανεί αργότερα.

Γενικά πάντως, ο συντελεστής αυτό επηρεάζει το συνολικό όγκο της γεννήτριας αλλά κυρίως επηρεάζει το σχήμα του μαγνήτη καθορίζοντας λίγο πολύ το ενεργό του μήκος. Ένας μικρός λόγος εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα οδηγεί σε μαγνήτες μεγάλου ενεργού μήκους και άρα μεγάλης επιφάνειας. Αυτό οδηγεί αφενός σε μεγάλο κόστος (μεγαλύτερος μαγνήτης) αλλά και σε μεγάλη ελκτική δύναμη μεταξύ των δίσκων του δρομέα. Αυτό σημαίνει όπως έχει ήδη ειπωθεί σίδηρο μεγαλύτερου πάχους και άρα πιο βαριά κατασκευή. Με λίγα λόγια χαμηλό k_d είναι πολύ πιθανό (ανάλογα και με την υπόλοιπη σχεδίαση) να οδηγήσει σε πιο ακριβή και πιο βαριά κατασκευή. Η γεννήτρια όμως θα έχει καλύτερη απόδοση, ροπή αλλά και μεγαλύτερη

πυκνότητα ισχύος καθώς θα είναι πιθανότατα μικρότερη σε όγκο. Το τελευταίο δεν μπορεί να φανεί άμεσα από τις σχέσεις και θα προκύψει και αυτό αργότερα κατά την προσομοίωση και βελτιστοποίηση της γεννήτριας.

Γενικά πάντως, μεγάλες τιμές του λόγου αυτού (0.7-0.8) συναντώνται στις εφαρμογές χαμηλού κόστους [32, 34] και δε δημιουργούν πρόβλημα στη λειτουργία της γεννήτριας.

3.5. Ο στάτης και τα πηνία

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξεταστούν όλες οι διαστάσεις του στάτη. Θα διαστασιολογηθεί με λίγα λόγια το τύλιγμα και θα εξεταστούν όπως και προηγουμένως συγκεκριμένοι παράγοντες που επηρεάζουν τη σχεδίαση.

3.5.1. Το πάχος του στάτη

Το πάχος του στάτη αντιπροσωπεύεται από το αξονικό πάχος των πηνίων t_w . Με βάση όλη την προηγούμενη ανάλυση το πάχος του στάτη είναι πλέον εύκολο να βρεθεί αν υποτεθεί ότι ο σχεδιαστής έχει πάρει συγκεκριμένες αποφάσεις, όπως είναι ο βαθμός του μαγνήτη και το πάχος του, καθώς και το πεδίο το οποίο θα υπάρχει στο διάκενο της γεννήτριας. Ας εξετάσουμε λίγο καλύτερα τη σχέση (2.13) του κεφαλαίου 2:

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

Το διάκενο της γεννήτριας g επιλέγεται να είναι ίσο με 3mm. Είναι μια μεγάλη τιμή γενικά 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 επιλέγεται να είναι ίσο με $h_m=10$ mm. Το πάχος αυτό συναντάται αρκετά συχνά σε εμπορικούς μαγνήτες. Φυσικά ο κάθε σχεδιαστής μπορεί να επιλέξει κατά βούληση το πάχος του μαγνήτη που θα χρησιμοποιήσει, έχοντας υπόψη όλα όσα έχουν ειπωθεί ως τώρα για αυτό.

Η μέγιστη τιμή της πυκνότητας μαγνητικής ροής στο διάκενο θεωρείται λίγο μικρότερη από αυτή στην επιφάνεια του μαγνήτη B_{mg} . Οι επιλεγμένοι μαγνήτες είναι οι NdFeB N40. Για τους μαγνήτες αυτούς $B_r=1.26$ T και $H_c=915$ kA/m. Άρα η πυκνότητα μαγνητικής ροής στην επιφάνεια του μαγνήτη θα είναι περίπου ίση με $B_r/2$, οπότε προκύπτει $B_{mg}=0.62$ T. Η μέγιστη τιμή στο διάκενο είναι μικρότερη, $B_{max}=0.6$ T. Υπολογίζοντας και το $\mu_{rrec}=1.0958$ από τη σχέση (2.12) μπορούμε απλά να βρούμε το πάχος του στάτη.

Σημειώνεται σε αυτό το σημείο ότι αυτή η σχέση είναι θεωρητική και αρκετά προσεγγιστική και θα τη διορθώσουμε αργότερα με κάποιον συντελεστή. Ένας εύκολος τρόπος για να βρεθεί η διάσταση αυτή του στάτη προτείνεται από τον Hugh

Piggott [2] και αναφέρει ότι η απόσταση μεταξύ δύο αντικριστών μαγνητών πρέπει να είναι ίση με το διπλάσιο του πάχους του μαγνήτη:

$$t_w + 2g = 2h_m \rightarrow t_w = 2h_m - 2g \rightarrow t_w = 20 - 6 \rightarrow t_w = 14 \text{ mm}$$

Η σχέση αυτή, αν και πιο προσεγγιστική, δίνει αρκετά κοντινά αποτελέσματα με τη σχέση που προτείνεται σε αυτήν την εργασία. Ισχύει όμως μόνο για μαγνήτες N40 και είναι κυρίως ένας γρήγορος κανόνας διαστασιολόγησης.

3.5.2. Σπείρες και πάχος πηνίου

Στο κεφάλαιο 1 βρέθηκε η εξίσωση της τάσης που επάγεται στα τυλίγματα από τους μαγνήτες:

$$E_f = \frac{N_c 2\sqrt{2}q\omega_e B_p k_w l_a r_{avg}}{p}$$

Λύνοντας ως προς τις σπείρες ανά πηνίο N_c :

$$N_c = \frac{E_f p}{2\sqrt{2}q\omega_e B_p k_w l_a r_{avg}}$$

όπου

$$\omega_e = \frac{2\pi n p}{60 \cdot 2}$$

Για $n=n_{cutin}$ οι παραπάνω σχέσεις γράφονται:

$$N_c = \frac{E_{f_{cutin}} p}{2\sqrt{2}q\omega_{e_{cutin}} B_p k_w l_a r_{avg}} \quad (3.31)$$

όπου

$$\omega_e = \frac{2\pi n_{cutin} p}{60 \cdot 2} \quad (3.32)$$

Όλα τα μεγέθη στις παραπάνω εξισώσεις έχουν βρεθεί στο πρώτο μέρος αυτού του κεφαλαίου. 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 και ισούται με 0.95.

Για την εύρεση του πάχους πλευράς πηνίου w_c πρέπει πρώτα να βρεθεί το μέγιστο ρεύμα που προβλέπουμε να περάσει από τα τυλίγματα της γεννήτριας. Όπως και πριν, το κάνουμε αυτό προκειμένου να είμαστε ασφαλείς όταν κάποια ριπή χτυπήσει τη γεννήτρια ότι δε θα περάσει ρεύμα που δε θα μπορέσει να αντέξει το τύλιγμα. Η μικρή διάρκεια των ριπών καθώς και το αεροδυναμικό φρένο της γεννήτριας εξασφαλίζουν ότι τα ρεύματα αυτά θα είναι επίσης μικρής διάρκειας και άρα όχι πολύ επικίνδυνα. Έτσι θεωρούμε:

$$I_{amax} = \frac{1.1P_{\eta\lambda}}{3E_{fnom}\eta} = 4.27 \text{ A}$$

ενώ για το ονομαστικό ρεύμα (πάντα το ac ρεύμα, πριν τον ανορθωτή) θα ισχύει:

$$I_{anom} = \frac{P_{\eta\lambda}}{3E_{fnom}\eta} = 3.86 \text{ A}$$

Στο μελέτη τυλίγματος που έγινε στο πρώτο κεφάλαιο δείξαμε την παρακάτω σχέση:

$$J_{max} = \frac{N_c I_{amax}}{t_w w_c k_f} \rightarrow w_c = \frac{N_c I_{amax}}{k_f J_{max} t_w}$$

Σε αυτό το σημείο όλοι οι συντελεστές της παράστασης είναι γνωστοί, εκτός από το συντελεστή πλήρωσης k_f . Θα αναφερθούμε ειδικά στο συντελεστή αυτό σε επόμενο κεφάλαιο.

Το εμβαδόν της σπείρας βρίσκεται τώρα απλά:

$$sc = \frac{I_{amax}}{J_{max}} \quad (3.33)$$

και η διάμετρος του χαλκού που θα χρησιμοποιηθεί:

$$dc = \sqrt{\frac{4sc}{\pi}} = 0.9521 \text{ mm} \quad (3.34)$$

Η κοντινότερη διάμετρος χαλκού είναι $dc=0.95 \text{ mm}$, άρα εκτελώντας την ίδια διαδικασία προς τα πίσω βρίσκουμε το νέο πάχος πλευράς πηνίου w_c και τη νέα πυκνότητα ρεύματος η οποία δε θέλουμε να είναι πολύ μικρότερη από τα 6 A/mm^2 .

3.5.3. Ο συντελεστής πλήρωσης του πηνίου

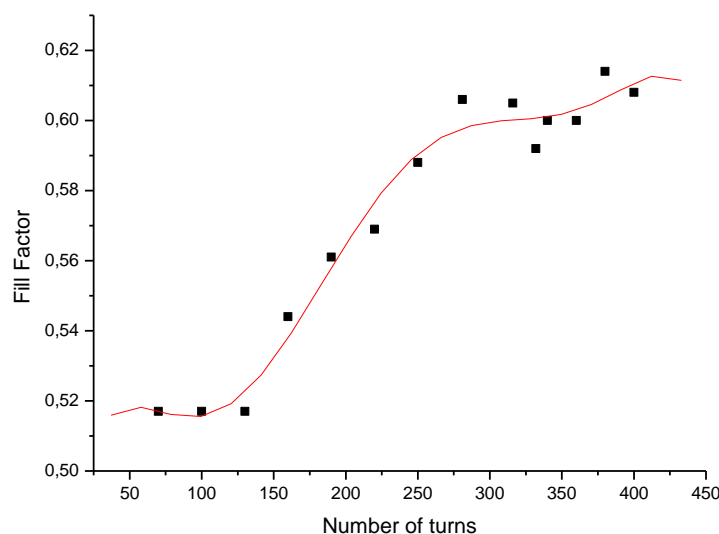
Ο συντελεστής πλήρωσης εκφράζει τη δυνατότητα να γεμίσει η ιδεατή αύλακα με χαλκό. Η μέγιστη τιμή του για αγωγούς με κυκλική διατομή προκύπτει εύκολα από τη γεωμετρία:

$$k_{fmax} = \frac{sc}{S_{αυλακας}} = \frac{\pi R^2}{4R^2} = \frac{\pi}{4} = 0.785$$

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία ο συντελεστής πλήρωσης των πηνίων είναι περίπου ίσος με 0.45 [17]. Όμως από πηνία που μετρήθηκαν [32] βρέθηκε ότι μπορεί να φτάσει μέχρι και το 0.55 ή και περισσότερο ανάλογα με το σχήμα του πηνίου, τη διάμετρο και τον αριθμό των σπειρών.

Στο εργαστήριο τυλίχθηκε ένα τυπικό σχήμα πηνίου με χαλκό διαμέτρου 0.95 mm . Τυλίχθηκαν μέχρι και 400 σπείρες και ανά τακτά χρονικά διαστήματα καταγραφόντουσαν οι διαστάσεις του πηνίου προκειμένου να βρεθεί μια σχέση του

συντελεστή πλήρωσης με τον αριθμό των σπειρών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 3.3: Ο συντελεστής πλήρωσης σε σχέση με τον αριθμό σπειρών του πηνίου.

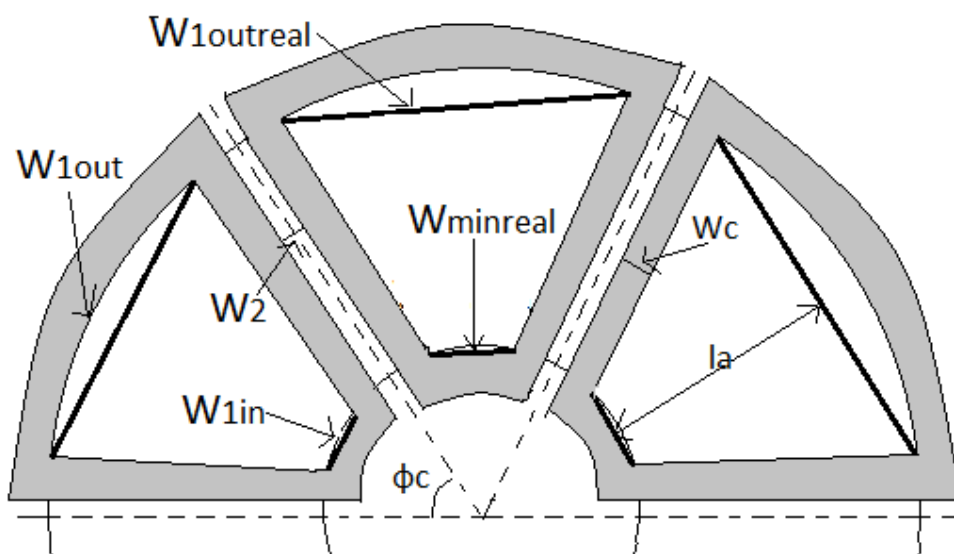
Είναι προφανές ότι ο συντελεστής βελτιώνεται όσο αυξάνονται οι σπείρες, αν και ο αυξημένος αριθμός σπειρών συνεπάγεται μεγαλύτερη πιθανότητα λάθους κατά το τύλιγμα του πηνίου. Ο συντελεστής πλήρωσης σταθεροποιείται σε μια τιμή γύρω στο 0.6. Η τιμή αυτή αν και πραγματοποιήσιμη θεωρήθηκε πολύ αισιόδοξη με αποτέλεσμα να επιλεγεί η τιμή $k_f=0.55$ ως πιθανότερη. Η περίπτωση εκείνη που ο συντελεστής αυτός (η τιμή του οποίου δε μπορεί να ελεγχθεί κατά την κατασκευή των πηνίων) προκύψει μεγαλύτερος δεν οδηγεί σε κάποιο αδιέξοδο την κατασκευή. Το αποτέλεσμα θα είναι το ίδιο, αλλά τα πηνία θα πιάνουν λιγότερο χώρο, δε θα εφάπτονται μεταξύ τους και ο χώρος δε θα αξιοποιείται σωστά. Αν όμως ο συντελεστής πλήρωσης προκύψει μικρότερος, τότε το ένα πηνίο θα επικαλύπτει το άλλο κάνοντας αδύνατη την κατασκευή. Επίσης για διαφορετικές γεωμετρίες πηνίων (τραπεζοειδή, ορθογώνιο κλπ) ο συντελεστής πλήρωσης μεταβάλλεται διαφορετικά σε σχέση με τον αριθμό των σπειρών. Για την εκτίμησή του λοιπόν πρέπει να ληφθούν υπόψη ο αριθμός των σπειρών, η διάμετρος του χαλκού και το σχήμα του πηνίου. Γι' αυτό είναι πολύ σημαντικό πριν από την κατασκευή της γεννήτριας να τυλιχτεί ένα πηνίο ώστε να μη βρεθεί ο σχεδιαστής προ εκπλήξεων.

Γενικά, πάντως, η υψηλή τιμή του συντελεστή πλήρωσης είναι πάντα το ζητούμενο στις γεννήτριες. Υψηλό k_f οδηγεί σε καλύτερη αξιοποίηση του χώρου. Αυτό συνεπάγεται μικρότερη κατασκευή, πιο ελαφριά και φυσικά πιο φθηνή. Επιπλέον η γεννήτρια θα είναι και πιο αποδοτική καθώς μικρότερα πηνία σημαίνει μικρότερα άκρα τυλίγματος και άρα μικρότερες απώλειες. Τέλος, όσο μικρότερη η γεννήτρια, τόσο πιο εύκολα και γρήγορα θα κατασκευαστεί, κάτι που είναι και στόχος της παρούσας εργασίας.

3.5.4. Κατασκευαστικές διαστάσεις πηνίου

Γνωρίζοντας το συντελεστή πλήρωσης, είναι πλέον δυνατό να υπολογιστεί ο αριθμός των σπειρών και το πάχος της πλευράς του πηνίου. Στη συνέχεια 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 όπως αυτό βρέθηκε στο κεφάλαιο 2.3.4. Οι υπόλοιπες διαστάσεις, οι οποίες εικονίζονται και στο σχήμα, βρίσκονται ως εξής:



Σχήμα 3.4: 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 $w_2 = 0.5\text{mm}$, 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:

$$w_1 = \frac{2\pi r}{Q} - 2w_c - w_2 \quad (3.36)$$

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_{1in}^{real} και w_{1out}^{real} , τα οποία λόγω της ιδιομορφίας της κατασκευής υπολογίζονται:

$$w_1^{real} = 2r \sin(\varphi_c) \quad (3.37)$$

όπου

$$\varphi_c = \frac{2\pi w_1}{Q(w_1 + 2w_c + w_2)} \quad (3.38)$$

Έτσι τελειώνει η διαστασιολόγηση του τυλίγματος, καθώς τώρα όλα τα μεγέθη είναι γνωστά. Στο [2] γίνεται μια διαφορετική διαστασιολόγηση του πηνίου που σαν βάση της έχει να ταιριάζει ο μαγνήτης ακριβώς στην ενεργό επιφάνεια του πηνίου. Η τακτική αυτή δεν είναι λανθασμένη και χρησιμοποιείται προκειμένου να βελτιώσει την κυματομορφή της τάσης. 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. Ωστόσο κάτι τέτοιο δεν είναι πάντα εφικτό δεδομένου ενός συγκεντρωμένου τυλίγματος διπλής στρώσης. Αλλαγή του τυλίγματος και απομάκρυνση από τους συντελεστές που έχουν υπολογιστεί στο κεφάλαιο 2 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.

3.6. Το πάχος του σιδήρου

Το πάχος του σιδήρου είναι μια πολύ σημαντική μεταβλητή της γεννήτριας. 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 [5]:

$$F_z = \frac{1}{2} \frac{B_{mg}^2}{\mu_0} S_{PM} \quad (3.39)$$

όπου

$$S_{PM} = a_i \pi (r_{out}^2 - r_{in}^2) \quad (3.40)$$

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

Πέραν όμως της σχέσης αυτής, δε βρέθηκε κάποια εμπειριστατωμένη μελέτη για την αντοχή του σιδήρου, ή κάποια σχέση που να συνδέει άμεσα το πάχος με την ελκτική δύναμη. Μια βιβλιογραφική μελέτη [32, 34, 35, 36, 37] είχε ως αποτέλεσμα να βρεθεί το πάχος του σιδήρου για διάφορες επιφάνειες μαγνητών, ώστε να προκύψει μια εμπειρική σχέση για το πάχος του σιδήρου. Πιο συγκεκριμένα μετρήθηκε κάθε φορά η επιφάνεια των μαγνητών, βρέθηκε η ελκτική δύναμη, και μεταφράστηκε μέσω της εξωτερικής ακτίνας σε ροπή στα άκρα του δίσκου (εκεί λυγίζουν οι δίσκοι πιο εύκολα). Στη συνέχεια έγινε το γράφημα ροπής-πάχους σιδήρου και με παρεμβολή βρέθηκε το πολυώνυμο που εκφράζει τη σχέση αυτή. Το πολυώνυμο

χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια ως οδηγός για τη διαστασιολόγηση ενώ η τελική απόφαση λαμβάνεται στο τέλος ανεξάρτητα από αυτό για ασφάλεια.

Γενικά, η απόφαση για το πάχος του σιδήρου είναι σημαντική και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη δύο κριτήρια: Το πρώτο είναι η μηχανική αντοχή της γεννήτριας. Να μη λυγίσουν οι δίσκοι υπό την ελκτική δύναμη των μαγνητών. Μια λύση, άμα 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. Το δεύτερο είναι να μην υπάρχει κορεσμός. Άμα 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. Ένας πρακτικός τρόπος για να δει κανείς αν υπάρχει κορεσμός (αφού έχει κατασκευάσει τους δίσκους με τους μαγνήτες) είναι να τοποθετήσει στο πίσω μέρος του δίσκου έναν συνδετήρα. Άμα ο συνδετήρας κολλήσει σημαίνει ότι υπάρχει κορεσμός και δεν εκμεταλλευόμαστε όλη τη μαγνητική ροή των μαγνητών. Τα δύο κριτήρια πρέπει να ληφθούν υπόψη και να ζυγιστούν σωστά ώστε να μην προκύψει μια πολύ βαριά κατασκευή.

Ας σημειωθεί εδώ ότι στους σιδερένιους δίσκους του δρομέα μπορούν να κοπούν κάποιες οπές συμμετρικά και μακριά από τους μαγνήτες. Οι οπές 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 [34].

3.7. Κόστος και βάρος γεννήτριας

Στο κεφάλαιο αυτό βρίσκεται μια εκτίμηση για το συνολικό κόστος και το βάρος 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

Οι τιμές όλων των παραπάνω υλικών δεν είναι σταθερές στο χρόνο και ιδιαίτερα στα μέταλλα παρατηρούνται αρκετές μεταβολές. Επίσης δεν πρέπει να ξεχάσει ο σχεδιαστής να συμπεριλάβει σε όλα τα παραπάνω το ΦΠΑ. Υλικά που παραγγέλλονται από το εξωτερικό δεν επιβαρύνονται με ΦΠΑ αλλά με έξοδα αποστολής. Ο ΦΠΑ θεωρήθηκε 23%.

Η εξίσωση κόστους θα είναι:

$$C_{total} = (1 + \Phi\text{ΠΑ})(C_{Fe} + C_{cu} + C_{resin} + C_{wood}) + C_{mag}^{tot}$$

Ενώ για το βάρος:

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

3.7.1. Οι μαγνήτες

Έχει ειπωθεί επανειλημμένως σε αυτήν την εργασία ότι το μεγαλύτερο κόστος της γεννήτριας το καταλαμβάνουν οι μαγνήτες. Η κοστολόγηση των μαγνητών δεν είναι εύκολη εργασία, καθώς δεν υπάρχει κάποια τιμή για το κιλό ενός είδους μαγνήτη. Κάθε τεμάχιο τιμολογείται ξεχωριστά ανάλογα με το βάρος, το πάχος και το σχήμα. Έτσι, γενικά, μαγνήτες μεγαλύτερου βάρους (αλλά ίδιοι κατά τα άλλα) προφανώς θα είναι ακριβότεροι. Αλλά η σύγκριση δεν είναι εύκολη όταν αλλάζει το σχήμα και η μάζα ταυτόχρονα για παράδειγμα. Έχοντας επιλέξει 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 ευρέως 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 μιας τέτοιας σχέσης δεν είναι εύκολη εργασία.

Η διαδικασία που ακολουθείται εδώ για την εύρεση της συνάρτησης κόστους των μαγνητών είναι η εξής: Πρώτα επικοινωνία με εταιρείες παραγωγής μαγνητών. Οι εταιρείες αυτές δεν ήταν όλες πρόθυμες να δώσουν μια γενική εκτίμηση του κόστους, ωστόσο λάβαμε κάποια στοιχεία και έτσι υπήρχε μια εκτίμηση για το πόσο θα κοστίσει η γεννήτρια κατασκευασμένη με μη εμπορικούς μαγνήτες. Το κόστος είναι αρκετά μεγάλο.

Στη συνέχεια έγινε έρευνα στο διαδίκτυο για τους εμπορικούς μαγνήτες από όπου προέκυψαν δύο συναρτήσεις κόστους (για ορθογώνιους και τραπεζοειδείς). Το κόστος αυτό θεωρήθηκε ότι θα είναι το κόστος των μαγνητών όταν αυτοί γίνουν εμπορικοί. Παρατηρούμε ότι οι συναρτήσεις αυτές έχουν την ίδια κλίση αλλά διαφορετική σταθερά. Η κλίση έχει να κάνει προφανώς με το βάρος του υλικού, ενώ η σταθερά συμπεριλαμβάνει τα λειτουργικά κόστη της εταιρείας καθώς και τη μεγαλύτερη δυσκολία κατασκευής τραπεζοειδών μαγνητών έναντι των ορθογωνίων.

Ορθογώνιοι:

$$C_{mag}^{rect} = 3.3 + 1.8 \cdot 10^{-4} \cdot V_{mag}^{rect}$$

$$V_{mag}^{rect} = l_a w_m h_m$$

Τραπέζιοι:

$$C_{mag}^{trap} = 3.48 + 1.8 \cdot 10^{-4} \cdot V_{mag}^{trap}$$

$$V_{mag}^{trap} = \frac{(w_{min} + w_{mout})}{2} l_a h_m$$

Το ολικό κόστος των μαγνητών δίνεται σε κάθε περίπτωση (θα γίνει παραγγελία 2p μαγνητών από το εξωτερικό):

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

Το συνολικό βάρος των μαγνητών θα είναι ίσο με:

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

όπου $\rho_{mag}=7.5 \text{ g/cm}^3$ για τους NdFeB N40.

3.7.2. 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 :

$$V_{Fe} = 4r_{out}^2 h_m$$

Δεδομένης της πυκνότητας $\rho_{Fe}=7.87 \text{ g/cm}^3$ βρίσκουμε τη μάζα:

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

Άρα το τελικό κόστος:

$$C_{Fe} = \text{ironprice} \cdot m_{Fe} + \text{manufacturing cost}$$

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

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

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

3.7.3. Ο χαλκός

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

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

Η πυκνότητα του χαλκού είναι ίση με $\rho_{cu}=8.94 \text{ g/cm}^3$. Το συνολικό κόστος του χαλκού θα είναι:

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

3.7.4. 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 $r_{out}-r_{in}$, 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:

$$M_{resin} = 2\rho_{resin}(V_{resin}^{rotor} + V_{resin}^{stator})$$

όπου $\rho_{resin}=1.36 \text{ g/cm}^3$.

Για το κόστος:

$$C_{resin} = resin\ price \cdot M_{resin}/2$$

3.7.5. 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} τετράγωνο. Τα 3 χρησιμοποιούνται στο στάτη και τα 6 στο δρομέα. Το πάχος είναι διαφορετικά 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 δύο διαφορετικά πάχη που χρησιμοποιούνται.

Η συγκεκριμένη κοστολόγηση είναι αρκετά προσεγγιστική καθώς και άλλα κομμάτια ξύλου χρησιμοποιούνται για την κατασκευή, πέραν από τα 9 που απαιτούνται για τα καλούπια.

3.8. Γενικός αλγόριθμος διαστασιολόγησης

Η συνολική διαδικασία που ακολουθείται για τον καθορισμό όλων των διαστάσεων της γεννήτριας περιγράφεται παρακάτω:

Βήμα 1ο: Επιλογή της επιθυμητής ισχύος $P_{ηλnom}$ και απόδοσης η . Επίσης επιλογή του εύρους των ανέμων $V_{w_{cutin}}$ και $V_{w_{nom}}$. Υπολογισμός ακτίνας φτερωτής R_{turb} .

Βήμα 2ο: Υπολογισμός του εύρους των στροφών n_{cutin} και n_{nom} καθώς και του εύρους τάσεων $E_{f_{cutin}}$ και $E_{f_{nom}}$. Εύρεση του κατάλληλου αντιστροφέα.

Βήμα 3ο: Επιλογή της ονομαστικής συχνότητας f_{nom} και εύρεση του αριθμού των πόλων p και του αριθμού των πηνίων Q .

Βήμα 4ο: Επιλέγεται το είδος, το σχήμα και το πάχος του μαγνήτη που θα χρησιμοποιηθεί. Επιλέγεται ο λόγος πλάτους μαγνήτη προς πολικό βήμα a_i . Υπολογίζεται το πάχος του στάτη t_w .

Βήμα 5ο: Επιλέγεται ο λόγος εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα k_d καθώς και ο αναμενόμενος συντελεστής πλήρωσης k_f . Προσεγγιστικά υπολογίζεται το B_p . Υπολογίζονται οι συντελεστές του τυλίγματος (κεφάλαιο 2) και τέλος η εξωτερική ακτίνα και η εσωτερική ακτίνα.

Βήμα 6ο: Υπολογίζονται οι διαστάσεις των μαγνητών.

Βήμα 7ο: Υπολογίζεται ο αριθμός των σπειρών, το πάχος πλευράς πηνίου και η διάμετρος του χαλκού που θα χρησιμοποιηθεί, γνωρίζοντας το μέγιστο ρεύμα που θα περάσει από το τύλιγμα. Επίσης οι πραγματικές διαστάσεις των πηνίων.

Βήμα 8ο: Υπολογίζεται το συνολικό κόστος και το βάρος της γεννήτριας.

Σε όλη την παραπάνω διαδικασία ο σχεδιαστής πρέπει προτού ξεκινήσει να γνωρίζει:

- Τους ανέμους στους οποίους θα δουλεύει η γεννήτρια
- Το εύρος λειτουργίας του ανορθωτή
- Την ονομαστική συχνότητα
- Το βαθμό, το σχήμα και το πάχος του μαγνήτη
- Το λόγο πλάτους μαγνήτη προς πολικό βήμα
- Το λόγο εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα
- Το συντελεστή πλήρωσης των πηνίων

Στη συνέχεια θα πρέπει να καθοριστούν όλες οι μεταβλητές προκειμένου να κατασκευαστεί η γεννήτρια. Έτσι, κάποιες από τις μεταβλητές θα οριστούν αυθαίρετα, ενώ άλλες θα υποστούν τη διαδικασία της βελτιστοποίησης προκειμένου να καθοριστούν. Αυτή είναι και η θεματολογία του επόμενου κεφαλαίου.

4. Λογισμικό Προσομοίωσης

Η ύπαρξη τόσο πολλών μεταβλητών στο πρόβλημα και η πολλές τιμές που μπορούν να λάβουν αυτές καθιστούν αναγκαία τη μοντελοποίηση της προηγούμενης διαδικασίας (Κεφάλαιο 3) στον υπολογιστή. Έτσι, επιτυγχάνεται εύκολη και γρήγορη αλλαγή όλων των μεταβλητών και δίνεται η ευκαιρία να εξετασθούν πολλές διαφορετικές διατάξεις μηχανών αξονικής ροής 3 kW για σύνδεση στο δίκτυο.

4.1. Η διαστασιολόγηση σε Matlab-Octave

Πρόκειται για απλό λογισμικό που μοιάζει πολύ με τις γλώσσες Pascal και C, γλώσσες που γνωρίζει ο σύγχρονος μηχανικός. Το συγκεκριμένο λογισμικό χρησιμοποιείται όμως περισσότερο λόγω των πολλών έτοιμων συναρτήσεων και toolboxes που περιλαμβάνει, κάνοντας εργασίες όπως η λύση πολυωνύμων, η εξαγωγή εξισώσεων ή ο μετασχηματισμός Fourier να φαίνονται απλές.

Έτσι, όλη 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 που θα εξετάζει την επιρροή όλων των μεταβλητών στο πρόβλημα.

4.2. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

4.2.1. Το λογισμικό FEMM

Η διαδικασία της διαστασιολόγησης δεν αρκεί για να ξεκινήσει η κατασκευή της γεννήτριας. Πρέπει προηγουμένως η γεννήτρια να προσομοιωθεί 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 θα χρησιμοποιηθεί 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:

$$A = \nabla \times B$$

και από το θεώρημα Stokes βρίσκεται η μαγνητική ροή Φ :

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

4.2.2. Σχεδίαση της γεννήτριας

Η διάταξη της γεννήτριας μπορεί να σχεδιαστεί 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 (π.χ. 20 πόλοι στην περίπτωση μας). Η εργασία μπορεί να μειωθεί αναλύοντας 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 ως 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.

Στη διαδικασία της διαστασιολόγησης (και στο αντίστοιχο πρόγραμμα) βρίσκονται όλες οι διαστάσεις και στις τρεις ακτίνες (μέση, εσωτερική και εξωτερική) και έτσι η ανάλυση για όλα τα μεγέθη θα γίνεται και στις τρεις αυτές τομές και θα λαμβάνεται ο μέσος όρος ως τελικό αποτέλεσμα. Το μειονέκτημα του FEMM είναι η στατικότητα του. Δεν 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. Ό,τι 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.

4.2.3. Η μετακίνηση του δρομέα

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η ανάλυση του FEMM είναι στατική. Με λίγα λόγια δεν υπάρχει άμεσος τρόπος για να αντιληφθεί το πρόγραμμα 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 να γνωρίζει ο σχεδιαστής αν μπορεί να προχωρήσει στην κατασκευή.

Το Matlab επεμβαίνει και στο σημείο αυτό προκειμένου να μετακινηθεί ο δρομέας. Η διαδικασία είναι αρκετά χρονοβόρα και ο κώδικας έχει μεγάλο όγκο. Η λογική πάντως είναι η εξής: Επιλέγεται το βήμα μετακίνησης (συνήθως 1 μηχανική μοίρα ή και λιγότερο ανάλογα με την ακρίβεια που επιζητείται). Στη συνέχεια η μετακίνηση γίνεται διαγράφοντας το πλάτος της διάταξης που αντιστοιχεί σε ένα βήμα από τη μία πλευρά και σχεδιάζοντάς το 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 (ακρίβεια, υλικά, ρεύμα κ.α.) επιθυμεί ο σχεδιαστής.

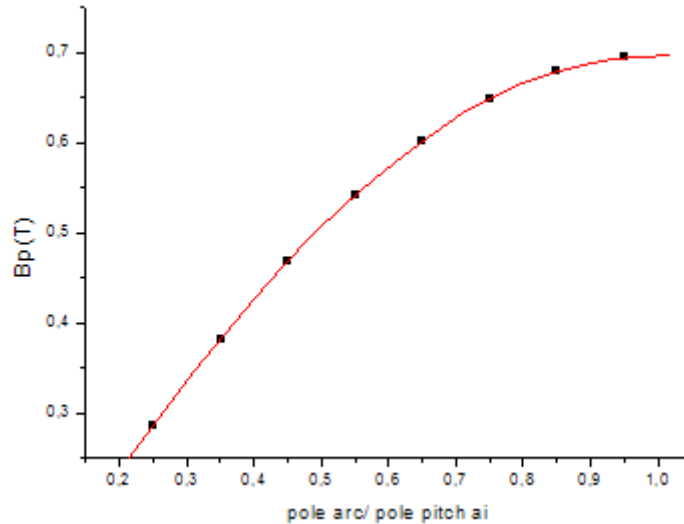
4.3. Επαλήθευση της διαστασιολόγησης

Τώρα υπάρχει η δυνατότητα να προσομοιωθεί η διάταξη που υπολογίστηκε στο Κεφάλαιο 3 και έτσι να επαληθευθούν -ή όχι- οι θεωρητικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται εκεί ή ακόμα και να εξαχθούν νέες που θα δίνουν μεγαλύτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς.

4.3.1. Ο υπολογισμός της πρώτης αρμονικής της πυκνότητας μαγνητικής ροής

Σε πολλά σημεία της διαστασιολόγησης απαιτείται η γνώση της πρώτης αρμονικής της πυκνότητας μαγνητικής ροής B_p στο διάκενο. Έχει αναφερθεί ήδη ότι θεωρητική σχέση για τον υπολογισμό του μεγέθους αυτού δεν έχει βρεθεί, αλλά ότι εξαρτάται μόνο από τη γεωμετρία της διάταξης και δη από το λόγο πλάτους μαγνήτη προς πλάτος πολικού βήματος α_i .

Με χρήση του λογισμικού που αναφέραμε και δημιουργήθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής σχεδιάζονται διατάξεις με $\alpha_i=0.2-0.95$ με βήμα 0.05 και για κάθε διάταξη μετράται το B_p με τον εξής τρόπο: Το FEMM υπολογίζει τη γραφική παράσταση του B για μήκος μισού πολικού βήματος (ένας μαγνήτης), και τυπώνει τα δεδομένα εξόδου θέση-πεδίο σε ένα αρχείο. Ύστερα, το αρχείο αυτό εισάγεται σε ειδικό λογισμικό γραμμένο σε Fortran που εκτελεί μετασχηματισμό Fourier. Εναλλακτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν έτοιμες συναρτήσεις του Matlab που επιτρέπουν και την αυτοματοποίηση της διαδικασίας. Για κάθε α_i υπολογίζεται η πρώτη αρμονική B_p , γίνεται η γραφική παράσταση $B_p-\alpha_i$ και η καμπύλη προσεγγίζεται από το λογισμικό Matlab με ένα πολυώνυμο 4ου βαθμού:



Σχήμα 4.1: Η σχέση της πρώτης αρμονικής της πυκνότητας μαγνητικής ροής με τον λόγο πλάτους πολικού μαγνήτη προς πλάτος πολικού βήματος

$$B_p = 0.17424a_i^4 - 0.58283a_i^3 - 0.03027a_i^2 + 1.21747a_i - 0.00473$$

Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι ένας υπολογισμός που θα περιελάμβανε και άλλες μεταβλητές, όπως π.χ. το πάχος του μαγνήτη ή ο λόγος εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα θα έδινε πολύ καλύτερα αποτελέσματα και θα επέτρεπε την εξαγωγή πολλών συμπερασμάτων για το πως επιδρά η γεωμετρία στο τελικό αποτέλεσμα.

4.3.2. Το πάχος του στάτη

Στο κεφάλαιο 2 έχει δοθεί μια έκφραση για το πάχος του στάτη t_w :

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

Η σχέση αυτή έχει προκύψει από ανάλυση του μαγνητικού κυκλώματος της γεννήτριας και με αρκετές απλοποιήσεις. Αποτέλεσμα είναι ότι με την εφαρμογή της τα μαγνητικά πεδία δεν είναι όπως αναμενότουσαν. Πιο συγκεκριμένα $B_{mg} \neq 0.62 \text{ T}$. Αυτό σημαίνει ότι η σχέση δεν είναι ακριβώς σωστή και θέλει κάποια διόρθωση.

Με τη βοήθεια του υπολογιστή μπορούν να γίνουν αρκετές δοκιμές και να διορθωθεί αυτή η σχέση ώστε να ισχύει πάντα. Έτσι, για πάχος μαγνήτη από 8-10mm η σχέση διορθώνεται ώστε να δίνει πιο ακριβή αποτελέσματα ($B_{mg}=0.62\text{T}$):

$$t_w = \frac{2}{B_{max}} \left\{ \frac{h_m}{\mu_{rrec}} (B_r - B_{mg}) - B_{mg} g \right\} + 0.5 \quad (4.1)$$

4.4. Οι επιδόσεις της γεννήτριας

Αφού έχει μελετηθεί το μαγνητοστατικό πρόβλημα μπορούν πλέον να βρεθούν και οι επιδόσεις της γεννήτριας ώστε να επαληθευθεί πλήρως η θεωρία που χρησιμοποιήθηκε για τη διαστασιολόγησή της. Η διαδικασία έχει ως εξής:

Χρησιμοποιείται το πρόγραμμα μετακίνησης του δρομέα και για κάθε μετακίνηση λαμβάνεται μέσω του FEMM απευθείας μέτρηση της πεπλεγμένης ροής για καθεμία από τις τρεις φάσεις του τυλίγματος σε κατάσταση ανοιχτοκύκλωσης ($I=0$). Το πεδίο που δημιουργεί ο στάτης καθώς διαρρέεται από ρεύμα είναι πολύ μικρό (απουσία πυρήνα) και για αυτό υπολογίζουμε την RMS τιμή της πεπλεγμένης ροής σε κατάσταση ανοιχτοκύκλωσης και μόνο.

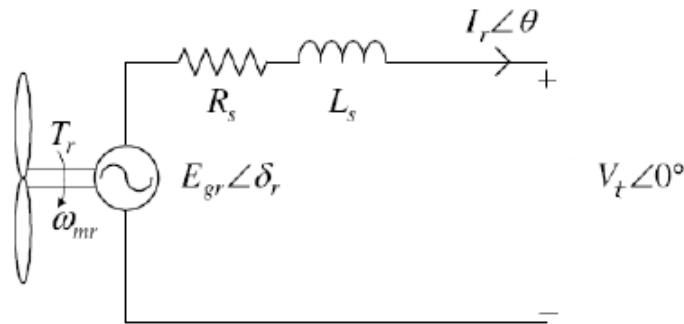
Δίνονται σαν είσοδοι από το χρήστη το ρεύμα και οι στροφές που λαμβάνουν τιμές μέχρι λίγο μεγαλύτερες από τις ονομαστικές τους. Γνωρίζοντας τις στροφές εύκολα υπολογίζουμε τη συχνότητα και την τάση:

$$f = \frac{np}{120} \quad (4.2)$$

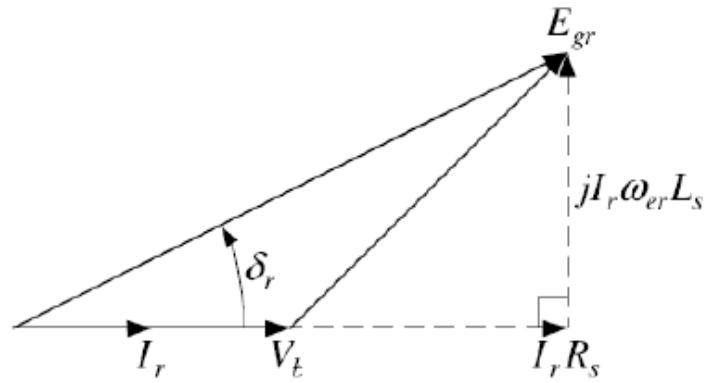
$$E_f = qFluxoc \frac{p}{2} \frac{2\pi n}{60} \quad (4.3)$$

όπου n οι στροφές και Fluxoc η RMS τιμή της πεπλεγμένης ροής σε κατάσταση ανοιχτοκύκλωσης. Η ΗΕΔ σε αυτό το σημείο υπολογίζεται κατά μέτρο και η γραφική της απεικόνιση δεν είναι δυνατή, καθώς δεν υπάρχει κάποια συνάρτηση της πεπλεγμένης ροής για να γίνει παραγωγή της και να προκύψει η ΗΕΔ. Έτσι επιστρατεύεται ο ορισμός της παραγωγού (στοιχειώδεις διαφορές) για την απεικόνισή της. Πρέπει όμως για να πετύχει κάτι τέτοιο να υπάρχει αρκετά μεγάλη ακρίβεια (μικρό βήμα) στην ανάλυση.

Το ισοδύναμο κύκλωμα που χρησιμοποιείται καθώς και το αντίστοιχο διανυσματικό διάγραμμα φαίνονται παρακάτω:



(α)



(β)

Σχήμα 4.2: (α) Το ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας και (β) το αντίστοιχο διανυσματικό διάγραμμα

Αναλύοντας το παραπάνω κύκλωμα βρίσκουμε τη γωνία ισχύος δ και την τερματική τάση της γεννήτριας:

$$\delta = \sin^{-1} \left(\frac{I_{rms} 2\pi f L_s}{E_f} \right) \quad (4.4)$$

όπου I_{rms} το ρεύμα της γεννήτριας το οποίο δίνεται ως είσοδος από το χρήστη και L_s η αυτεπαγωγή του τυλίγματος όπως έχει υπολογιστεί στο κεφάλαιο 2.

$$V_t = E_f \cos \delta - I_{rms} q R_c \quad (4.5)$$

Όπου qR_c η αντίσταση μίας φάσης, υπολογισμένη και αυτή στο κεφάλαιο 2.

Έτσι υπολογίζεται η ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο:

$$P_{\eta\lambda} = 3V_t I_{rms} \quad (4.6)$$

και οι απώλειες:

$$P_{cu} = 3I_{rms}^2 q R_c$$

$$P_{eddy} = \frac{\pi l_a s c^4 B_p^2 \omega_e^2 Q N_c N_p}{32 \rho_{cu}}$$

οπότε βρίσκεται η ηλεκτρομαγνητική ισχύς και ροπή:

$$P_{H/M} = P_{\eta\lambda} + P_{cu} + P_{eddy}$$

$$T_{H/M} = \frac{P_{H/M}}{\omega} = \frac{P_{H/M} 60}{2\pi n}$$

Υπολογίζονται κατά τα γνωστά οι απώλειες περιστροφής και βρίσκεται η μηχανική ισχύς και ροπή:

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

$$P_{mech} = P_{H/M} + P_{rot}$$

$$T_{mech} = \frac{P_{mech}60}{2\pi n}$$

Τέλος υπολογίζεται η απόδοση:

$$\eta = \frac{P_{\eta\lambda}}{P_{\eta\lambda} + P_{cu} + P_{eddy} + P_{rot}} \quad (4.7)$$

Όλα τα παραπάνω γράφονται και αυτά στη γλώσσα λογισμικού Matlab. Όλοι οι κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν παρατίθενται στο παράρτημα Β. Τώρα υπάρχει δυνατότητα να σχεδιαστεί και να προσομοιωθεί οποιαδήποτε γεννήτρια αξονικής ροής αλλά και να γίνει βελτιστοποίηση της σχεδίασης. Αυτή είναι και η θεματολογία της επόμενης ενότητας.

5. Βελτιστοποίηση

Με βάση τη θεωρία και με τη βοήθεια του λογισμικού που αναπτύχθηκε παραπάνω, στο κεφάλαιο αυτό θα μελετηθεί η βελτιστοποίηση ορισμένων μεταβλητών της σχεδίασης με βάση συγκεκριμένα κριτήρια που εξυπηρετούν τους σκοπούς αυτής της εργασίας.

5.1. Εισαγωγή

Διαβάζοντας τα προηγούμενα κεφάλαια γίνεται προφανές ότι ο σχεδιαστής δεν μπορεί να αποφανθεί για κάθε μεταβλητή του προβλήματος ανεξάρτητα. Προκύπτει αντιθέτως ότι πολλές μεταβλητές λειτουργούν η μία αντίθετα προς την άλλη και ότι τα βέλτιστα που πιο συχνά συναντώνται στη βιβλιογραφία δεν είναι η μοναδική επιλογή. Έτσι, πρέπει να εξεταστεί η επίδραση των μεταβλητών αυτών (ξεχωριστά αλλά και ταυτόχρονα) στη σχεδίαση και ύστερα να επιλεγούν οι τιμές τους ανάλογα με τα κριτήρια του κάθε σχεδιαστή.

Υπάρχουν αρκετοί τρόποι να συμβεί αυτό. Ο πιο απλός τρόπος είναι η χρήση μιας μεθόδου μηδενικής τάξης κατά την οποία όλες οι μεταβλητές ενδιαφέροντος αφαιρούνται από τη σχεδίαση και μεταβάλλονται εξωτερικά μέσα σε κάποια όρια που θέτει ο σχεδιαστής. Η μέθοδος αυτή είναι η απλούστερη σε δομή αλλά και η πιο αργή, ιδιαίτερα σε περίπτωση που οι μεταβλητές προς βελτιστοποίηση είναι πολλές.

5.2. Κριτήρια και μεταβλητές

Το πρώτο πράγμα που πρέπει να καθοριστεί σε μια προσπάθεια βελτιστοποίησης της λύσης ενός προβλήματος είναι φυσικά οι μεταβλητές που πρέπει να βελτιστοποιηθούν. Η τιμή των μεταβλητών αυτών μπορεί να είναι ήδη γνωστή στο σχεδιαστή αλλά να μη γνωρίζει αν είναι βέλτιστη ή και εντελώς άγνωστη και να πρέπει με κάποιον τρόπο να αποφασίσει.

Έτσι, μεταβλητές που πολύ συχνά χρήζουν βελτιστοποίησης είναι η εξωτερική ακτίνα της γεννήτριας, ο λόγος εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα, ο λόγος πλάτους μαγνήτη προς πλάτος πολιτικού βήματος, το πάχος του μαγνήτη, το πάχος του στάτη, το πάχος του σιδήρου, ο βαθμός του μαγνήτη και η διάμετρος του χαλκού. Πιο συγκεκριμένα στο [38] όλες αυτές οι μεταβλητές εξετάζονται ταυτόχρονα για μια μηχανή αξονικής ροής υψηλών στροφών, κάτι που καθιστά έναν αποδοτικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης επιτακτική ανάγκη. Από την άλλη μεριά, στο [39] η βελτιστοποίηση γίνεται μόνο και μόνο για το μήκος διακένου, το οποίο σε αυτή τη σχεδίαση έχει ληφθεί ως δεδομένο. Φυσικά, σε κάθε περίπτωση η εφαρμογή αλλάζει αλλά αυτό επηρεάζει κυρίως τα κριτήρια της βελτιστοποίησης και όχι τις μεταβλητές.

Όσον αφορά τα κριτήρια με βάση τα οποία γίνεται η βελτιστοποίηση αυτά όντως εξαρτώνται από το είδος της εφαρμογής. Άλλα είναι τα κριτήρια σχεδίασης για μια γεννήτρια μερικών MW και άλλα για μια μικρή γεννήτρια της τάξης των kW. Η χρήση επίσης μιας μηχανής ως κινητήρα (π.χ. σε ένα ηλεκτρικό όχημα) ή ως γεννήτριας (σε μια ανεμογεννήτρια) αλλάζει εντελώς τη σκοπιά με την οποία βλέπουμε τα πράγματα. Είναι λοιπόν εύκολο να αντιληφθεί κανείς την πληθώρα κριτηρίων υπό τα οποία θα μπορούσαν να βελτιστοποιηθούν κάποιες μεταβλητές. Στο [38] χρησιμοποιείται το κριτήριο της πυκνότητας ισχύος (ισχύς προς όγκο). Στο [7] αναφέρονται ως κριτήρια οι λόγοι κόστος προς ροπή και ροπή προς όγκο ενώ στο [35] τα κριτήρια είναι η ελαχιστοποίηση του μαγνητικού υλικού και η μεγιστοποίηση της απόδοσης. Μια σωρεία κριτηρίων θα μπορούσαν να αναφερθούν ανάλογα με την εφαρμογή.

Η εφαρμογή που μελετάται σε αυτήν την εργασία είναι αρκετά συγκεκριμένη. Πρόκειται για εφαρμογή χαμηλού κόστους και ευκολίας κατασκευής. Η ευκολία της κατασκευής δεν μπορεί να προσομοιωθεί φυσικά όπως το κόστος. Επιπλέον κριτήρια που μας ενδιαφέρουν είναι το συνολικό βάρος της γεννήτριας προκειμένου να υπάρχει ευκολία στη μεταφορά και τοποθέτησή της. Ταυτόχρονα θα παρακολουθείται ο όγκος μέσω της εξωτερικής ακτίνας. Να σημειωθεί εδώ ότι όσον αφορά τη μελέτη του κόστους τα αποτελέσματα αφορούν συγκεκριμένες συναρτήσεις αλλά και συγκεκριμένα κόστη όπως αυτά δόθηκαν από τις εταιρείες που εμπορεύονται κάθε υλικό.

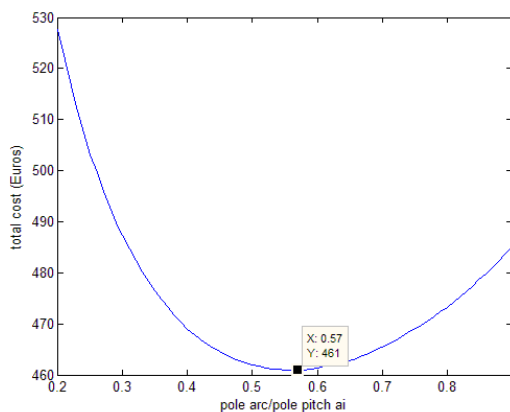
Οι μεταβλητές που θα βελτιστοποιηθούν είναι το πλάτος μαγνήτη προς πλάτος πολικού βήματος α_i και ο λόγος εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα k_d . Η επίδραση μεταβλητών όπως η συχνότητα και το σχήμα του μαγνήτη επίσης θα διερευνηθεί. Οι μεταβλητές όμως αυτές θα λάβουν συγκεκριμένες διακριτές τιμές (π.χ. 40 Hz ή 50 Hz για τη συχνότητα και ορθογώνιος ή τραπεζοειδής για το σχήμα του μαγνήτη) για να διατηρηθεί η απλότητα της διαδικασίας.

Κάθε μεταβλητή έχει ένα πεδίο ορισμού. Τα πεδία ορισμού για την εργασία αυτή έχουν προκύψει μετά από βιβλιογραφική μελέτη για τις πιο συχνά εμφανιζόμενες τιμές των μεταβλητών. Έτσι εξετάζεται ο λόγος πλάτους μαγνήτη προς πλάτος πολικού βήματος για τιμές από 0.2 έως 0.9 και ο λόγος εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα για τιμές από 0.5-0.9.

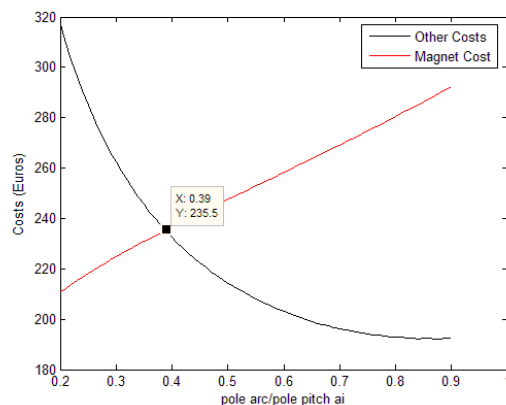
5.3. Η απομονωμένη επίδραση των μεταβλητών

5.3.1. Το πλάτος μαγνήτη προς πλάτος πολικού βήματος

Πριν από τη διαδικασία της βελτιστοποίησης θα καταγραφεί αναλυτικότερα η επίδραση του α_i στη σχεδίαση της γεννήτριας, και πιο συγκεκριμένα στα μεγέθη του κόστους, της μάζας, του όγκου και της απόδοσης. Όλες οι υπόλοιπες μεταβλητές διατηρούνται σταθερές για να φανεί αυτόνομα η επίδραση αυτή.



(α)

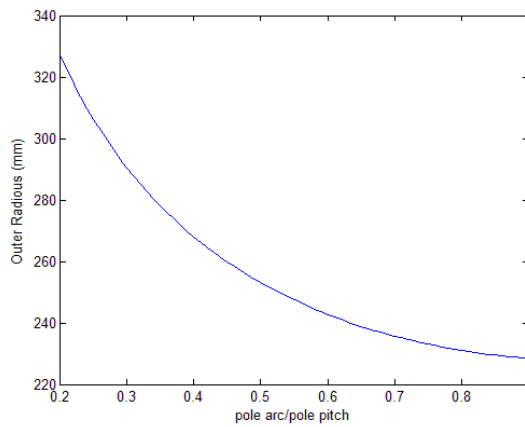


(β)

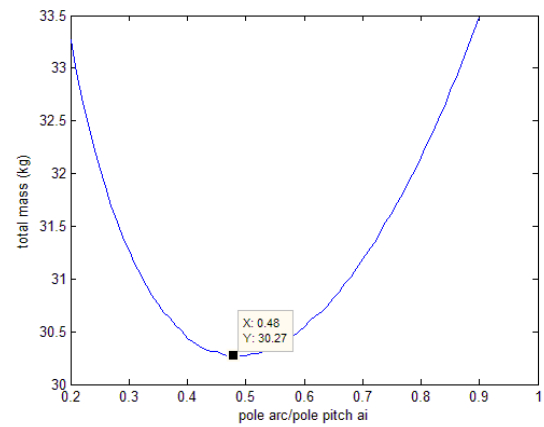
Σχήμα 5.1: Η επίδραση του λόγου πλάτους μαγνήτη προς πλάτος πολικού βήματος (α) στο συνολικό κόστος και (β) στο κόστος των επιμέρους υλικών.

Στα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται ότι το κόστος της γεννήτριας δε διατηρεί μια συγκεκριμένη συμπεριφορά ως προς το πλάτος μαγνήτη προς πολικό βήμα. Λαμβάνει πάντως ελάχιστο και αυτό έχει σημασία για εφαρμογές χαμηλού κόστους. Η μορφή της γραφικής παράστασης του κόστους εξηγείται πάντως από τη σύγκριση του κόστους των μαγνητών με το κόστος των υπόλοιπων υλικών (χαλκός, σίδηρος, ξύλο, ρητίνη). Πριν από το σημείο τομής το κόστος των άλλων υλικών μειώνεται γρηγορότερα από ό,τι αυξάνεται το κόστος των μαγνητών. Μετά το σημείο τομής συμβαίνει το ακριβώς αντίθετο. Έτσι προκύπτει ελάχιστο.

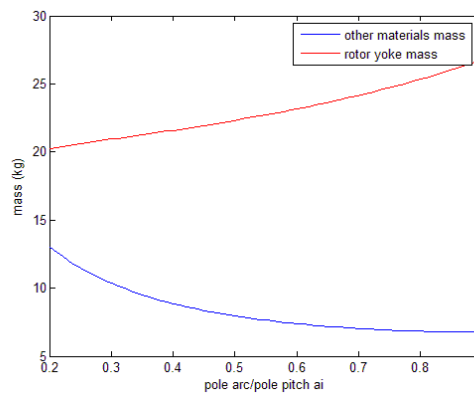
Στα παρακάτω διαγράμματα προκύπτει ότι αύξηση του a_i οδηγεί σε μείωση της εξωτερικής ακτίνας, αποτέλεσμα λογικό, αν σκεφτεί κανείς ότι μεγαλώνοντας το λόγο αυτό, αυξάνεται το μαγνητικό υλικό, άρα πρέπει να μειωθεί ο όγκος της γεννήτριας προκειμένου να διατηρηθεί η ισχύς σταθερή. Όσον αφορά τη μάζα το αποτέλεσμα ερμηνεύεται από το σχήμα 5.2(γ) όπου φαίνεται πως από ένα σημείο και μετά το βάρος του σιδήρου του δρομέα το οποίο γενικά αυξάνεται γίνεται πολύ μεγαλύτερο από το βάρος όλων των υπολοίπων που μειώνεται. Η αύξηση του βάρους του δρομέα μπορεί να ερμηνευτεί με τη βοήθεια της σχέσης 3.39 για την ελκτική δύναμη. Αυξάνοντας το a_i , αυξάνεται η επιφάνεια των μαγνητών, και άρα οι ελκτικές δυνάμεις, οπότε χρειάζεται σίδηρος μεγαλύτερου πάχους άρα και βάρους για τη μηχανική αντοχή των δίσκων.



(α)

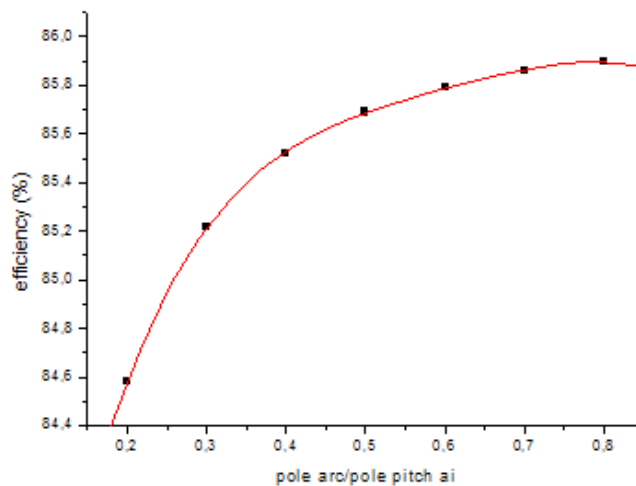


(β)



(γ)

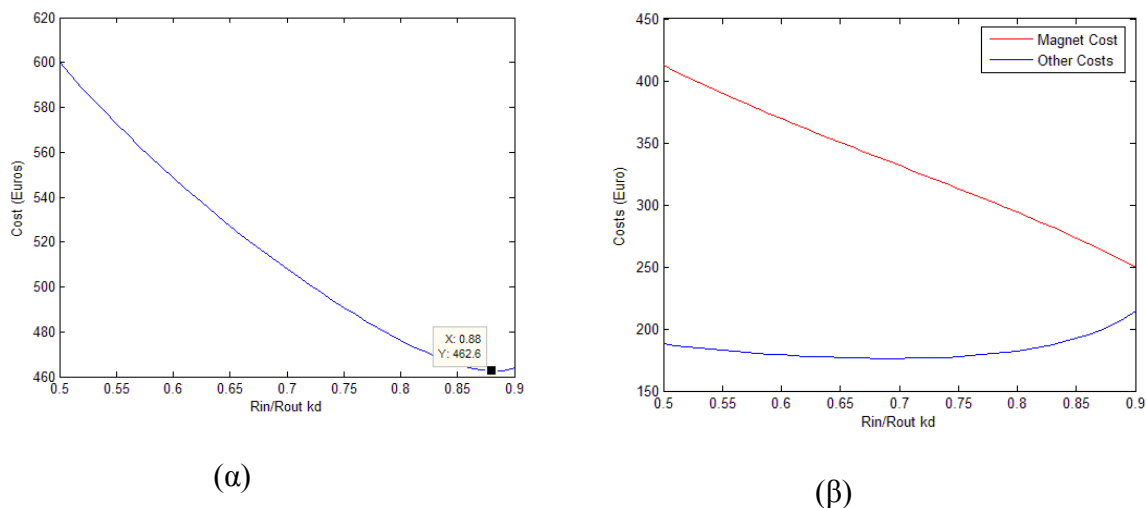
Σχήμα 5.2: Η επίδραση του a_i (α) στην εξωτερική ακτίνα, (β) στο συνολικό βάρος και (γ) στα επιμέρους βάρη.



Σχήμα 5.3: Η επίδραση του a_i στην απόδοση της γεννήτριας.

5.3.2. Ο λόγος εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα

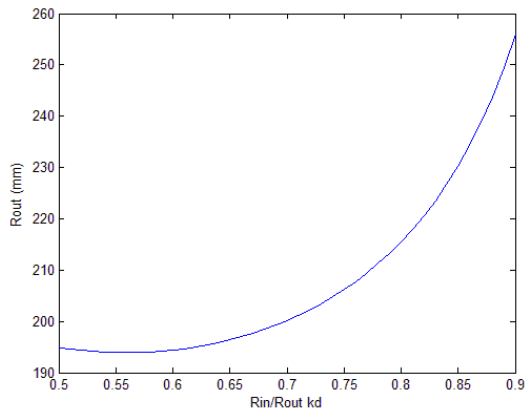
Η ίδια διαδικασία θα ακολουθηθεί για τη μελέτη του λόγου εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα k_d . Παρακάτω φαίνεται η επίδραση του λόγου αυτού στο κόστος.



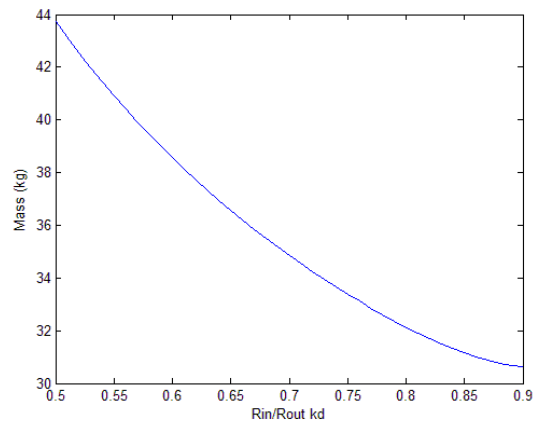
Σχήμα 5.4: Η επίδραση του λόγου k_d (α) στο συνολικό κόστος και (β) στα επιμέρους κόστη.

Το συνολικό κόστος μειώνεται μέχρι που λαμβάνει μια ελάχιστη τιμή κοντά στα όριο του πεδίου ορισμού του k_d . Η μείωση του κόστους οφείλεται στη ραγδαία μείωση του κόστους των μαγνητών, καθώς αυξάνοντας το k_d μειώνεται έντονα το ενεργό μήκος της γεννήτριας και άρα και το μήκος l_a του μαγνήτη.

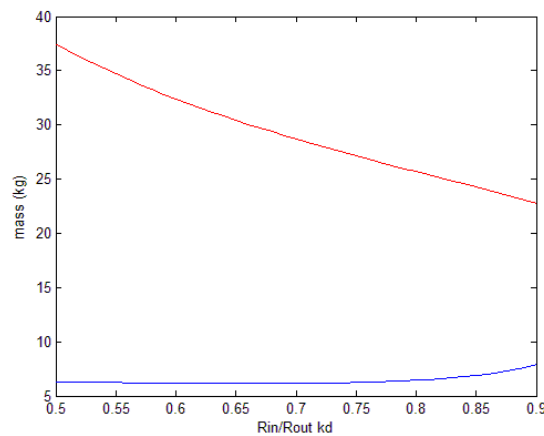
Η μεταβολή της μάζας και του όγκου φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα. Ο όγκος αυξάνεται καθώς με τη μείωση του ενεργού μήκους πρέπει να αυξηθεί η ακτίνα για να διατηρηθεί η ισχύς. Στο σχήμα 5.5 (β) φαίνεται η μείωση της μάζας αυξανόμενου του λόγου k_d ενώ στο σχήμα 5.5 (γ) φαίνεται η κυριαρχία του βάρους του σιδήρου του δρομέα στο συνολικό βάρος της γεννήτριας. Αντίθετα με πριν, αύξηση του λόγου αυτού οδηγεί σε μείωση της ενεργού επιφάνειας των μαγνητών και άρα σε μείωση των ελκτικών δυνάμεων και του πάχους του σιδήρου.



(α)



(β)

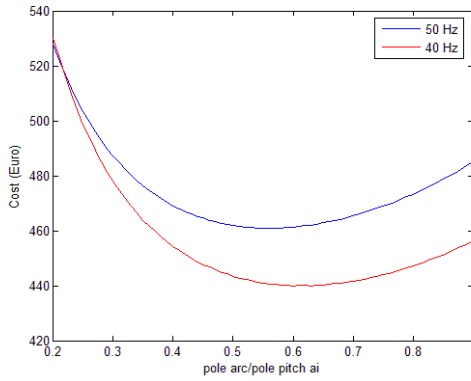


(γ)

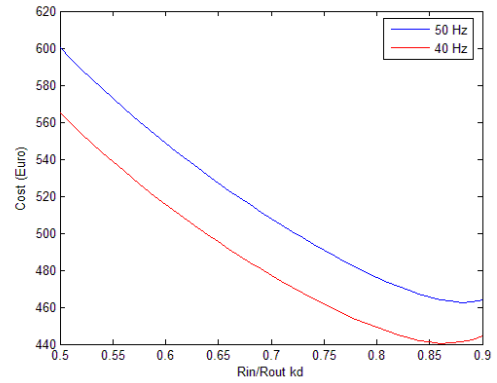
Σχήμα 5.5: Η επίδραση του k_d (α) στην εξωτερική ακτίνα, (β) στο συνολικό βάρος και (γ) στα επιμέρους βάρη.

5.3.3. Η επίδραση της συχνότητας

Αλλάζοντας την ονομαστική συχνότητα αλλάζει ο αριθμός των πόλων και άρα ο αριθμός των μαγνητών και έτσι η επίδραση είναι κυρίως εμφανής στο κόστος. Μείωση της συχνότητας οδηγεί σε μείωση του κόστους κατά τον αριθμό των μαγνητών που αφαιρούνται από τη διάταξη. Ακολουθούν τα διαγράμματα a_i -κόστους και k_d -κόστους για συχνότητες 40 και 50 Hz:



(α)



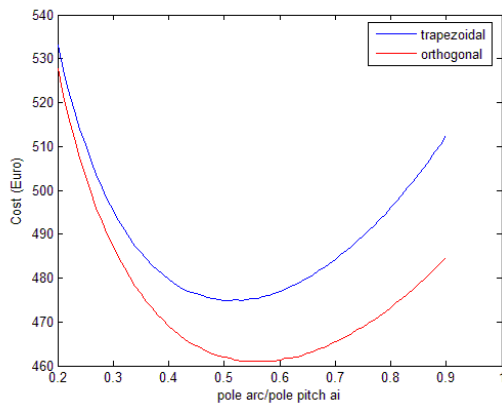
(β)

Σχήμα 5.6: Η επίδραση της συχνότητας στο κόστος της γεννήτριας (α) για μεταβαλλόμενο a_i και (β) για μεταβαλλόμενο k_d .

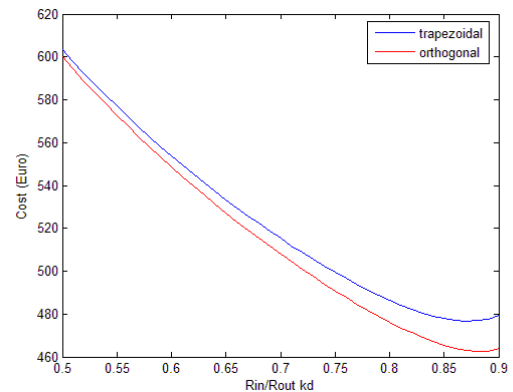
Και στις δύο περιπτώσεις η συχνότητα των 40 Hz δίνει μικρότερο κόστος, ενώ για πολύ μικρά a_i παρατηρούμε ότι το κόστος των μαγνητών υποσκελίζεται από το κόστος των άλλων υλικών καθώς η γεννήτρια έχει πλέον πολύ μεγάλο όγκο και μάζα οπότε και παρατηρούμε ότι υπάρχει σημείο τομής μεταξύ των καμπυλών.

5.3.4. Η επίδραση του σχήματος του μαγνήτη

Τέλος παρατίθενται αντίστοιχες καμπύλες που αφορούν το σχήμα του μαγνήτη. Το αναμενόμενο αποτέλεσμα είναι το κόστος του ορθογώνιου μαγνήτη να είναι πάντα μικρότερο από αυτό του τραπέζιου. Αυτό ακριβώς επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα του υπολογιστή:



(α)



(β)

Σχήμα 5.7: Η επίδραση του σχήματος του μαγνήτη στο κόστος της γεννήτριας καθώς μεταβάλλεται (α) το a_i και (β) το k_d .

5.4. Η μέθοδος της βελτιστοποίησης

Σκοπός της βελτιστοποίησης είναι η εύρεση των βέλτιστων τιμών του a_i και k_d για τις εξής περιπτώσεις:

- Ονομαστική συχνότητα 40 Hz, μαγνήτες ορθογώνιοι
- Ονομαστική συχνότητα 40 Hz, μαγνήτες τραπεζοειδείς

Η συχνότητα των 50 Hz δεν εξετάζεται για την ώρα καθώς φαίνεται ότι οι διάφορες πιθανές διατάξεις θα είναι πάντα πιο ακριβές από τις αντίστοιχες των 40 Hz. Φυσικά πρέπει να έχει κανείς στο μυαλό του ότι οι λιγότεροι πόλοι μειώνουν και τις επιδόσεις της γεννήτριας και έτσι η αύξηση της συχνότητας μπορεί μετέπειτα να αποδειχθεί αναγκαία.

Αλλάζοντας λοιπόν τις τιμές των δύο λόγων θα παρακολουθούμε την αλλαγή του κόστους, του βάρους και του όγκου ενώ τα κριτήρια που θα χρησιμοποιηθούν θα είναι αυτό της ελαχιστοποίησης του κόστους. Τελικά θα προκύψουν 4 τελικές διατάξεις που θα συγκριθούν για να προκριθεί μία τελική.

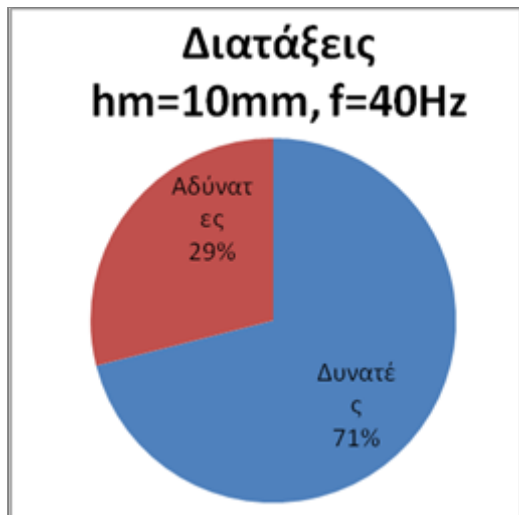
5.4.1. Τεχνικοί περιορισμοί

Ο βασικότερος τεχνικός περιορισμός αφορά στην κατασκευή των πηνίων. Τα πηνία τυλίγονται με το χέρι σε μηχανήμα που επίσης κατασκευάζεται με το χέρι. Αυτό δημιουργεί ορισμένους περιορισμούς στο σχήμα πηνίου που μπορεί να παραχθεί. Πιο συγκεκριμένα, τα πηνία δεν μπορεί να είναι πολύ λεπτά σε σχέση με το μήκος του. Ή αλλιώς δεν μπορεί να είναι πολύ «πλακέ» γιατί τότε δεν μπορούν να βγουν από το μηχανήμα και να διατηρήσουν το σχήμα τους. Ο περιορισμός αυτός εκφράζεται μέσω του λόγου αξονικό ύψος πηνίου προς πάχος πλευράς πηνίου t_w/w_c . Μελετώντας γεννήτριες τα πηνία των οποίων κατασκευάζονται με τον ίδιο τρόπο προέκυψε ο εξής περιορισμός:

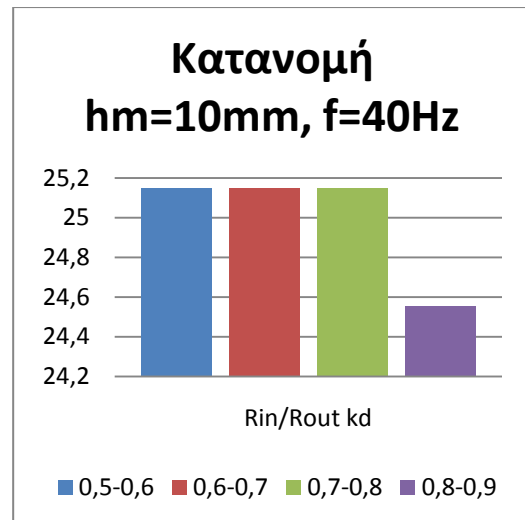
$$\frac{t_w}{w_c} > 0.4$$

Το αξονικό ύψος του πηνίου παραμένει σταθερό δεδομένου του πάχους του μαγνήτη, ενώ το πάχος πλευράς πηνίου μεταβάλλεται καθώς αλλάζουν οι μεταβλητές της προσομοίωσης. Έτσι, ο συγκεκριμένος περιορισμός πρέπει να εξετάζεται πάντα.

Η σημαντικότητα του περιορισμού αυτού φαίνεται στα παρακάτω γραφήματα, όπου εξετάζοντας όλο το πεδίο ορισμού των a_i και k_d υπολογίζεται ο αριθμός εκείνων των πηνίων (και άρα γεννητριών) που είναι κατασκευάσιμα καθώς και η κατανομή των πραγματοποιήσιμων μηχανών στο πεδίο του k_d .



(α)

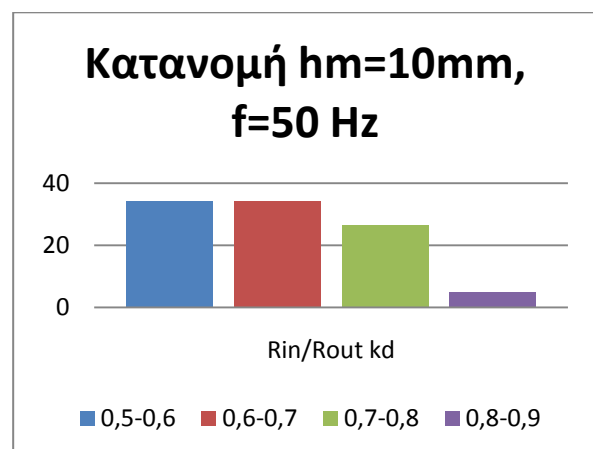
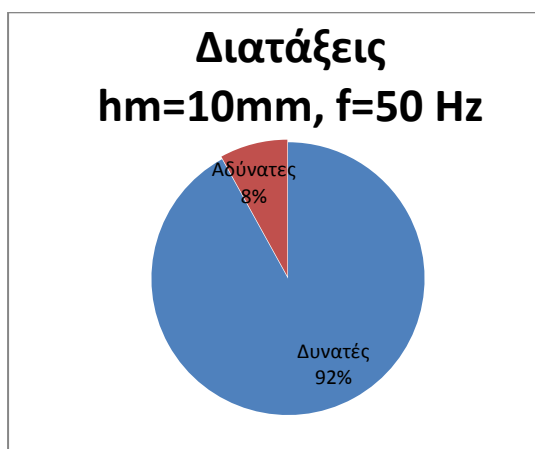


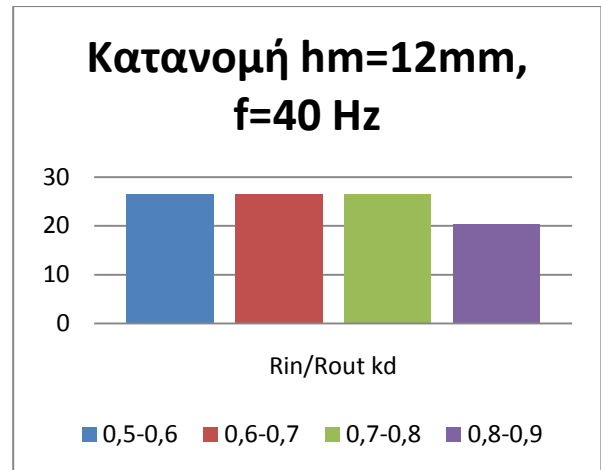
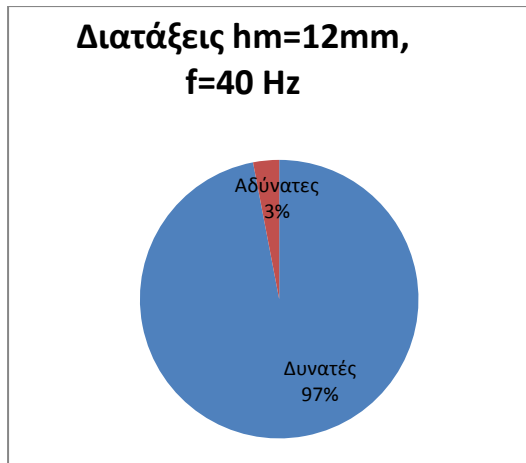
(β)

Σχήμα 5.8: Πάχος μαγνήτη 10 mm και συχνότητα 40 Hz: (α) οι δυνατές και αδύνατες διατάξεις και (β) η κατανομή τους όσον αφορά το k_d .

Το πρόβλημα λύνεται κατά πολύ αυξάνοντας τη συχνότητα στα 50 Hz καθώς πλέον το 90% περίπου του πεδίου ορισμού δίνει δυνατά αποτελέσματα. Ταυτόχρονα εξετάζουμε πώς κατανέμονται οι δυνατές διατάξεις στο πεδίο του k_d καθώς γνωρίζουμε ότι μάλλον για χαμηλό βάρος και κόστος θα καταλήξουμε τελικά σε υψηλές τιμές του.

Ο περιορισμός αίρεται διά παντός αυξάνοντας το πάχος του μαγνήτη στα 12 mm. Τότε ένα ποσοστό γύρω στο 97% του πεδίου ορισμού οδηγεί σε πραγματοποιήσιμες διατάξεις, ενώ αυξάνοντας ταυτόχρονα και τη συχνότητα στα 50 Hz το πρόβλημα λύνεται εντελώς. Πάντως η κάθε αλλαγή σε συχνότητα και πάχος μαγνήτη ακολουθείται από μια αύξηση στο συνολικό κόστος της γεννήτριας, κάτι που πρέπει να ληφθεί υπόψη σε περίπτωση που θέλουμε να άρουμε τον περιορισμό αυτόν.

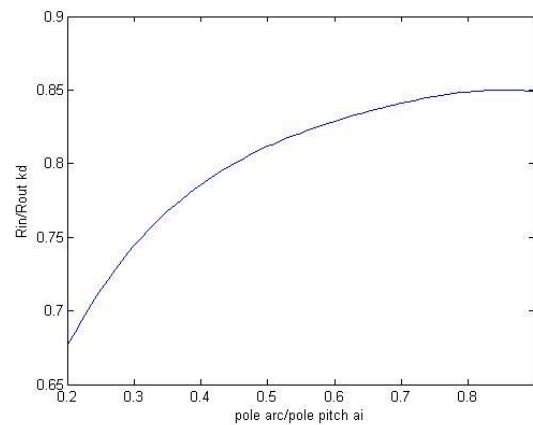
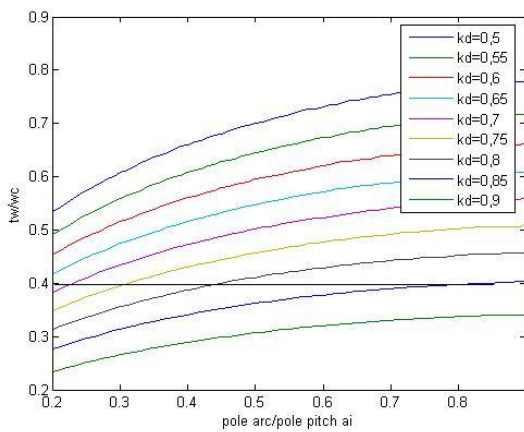




Σχήμα 5.9: Οι αδύνατες και δυνατές διατάξεις καθώς και η κατανομή τους για πάχος 10 και 12 mm και συχνότητες 50 και 40 Hz αντίστοιχα.

Στη συνέχεια θα βρεθεί ο λόγος που εκφράζει τον περιορισμό σε σχέση με τις μεταβλητές της βελτιστοποίησης για τραπεζοειδή μαγνήτη πάχους 10mm στη συχνότητα των 40 Hz. Στη συνέχεια βρίσκονται όλα τα ζεύγη (α_i, k_d) για τα οποία $t_w/w_c = 0,4$ και εξάγεται έτσι η καμπύλη του περιορισμού $k_d=f(\alpha_i)$.

-Τραπεζοειδής Μαγνήτης:



Σχήμα 5.10: Τραπεζοειδής μαγνήτης: (α) Οι τιμές του περιορισμού για διάφορα α_i και k_d και (β) η τελική καμπύλη του περιορισμού.

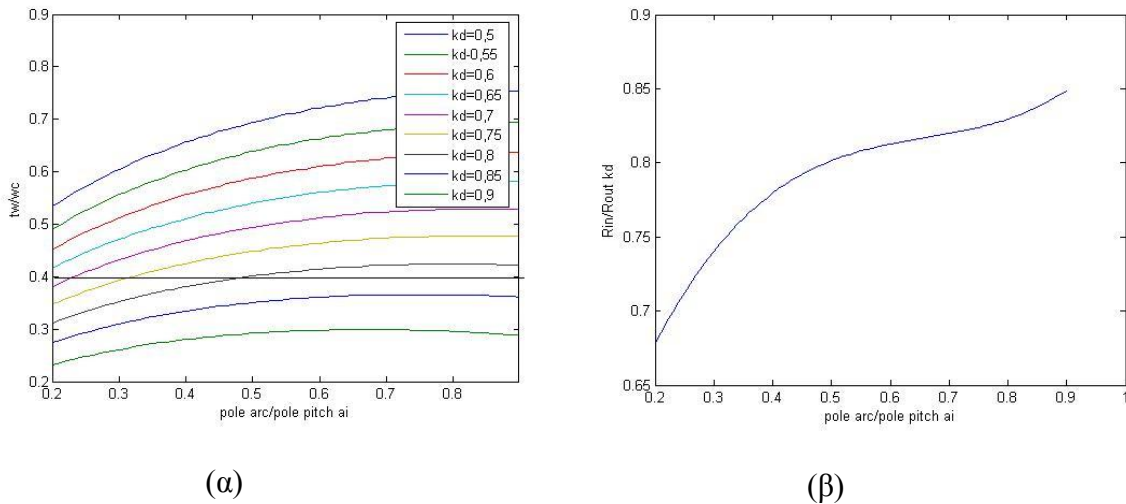
$$k_d = -1,37919a_i^4 + 3,650273a_i^3 - 3,82297a_i^2 + 1,98033a_i + 0,40715$$

Προκειμένου να προκύψει μια σχετικά ακριβής εξίσωση για τον περιορισμό πρέπει να ληφθούν αρκετά ζεύγη τιμών. Στο σχήμα 5.10 φαίνονται μόνο λίγες από αυτές χάριν απλότητας.

-Ορθογώνιος Μαγνήτης:

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για τους ορθογώνιους μαγνήτες πάχους 10 mm και για συχνότητα και πάλι 40 Hz:

$$k_d = 0,079a_i^4 + 0,92202a_i^3 - 2,03763a_i^2 + 1,46171a_i + 0,45978$$



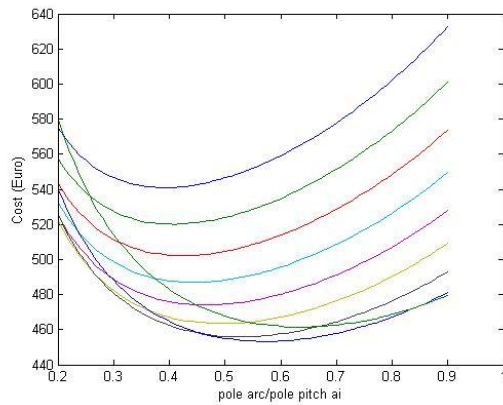
Σχήμα 5.11: Ορθογώνιος μαγνήτης: (α) Οι τιμές του περιορισμού για διάφορα a_i και k_d και (β) η τελική καμπύλη του περιορισμού.

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνονται μαζί και οι δύο καμπύλες περιορισμού. Το εμβαδόν κάτω από τις καμπύλες είναι οι γεννήτριες που είναι δυνατόν να κατασκευαστούν και στο χώρο αυτό θα περιοριστεί η βελτιστοποίηση.

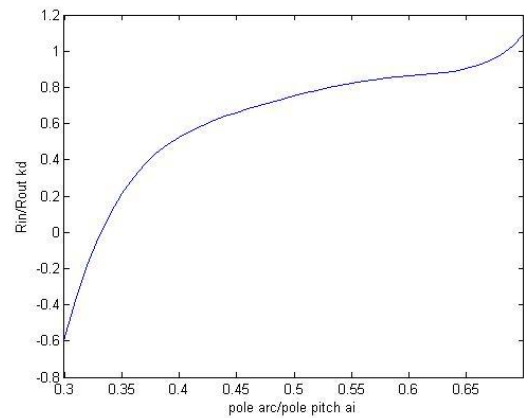
5.4.2. Η συνάρτηση ελαχίστου κόστους

Στο σημείο αυτό θα βρεθούν όλοι τα ζεύγη (a_i, k_d) για τα οποία η γεννήτρια έχει το ελάχιστο κόστος. Με λίγα λόγια, εξετάζονται όλα τα k_d και για καθένα βρίσκεται εκείνο το a_i στο οποίο το κόστος ελαχιστοποιείται. Οι καμπύλες κόστους καθώς και η συνάρτηση ελαχίστου κόστους φαίνονται παρακάτω:

Τραπεζοειδής Μαγνήτης:



(α)

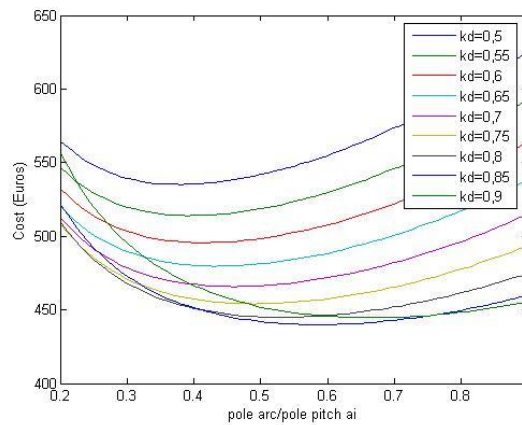


(β)

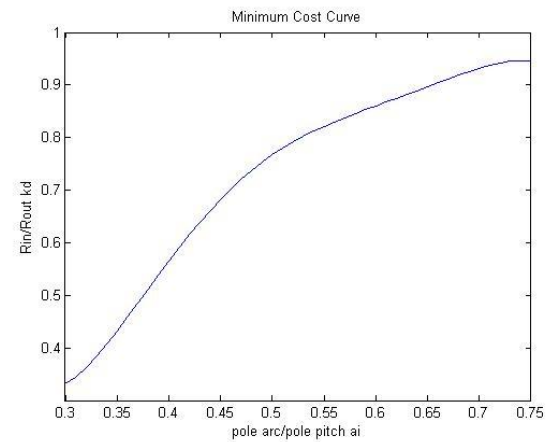
Σχήμα 5.12: Τραπεζοειδής μαγνήτης: (α) Η μεταβολή του κόστους καθώς μεταβάλλονται τα a_i και k_d και (β) η καμπύλη ελαχίστου κόστους.

$$k_d = 2016a_i^5 - 5268,9a_i^4 + 5482,1a_i^3 - 2843,3a_i^2 + 737,81a_i - 76,284$$

Ορθογώνιος Μαγνήτης:



(α)



(β)

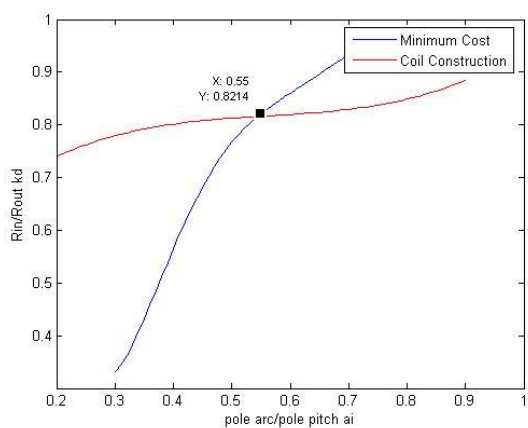
Σχήμα 5.13: Ορθογώνιος μαγνήτης: (α) Η μεταβολή του κόστους καθώς μεταβάλλονται τα a_i και k_d και (β) η καμπύλη ελαχίστου κόστους.

$$k_d = -290,29a_i^5 + 793,46a_i^4 - 845,83a_i^3 + 435,33a_i^2 - 105,62a_i + 9,9533$$

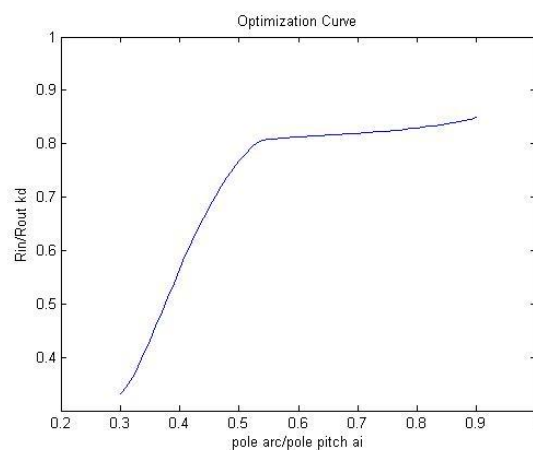
5.4.3. Βελτιστοποίηση

5.4.3.1. Χρήση ορθογώνιου μαγνήτη

Οι δύο βασικές εξισώσεις του 1ου και 2ου μέρους εισάγονται στο ίδιο διάγραμμα ώστε να προκύψει μία τελική που θα επιτρέψει στο σχεδιαστή να εξετάσει τις φθηνότερες γεννήτριες που μπορούν να κατασκευαστούν. Έτσι προκύπτει η τελική καμπύλη βελτιστοποίησης που μέχρι το σημείο τομής αποτελείται από τη συνάρτηση ελαχίστου κόστους ενώ μετά από αυτό αποτελείται από την καμπύλη του περιορισμού.



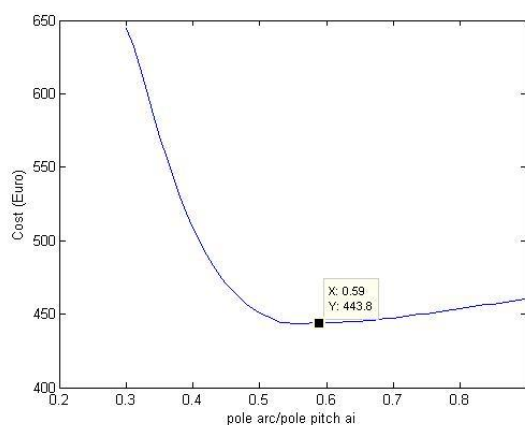
(α)



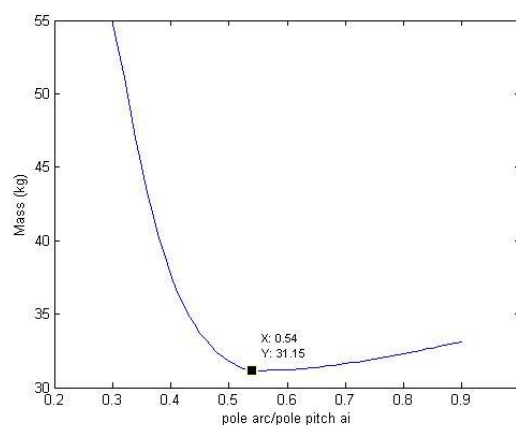
(β)

Σχήμα 5.14: Ορθογώνιος μαγνήτης: (α) Ο περιορισμός πηνίου και η καμπύλη ελαχίστου κόστους και (β) η τελική καμπύλη βελτιστοποίησης.

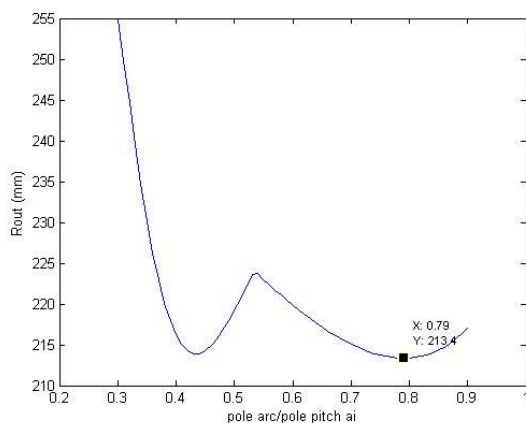
Πάνω στην καμπύλη αυτή μπορεί κανείς να υπολογίσει τώρα τα εξής μεγέθη: Το κόστος, το βάρος και τον όγκο.



(α)



(β)



(γ)

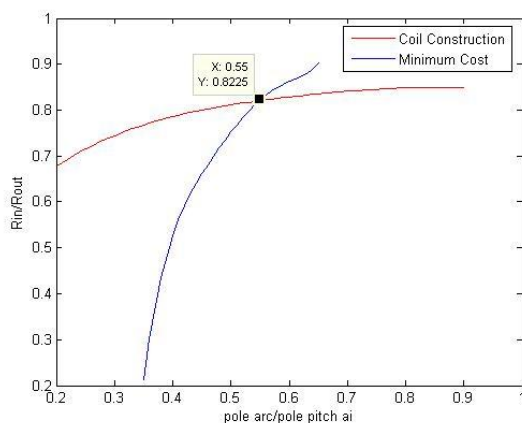
Σχήμα 5.15: Ορθογώνιος μαγνήτης: (α) το κόστος, (β) το βάρος και (γ) η εξωτερική ακτίνα σε σχέση με το a_i για σημεία της καμπύλης βελτιστοποίησης.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα τελικά αποτελέσματα για το κριτήριο του κόστους:

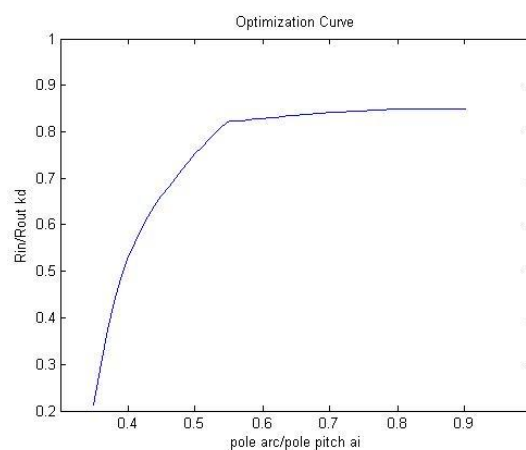
Ελάχιστο Κόστος (Ορθογώνιος Μαγνήτης)	
a_i	0,59
k_d	0,8118
Κόστος	443,8 €
Βάρος	31,19 kg
Εξωτερική Ακτίνα	220,5
Απόδοση	87,69 %

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά της βέλτιστης γεννήτριας για χρήση ορθογώνιων μαγνητών.

5.4.3.2. Χρήση τραπεζοειδούς μαγνήτη



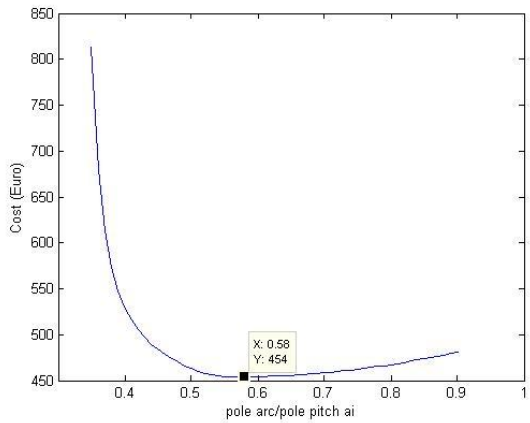
(α)



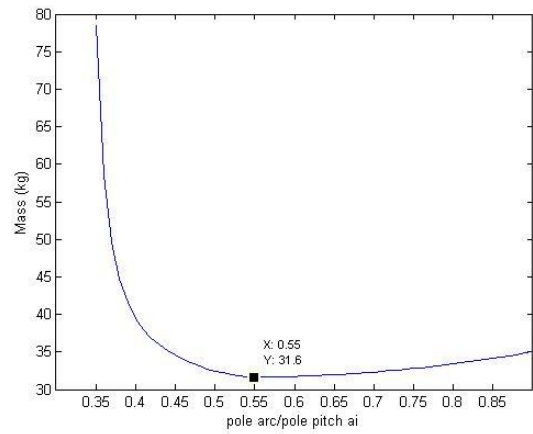
(β)

Σχήμα 5.16: Τραπεζοειδής μαγνήτης: (α) Ο περιορισμός πηνίου και η καμπύλη ελαχίστου κόστους και (β) η τελική καμπύλη βελτιστοποίησης.

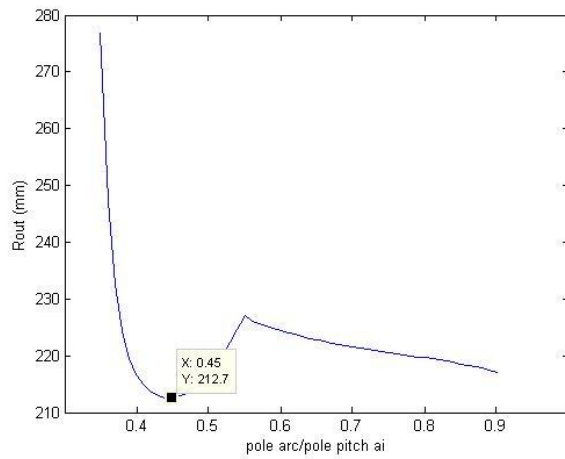
Ομοίως εξάγονται τα διαγράμματα κόστους, βάρους και όγκου:



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 5.17: Τραπεζοειδής μαγνήτης: (α) το κόστος, (β) το βάρος και (γ) η εξωτερική ακτίνα σε σχέση με το α_i για σημεία της καμπύλης βελτιστοποίησης.

Και προκύπτουν τα τελικά αποτελέσματα:

Ελάχιστο Κόστος (Τραπεζοειδής Μαγνήτης)	
α_i	0,58
k_d	0,8258
Κόστος	454 €
Βάρος	31,66 kg
Εξωτερική Ακτίνα	225,2 mm
Απόδοση	87,68 %

Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικά της βέλτιστης γεννήτριας για χρήση τραπεζοειδών μαγνητών.

5.4.3.3. Σύγκριση διατάξεων

Συγκρίνοντας τις δύο παραπάνω διατάξεις προκύπτει άμεσα ότι καλύτερη είναι αυτή με τους ορθογώνιους μαγνήτες καθώς είναι φθηνότερη και πιο μικρή. Κατά τα άλλα (βάρος, απόδοση) οι δύο γεννήτριες είναι σχεδόν όμοιες. Αλλά πέραν του προφανούς, ότι μια φθηνότερη γεννήτρια εξυπηρετεί καλύτερα τα κριτήρια της εργασίας αυτής, μια μικρότερη γεννήτρια θα είναι επίσης πιο εύκολο να κατασκευαστεί. Γι' αυτό επιλέγεται η γεννήτρια με ορθογώνιους μαγνήτες.

Αναλύοντας την επιλεγμένη διάταξη όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3 μπορούμε να καθορίσουμε όλα τα μεγέθη, βρίσκοντας έτσι τις διαστάσεις του μαγνήτη που πρέπει να χρησιμοποιηθεί: Πλάτος μαγνήτη $w_m=46,26$ mm και μήκος μαγνήτη (ενεργό μήκος) $l_a=40,01$ mm. Αν οι μαγνήτες αυτοί υπήρχαν έτοιμοι στο εμπόριο, το κόστος θα έπεφτε ακόμα περισσότερο. Κάτι τέτοιο όμως δεν συμβαίνει. Υπάρχουν όμως μαγνήτες NdFeB N40 πάχους $h_m=10$ mm, πλάτους $w_m=46$ mm και μήκους $l_a=30$ mm οι οποίοι χρησιμοποιούνται πολύ συχνά [2] και είναι αρκετά φθηνότεροι (5,3 €) από τους μαγνήτες που κατασκευάζονται κατά παραγγελία. Έτσι επιλέγονται αυτοί οι μαγνήτες και ακολουθώντας την αντίστροφη διαδικασία προκύπτει η εξής διάταξη:

Χρήση Εμπορικού Μαγνήτη ($f=40$ Hz)	
α_i	0,485
k_d	0,879
Κόστος	404,18 €
Βάρος	30,8 kg
Εξωτερική Ακτίνα	257,5 mm
Απόδοση	84,1 %

Πίνακας 5.3: Χαρακτηριστικά γεννήτριας με χρήση εμπορικού μαγνήτη για συχνότητα 40 Hz.

Η διάταξη αυτή, αν και γύρω στα 40 € φθηνότερη, έχει μικρό λόγο πλάτους μαγνήτη προς πλάτος πολικού βήματος α_i με αποτέλεσμα μια γεννήτρια με μεγάλη εξωτερική ακτίνα που θα έκανε δύσκολη την κατασκευή. Θα ήταν λοιπόν καλό να αυξηθεί ο λόγος αυτός διατηρώντας τον ίδιο εμπορικό μαγνήτη που περιορίζει το κόστος. Αυτό μπορεί να συμβεί αλλάζοντας την ονομαστική συχνότητα της γεννήτριας και ανεβάζοντάς τη στα 50 Hz. Έτσι αυξάνονται οι πόλοι της γεννήτριας με αποτέλεσμα να αυξάνεται και το α_i , αφού η ίδια περίπου ενεργός επιφάνεια θα μοιραστεί σε περισσότερους πλέον μαγνήτες. Στην περίπτωση αυτή το κόστος θα αυξηθεί αφού οι μαγνήτες θα είναι πλέον περισσότεροι.

Η νέα διάταξη είναι μόλις 6 € ακριβότερη (η αύξηση του κόστους των μαγνητών ισοσκελίστηκε από τη μείωση των λοιπών υλικών που είναι συνέπεια της μείωσης της εξωτερικής ακτίνας της γεννήτριας) ενώ έχει μικρότερη εξωτερική ακτίνα και ασφαλώς βελτιωμένο α_i , το οποίο μάλιστα είναι κοντά στο βιβλιογραφικό βέλτιστο $2/\pi$ για το οποίο η ΗΕΔ είναι ημιτονοειδής.

Χρήση Εμπορικού Μαγνήτη (f=50 Hz)	
α_i	0,659
k_d	0,869
Κόστος	410 €
Βάρος	30,9 kg
Εξωτερική Ακτίνα	238,26 mm
Απόδοση	87,99 %

Πίνακας 5.4: Χαρακτηριστικά γεννήτριας με χρήση εμπορικού μαγνήτη για συχνότητα 50 Hz.

Επιπλέον η απόδοση είναι ασφαλώς βελτιωμένη. Η παραπάνω διαδικασία αποδεικνύει ουσιαστικά ότι ο υψηλός αριθμός πόλων έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση των ποιοτικών χαρακτηριστικών της γεννήτριας [18]. Το πάχος του σιδήρου που προτείνεται εδώ είναι 8.5 mm περίπου αλλά για τη συγκεκριμένη κατασκευή και για μεγαλύτερη ασφάλεια αυξάνεται στα 10 mm με αποτέλεσμα το τελικό βάρος της γεννήτριας να ανέρχεται στα 35.48 kg. Τελικά επιλέγεται ο εμπορικός μαγνήτης και η συχνότητα των 50 Hz για την υλοποίηση της γεννήτριας.

5.4.4. Η τελική διάταξη

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια ανακεφαλαίωση των τελικών διαστάσεων της γεννήτριας πριν αυτή προσομοιωθεί στο FEMM για την εξέταση των χαρακτηριστικών της.

ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	
Ονομαστική Ισχύς	3 kW
Ονομαστική Συχνότητα	50 Hz
Αριθμός Πόλων	20
Αριθμός Πηνίων	15
Συνολικό Κόστος	410 €
Συνολικό Βάρος	35.48 kg
ΔΡΟΜΕΑΣ	
Χαλύβδινοι Δίσκοι	
Πάχος δίσκου	10 mm
Εξωτερική Ακτίνα	238.26 mm
Εσωτερική Ακτίνα	207.05 mm
Μαγνήτες	
Πάχος Μαγνήτη	10 mm
Πλάτος Μαγνήτη	46 mm
Μήκος Μαγνήτη (Ενεργό Μήκος)	30 mm
ΣΤΑΤΗΣ	
Πηνία	
Αξονικό Πάχος Πηνίου	13.76 mm
Πάχος Πλευράς	31,54 mm
Αριθμός Σπειρών	337
Διάμετρος Χαλκού	0.95 mm

Πίνακας 5.5: Τα χαρακτηριστικά της τελικής γεννήτριας.

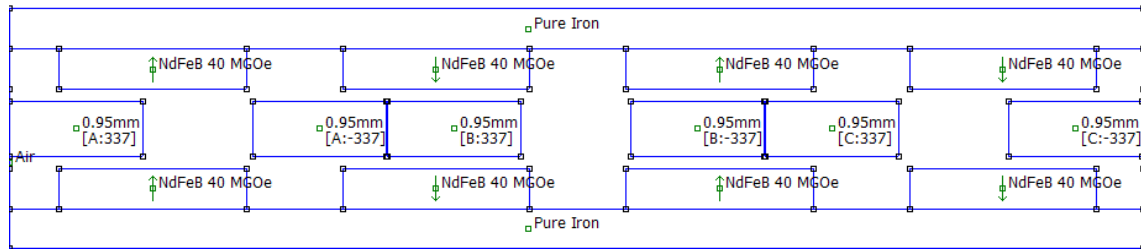
Οι παραπάνω διαστάσεις είναι οι θεωρητικές όπως προκύπτουν από τη διαστασιολόγηση και όχι αυτές που θα υλοποιηθούν τελικά. Μικρές αποκλίσεις που θα προκύψουν στη συνέχεια οφείλονται κυρίως στον τρόπο κατασκευής και στα διαθέσιμα εργαλεία.

5.5 Προσομοίωση του μαγνητικού πεδίου και επιδόσεις της γεννήτριας

Στο σημείο αυτό θα προσομοιωθεί το μαγνητικό πεδίο της γεννήτριας με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων όπως έχει περιγραφεί στο κεφάλαιο 4.

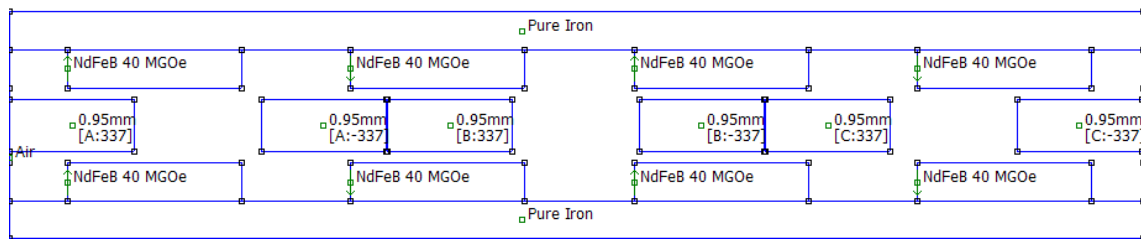
5.5.1. Το μαγνητοστατικό πρόβλημα

Όλα τα μεγέθη που υπολογίστηκαν με τη βοήθεια των σχέσεων του κεφαλαίου 3 για τη διαστασιολόγηση και με τη βελτιστοποίηση εισάγονται στο πρόγραμμα που σχεδιάζει τη γεννήτρια μέσω του λογισμικού Matlab στο λογισμικό FEMM. Έτσι προκύπτει η γεωμετρία του προβλήματος για τομή στη μέση ακτίνα R_{avg} :

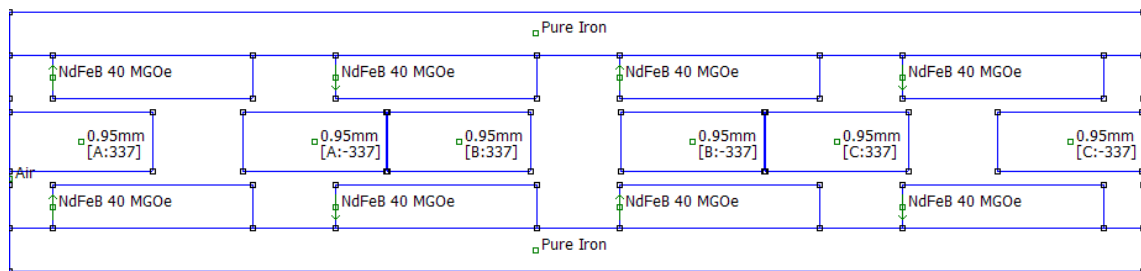


Σχήμα 5.18: Τομή της γεννήτριας στη μέση ακτίνα.

Επίσης παρουσιάζονται οι τομές στην εσωτερική και εξωτερική ακτίνα που βοηθούν στην αναλυτικότερη και ακριβέστερη μελέτη του προβλήματος:



(α)



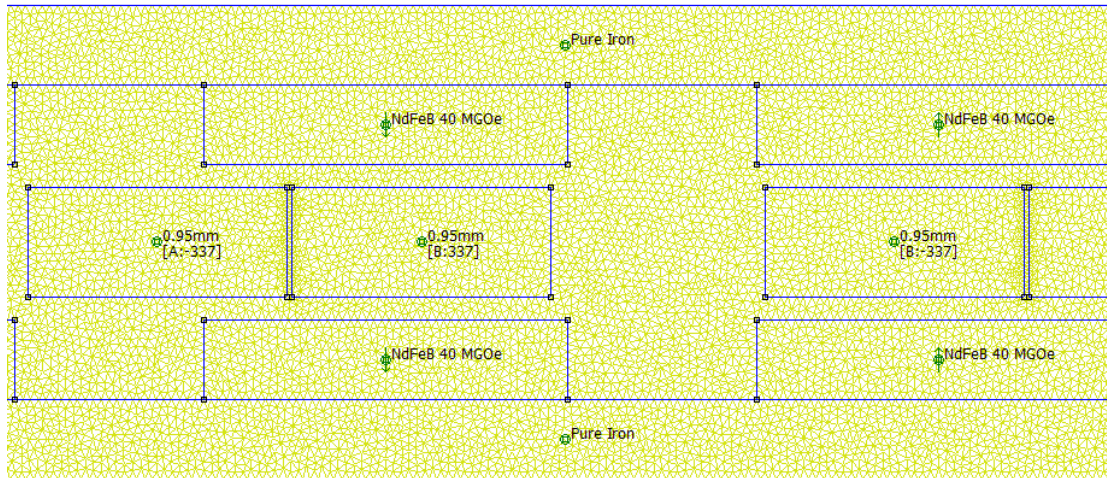
(β)

Σχήμα 5.19: (α) Τομή στην εξωτερική ακτίνα και (β) τομή στην εσωτερική ακτίνα.

Δεν αναπαρίσταται όλη η μηχανή αλλά μόνο το ένα πέμπτο αυτής για ευκολία στην υλοποίηση. Στα αριστερά και δεξιά σύνορα της διάταξης ορίζονται περιοδικές συνθήκες ενώ στα πάνω και κάτω σύνορα ορίζεται το διανυσματικό δυναμικό $A=0$.

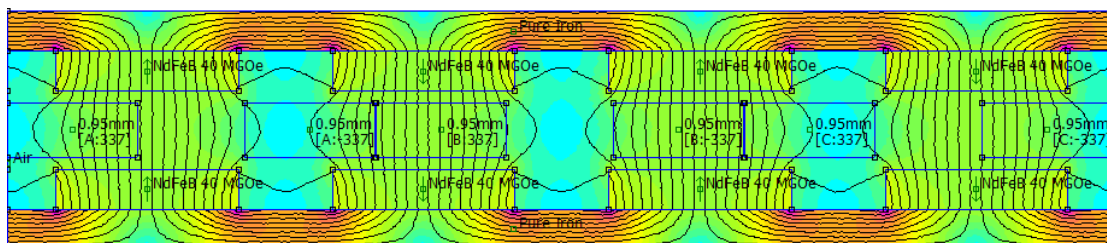
Σε κάθε περιοχή έχουν οριστεί επιπλέον τα υλικά που χρησιμοποιούνται: Μαγνήτες NdFeB N40 με προσοχή στη φορά μαγνήτισης, σίδηρος, χαλκός διαμέτρου 0,95 mm με την κατάλληλη φορά ρεύματος και αέρας. Το διάκενο επιλέγεται στα 3 mm (0.5 mm ρητίνης στην επιφάνεια των μαγνητών και 2mm μηχανικό διάκενο για ασφάλεια και 0.5 mm ρητίνης στην επιφάνεια των πηνίων). Το πρόγραμμα είναι δισδιάστατο αλλά έχει τη δυνατότητα να αντιληφθεί το βάθος της διάταξης που τίθεται ίσο με το ενεργό μήκος l_a . Επιλέγεται το μήκος του πλέγματος στο διάκενο ίσο με 1 mm σε όλη τη διάταξη για μεγάλη ακρίβεια. Θα μπορούσε κανείς να θεωρήσει 1 mm μόνο στο διάκενο και 2 mm στην υπόλοιπη διάταξη για ταχύτητα στους υπολογισμούς. Αυτό μπορεί να γίνει στην περίπτωση εκείνη που μελετάται το μαγνητοστατικό πρόβλημα

και μόνο καθώς άμα ζητείται και η μετακίνηση του δρομέα η διαδικασία γίνεται πολύ πολύπλοκη.



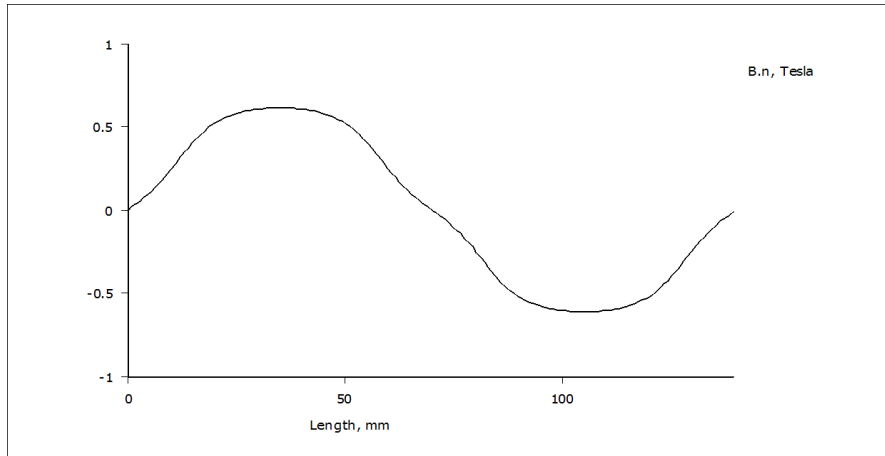
Σχήμα 5.20: Πλέγμα της γεωμετρίας στο λογισμικό FEMM.

Στη συνέχεια το μαγνητοστατικό πρόβλημα επιλύεται και στο σχήμα 5.21 φαίνεται η μορφή του μαγνητικού πεδίου. Στο σημείο αυτό το πρόγραμμα γνωρίζει την ακριβή θέση και τον αριθμό των σπειρών των πηνίων, τη μαγνητική επαγωγή και το βάθος της διάταξης και έτσι μπορεί να υπολογίσει την πεπλεγμένη ροή στην οποία θα βασιστεί η ανάλυση.



Σχήμα 5.21: Λύση του μαγνητοστατικού προβλήματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Επιπλέον στο λογισμικό FEMM μπορεί να βρεθεί και η μορφή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο και ύστερα χρησιμοποιώντας κατάλληλο λογισμικό σε γλώσσα Fortran να γίνει ο μετασχηματισμός Fourier αυτής, υπολογίζοντας την κρίσιμη για τη σχεδίαση πρώτη αρμονική B_p .

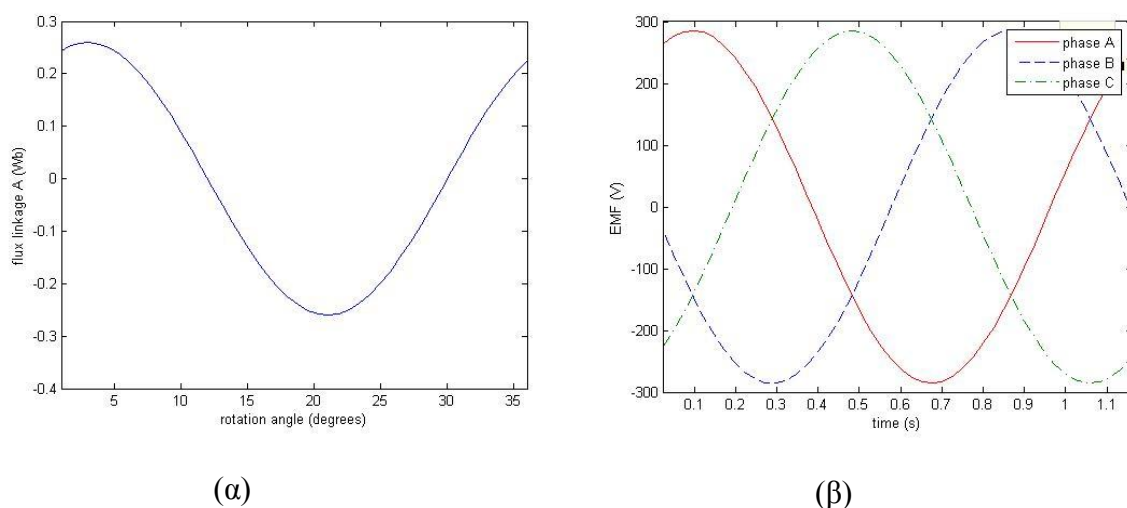


Σχήμα 5.22: Η μορφή της πυκνότητας μαγνητικής ροής στο διάκενο.

Το αποτέλεσμα της ανάλυσης αυτής δίνει $B_p = 0.63 \text{ T}$ ενώ στη σχεδίαση είχε οριστεί ίσο με 0.61 T . Η απόκλιση αυτή εξηγεί και κάποιες αποκλίσεις που μπορεί να προκύψουν αργότερα κατά την ανάλυση των επιδόσεων της γεννήτριας σε σχέση με τα επιθυμητά μεγέθη τάσης, ισχύος, απόδοσης κλπ.

5.5.2. Μετακίνηση του δρομέα και επιδόσεις της γεννήτριας

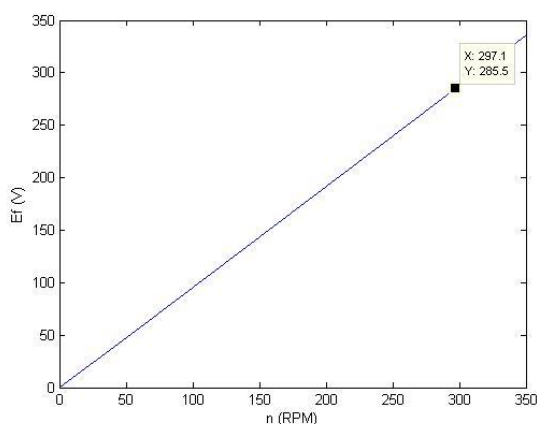
Με τη βοήθεια του λογισμικού Matlab μετακινείται ο δρομέας χωρίς να υπάρχει αρχικά ρεύμα στο στάτη προκειμένου να προσομοιωθεί η λειτουργία της γεννήτριας σε κατάσταση ανοιχτοκύκλωσης. Το βήμα μετακίνησης είναι 1 mm που αντιστοιχεί σε 0.24° για μεγαλύτερη ακρίβεια. Για κάθε βήμα υπολογίζεται η πεπλεγμένη ροή για κάθε φάση και παρουσιάζεται στο σχήμα 5.23 (α) σε συνάρτηση με τη γωνία περιστροφής. Η ημιτονοειδής μορφή της ήταν ένας στόχος της σχεδίασης που επιτεύχθηκε.



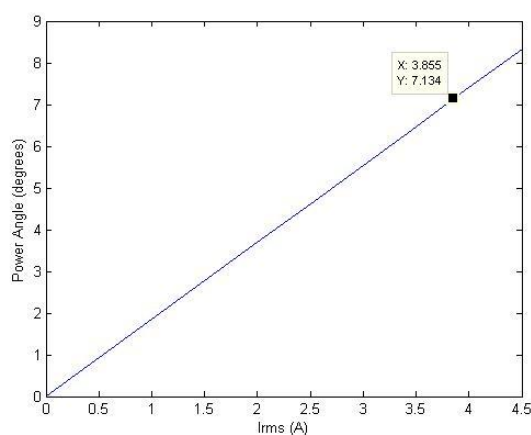
Σχήμα 5.23: (α) Η πεπλεγμένη ροή για τη φάση A της γεννήτριας σε σχέση με τη γωνία περιστροφής και (β) η ΗΕΔ για κάθε φάση σε σχέση με το χρόνο.

Τέλος, μπορεί να βρεθεί και η κυματομορφή της ΗΕΔ για κάθε φάση στις ονομαστικές στροφές που είναι ίσες με 297 ΣΑΛ. Οι τρεις φάσεις πρέπει να έχουν μεταξύ τους διαφορά 120°. Στη συνέχεια προσομοιώνεται η κανονική λειτουργία της γεννήτριας μέχρις αυτή να ξεπεράσει τα ονομαστικά της.

Η γραμμική όπως αναμενότανε σχέση της ΗΕΔ με την ταχύτητα περιστροφής φαίνεται στο σχήμα 5.25 (α) ενώ η γωνία ισχύος δ υπολογίζεται στο 5.24 (β) . Η μικρή τιμή της σύγχρονης αντίδρασης οδηγεί σε μικρές τιμές της γωνίας με αποτέλεσμα $\sin\delta \approx \delta$, οπότε και προκύπτει γραμμική σχέση μεταξύ της γωνίας ισχύος και της ταχύτητας περιστροφής.



(α)



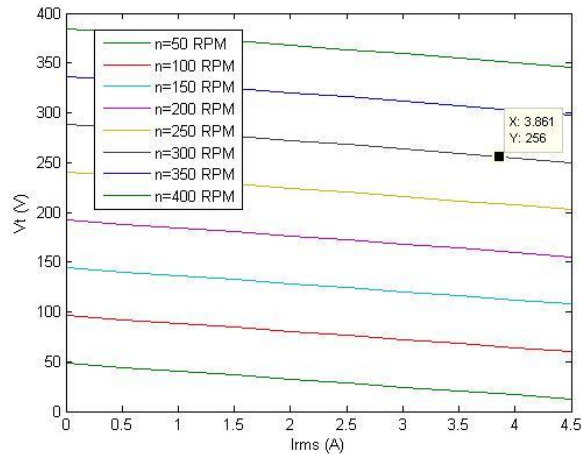
(β)

Σχήμα 5.24: (α) Η ΗΕΔ σε σχέση με τις στροφές και (β) η γωνία ισχύος σε σχέση με το ρεύμα.

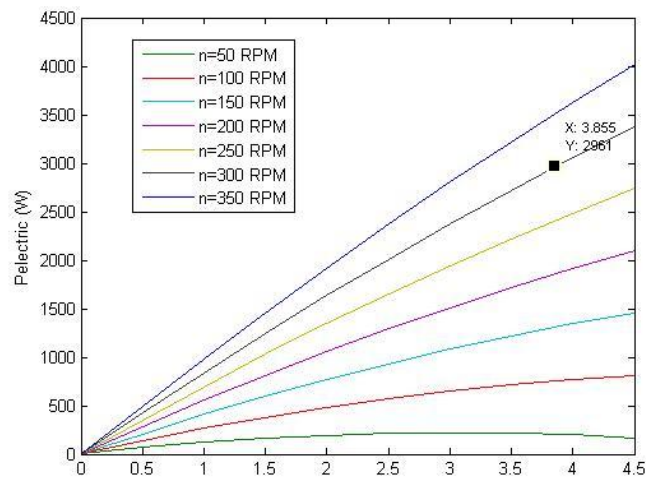
Στη συνέχεια παρουσιάζεται η σχέση της τερματικής τάσης με την ταχύτητα περιστροφής και το ρεύμα. Καθώς αυξάνονται οι στροφές η ΗΕΔ μεγαλώνει οπότε το ίδιο κάνει και η τερματική τάση. Καθώς αυξάνεται όμως το ρεύμα για δεδομένες στροφές η πτώση τάσης στην ωμική αντίσταση αυξάνεται με αποτέλεσμα η

τερματική τάση να μειώνεται. Αυτή ακριβώς η συμπεριφορά παρουσιάζεται στο σχήμα 5.25.

Στο σχήμα 5.26 φαίνεται η σχέση της ισχύος με το ρεύμα και τις στροφές. Η γραμμικότητά της ως προς το ρεύμα και τις στροφές οφείλεται στη σχετικά σταθερή τερματική τάση σε σχέση με το ρεύμα και στη γραμμικότητα της τερματικής τάσης με τις στροφές αντίστοιχα.

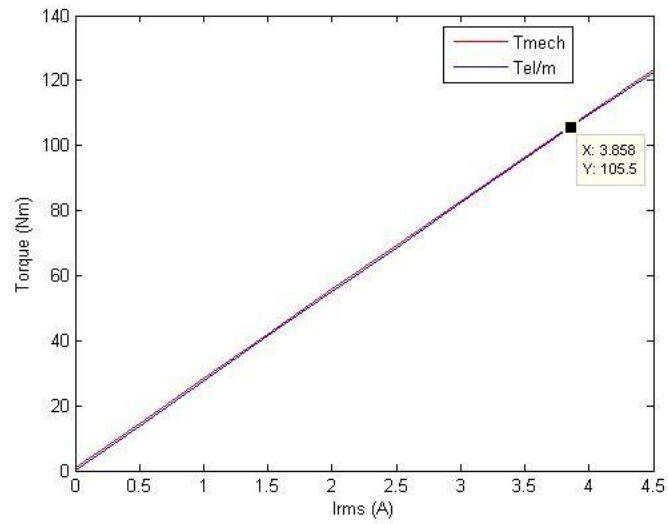


Σχήμα 5.25: Η τερματική τάση σε σχέση με τις στροφές και το ρεύμα της γεννήτριας.

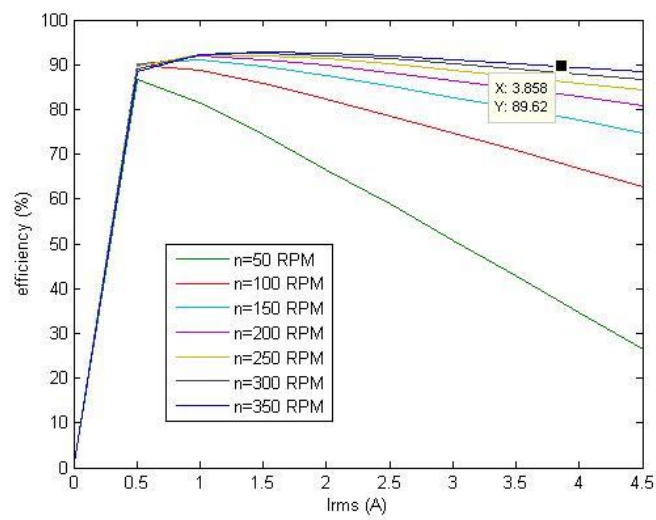


Σχήμα 5.26: Η ηλεκτρική ισχύς σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής για διάφορα ρεύματα γραμμής.

Τέλος εξετάζεται η ηλεκτρομαγνητική ροπή και η απόδοση. Η ροπή δε μεταβάλλεται με τις στροφές παρά μόνο με το ρεύμα και φαίνεται στο σχήμα 5.27. Η απόδοση φαίνεται στο σχήμα 5.28.



Σχήμα 5.27: Η ηλεκτρομαγνητική και η μηχανική ροπή της γεννήτριας συναρτήσει του ρεύματος.



Σχήμα 5.28: Η απόδοση σε σχέση με το ρεύμα γραμμής για διάφορες ταχύτητες περιστροφής.

6.Κατασκευή και Μέτρηση

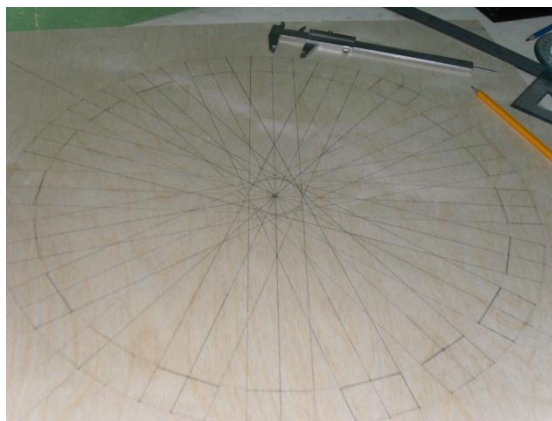
Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγραφεί η διαδικασία κατασκευής της γεννήτριας καθώς και η μέτρησή της για την επιβεβαίωση της προσομοίωσης.

6.1. Η κατασκευή της γεννήτριας

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της γεννήτριας αξονικής ροής μονίμων μαγνητών είναι η απλότητα της κατασκευής. Στο [2] περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθείται για την κατασκευή μιας γεννήτριας 1 kW. Αυτή η διαδικασία ακολουθείται και προσαρμόζεται για την υλοποίηση των σχεδίων που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση. Χρησιμοποιούνται φθηνά υλικά και απλά στη χρήση εργαλεία (ηλεκτρική σέγα, τριβείο, επιτραπέζιο δράπανο, ηλεκτροσυγκόλληση, τροχός κ.ά.) ώστε να μη χρειάζεται ιδιαίτερη εμπειρία για να ολοκληρωθεί το έργο.

6.1.1 Η κατασκευή του δρομέα

Ο δρομέας αποτελείται από δύο χαλύβδινους δίσκους πάνω στους οποίους τοποθετούνται οι μαγνήτες. Από το κέντρο των δίσκων αφαιρείται μικρός κυκλικός δίσκος ώστε να μπορεί να συνδεθεί το ρουλεμάν. Σε κάθε δίσκο ανοίγονται πέντε τρύπες με το επιτραπέζιο δράπανο. Από τις τρύπες αυτές θα περάσουν ντίζες που θα αποτελέσουν και τον άξονα της γεννήτριας. Οι δίσκοι τρίβονται με το τριβείο ώστε να αφαιρεθεί η εξωτερική επίστρωση σκουριάς. Αυτό χρειάζεται προκειμένου να μπορούν οι μαγνήτες με σιγουριά να κολλήσουν στο χάλυβα, καθώς η σκουριά αυτή δεν είναι σταθερή.



(α)



(β)

Σχήμα 6.1: (α) Το σχέδιο πάνω σε κόντρα πλακέ για τον οδηγό των μαγνητών και (β) ο χαλύβδινος δίσκος του δρομέα με τις τρύπες από όπου θα περάσουν οι ντίζες του άξονα.

Τώρα είναι σειρά των μαγνητών να τοποθετηθούν στους δίσκους. 20 μαγνήτες NdFeB N40 θα τοποθετηθούν στην περιφέρεια των δύο δίσκων δημιουργώντας μια

όσο το δυνατόν περισσότερο συμμετρική διάταξη. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια του ξύλινου οδηγού, ο οποίος έχει σχεδιαστεί και κοπεί στο χέρι και δείχνει ακριβώς πού πρέπει να τοποθετηθούν οι μαγνήτες. Κάθε μαγνήτης έχει αντίθετη πολικότητα από το διπλανό του καθώς και από τον απέναντι μαγνήτη.



(α)



(β)

Σχήμα 6.2: (α) Ο οδηγός των μαγνητών έχει βιδωθεί πάνω στο χαλύβδινο δίσκο και όλοι οι μαγνήτες έχουν τοποθετηθεί. Στον άλλο δίσκο ο οδηγός πρέπει να βιδωθεί ανάποδα. (β) Προετοιμασία για τα καλούπια του δρομέα.

Για την καλύτερη μηχανική στήριξη οι δίσκοι με τους μαγνήτες θα τοποθετηθούν σε ρητίνη. Για το σκοπό αυτό πρέπει να κατασκευαστούν δύο καλούπια (ένα για κάθε δίσκο) στα οποία θα τοποθετηθούν οι δίσκοι και θα γίνει η έγχυση της ρητίνης. Κάθε καλούπι αποτελείται από 3 κόντρα πλακέ. Τη βάση, το εσωτερικό και το καπάκι. Είναι τετράγωνα και οι διαστάσεις τους είναι τέτοιες ώστε να χωράει ο δίσκος του δρομέα αλλά να υπάρχει και περίσσειμα σε ξύλο ώστε να μπορεί να βιδωθεί η κατασκευή. Το πάχος της βάσης και του καπακιού είναι σχετικά αυθαίρετα (χοντρή βάση, λεπτό καπάκι), ενώ το πάχος του εσωτερικού ξύλου είναι περίπου ίσο με το πάχος των μαγνητών και του σιδήρου. Όσον αφορά το εσωτερικό τμήμα του καλουπιού, κόβεται ένας δίσκος λίγο μεγαλύτερος από τη γεννήτρια, όπου στη θέση του θα τοποθετηθούν οι δίσκοι του δρομέα. Βιδώνεται η βάση με το εσωτερικό τμήμα, τοποθετούνται οι δίσκοι με τους μαγνήτες, χύνεται η ρητίνη και το καλούπι σκεπάζεται με το καπάκι. Πριν από την έγχυση ρητίνης όλα εκείνα τα σημεία στα οποία η ρητίνη δεν πρέπει να κολλήσει (π.χ. ξύλο καλουπιών) αλείφονται με κερί. Επίσης, πάνω από τη ρητίνη τοποθετείται μια στρώση από υαλονήματα για αντοχή στις καταπονήσεις και στη φυσική φθορά. Το καπάκι δε χρειάζεται βίδωμα. Πάνω του τοποθετούνται εργαλεία, τα οποία έλκουν οι μαγνήτες και έτσι παραμένει κλειστό ασκώντας την απαιτούμενη πίεση προκειμένου να διαφύγει η παραπάνω ρητίνη.



(α)



(β)

Σχήμα 6.3: (α) Ο δίσκος του δρομέα με τους μαγνήτες έχει τοποθετηθεί στο καλούπι όπου έχει χυθεί και η ρητίνη και (β) το καλούπι κλείνει χωρίς να βιδωθεί μέχρι να στεγνώσει η ρητίνη.

Τα καλούπια αφήνονται στην κατάσταση αυτή μέχρι να στερεοποιηθεί η ρητίνη, τουλάχιστον για ένα εικοσιτετράωρο. Στη συνέχεια αποσυναρμολογούνται προσεκτικά τα καλούπια για να βγουν οι δίσκοι με τους μαγνήτες και τη ρητίνη πλέον πάνω τους που τους συγκρατεί. Με προσοχή απομακρύνεται η ρητίνη από όλα τα ανεπιθύμητα σημεία με τη βοήθεια μιας λίκας, ενώ με το τριβείο το πάχος του δρομέα ρυθμίζεται στο επιθυμητό επίπεδο. Οι δύο δίσκοι είναι πλέον έτοιμοι για χρήση.



Σχήμα 6.4: Ο ένας δίσκος του δρομέα αμέσως μόλις βγήκε από το καλούπι. Πρέπει να καθαριστεί από την περισσευούμενη ρητίνη και να γυαλιστεί με το τριβείο ώστε να λάβει το επιθυμητό πάχος.

Μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί σε συγκεκριμένες λεπτομέρειες που μπορούν να οδηγήσουν σε αδιέξοδα. Αρχικά, καταλήγοντας σε μια σχετικά μεγάλη εξωτερική ακτίνα όπως στην περίπτωση αυτή είναι πολύ πιθανό οι δύο δίσκοι να είναι σχετικά στραβοί. Αυτό μπορεί να δημιουργήσει αργότερα προβλήματα κατά τη

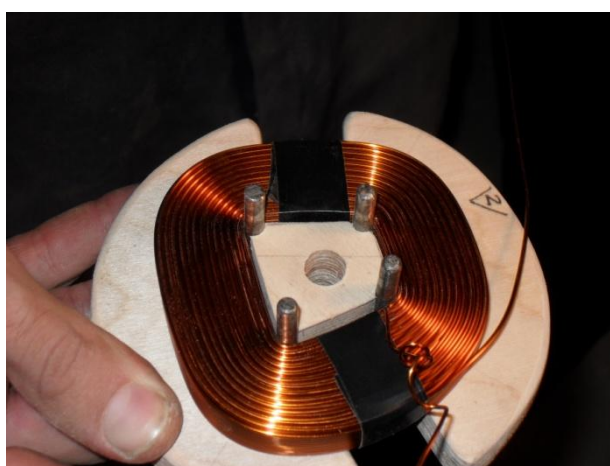
συναρμολόγηση της γεννήτριας και όσον αφορά τη ρύθμιση του διακένου και τη σταθερότητά του.

Επιπλέον πρόβλημα εμφανίζεται σχετικά με τα εργαλεία που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Η καλή γνώση των δυνατοτήτων των εργαλείων που είναι διαθέσιμα είναι κάτι που πρέπει να υπάρχει πριν ακόμα τη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Περιορισμένες δυνατότητες στα εργαλεία θα οδηγούν και σε περιορισμούς στην κατασκευή. Ένας τέτοιος περιορισμός στη συγκεκριμένη κατασκευή αφορούσε το επιτραπέζιο δράπανο του οποίου οι διαστάσεις δεν επέτρεπαν την επεξεργασία των χαλύβδινων δίσκων.

Πολύ σημαντικό είναι ο κατασκευαστής να διατηρεί συνεχώς τη συμμετρία της κατασκευής. Παγίδες μπορεί να δημιουργηθούν με τη χρήση του ενός οδηγού και για τους δύο δίσκους. Καθώς οι δίσκοι θα τοποθετηθούν ο ένας αντικριστά στον άλλο μπορεί να προκύψει ασυμμετρία όσον αφορά τις τρύπες από τις οποίες θα περάσει ο άξονας, με αποτέλεσμα κάθε μαγνήτης να μην είναι ευθυγραμμισμένος με τον αντίθετης πολικότητας απέναντί του. Για ασφάλεια στον άλλο δίσκο ο οδηγός πρέπει να τοποθετηθεί ανάποδα πριν μπουν οι μαγνήτες.

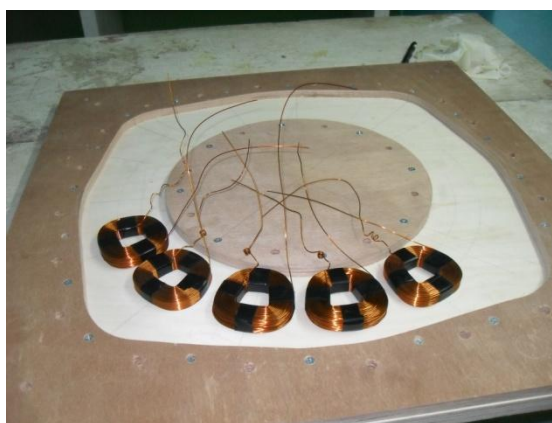
6.1.2. Η κατασκευή του στάτη

Πρώτο βήμα στην κατασκευή του στάτη είναι η κατασκευή των πηνίων. Ως τώρα έχει γίνει πολύς λόγος για τα πηνία κυρίως μέσω το συντελεστή πλήρωσης k_f . Στο σημείο αυτό θα παρουσιαστεί η διαδικασία κατασκευής των πηνίων καθώς και του στάτη. Πρέπει να κατασκευαστούν 15 πηνία το καθένα με 337 σπείρες διαμέτρου 0,95mm. Αρχικά κατασκευάζεται από ξύλο μια μηχανή χειρός για το τύλιγμα. Τρία άτομα απαιτούνται για αυτήν την εργασία. Ένας κρατά το χαλκό τεντωμένο, ένας τυλίγει και ένας ακόμα μετράει τις περιελίξεις. Το πλήθος των σπειρών και των πηνίων έκανε τη διαδικασία αρκετά κουραστική και χρονοβόρα.

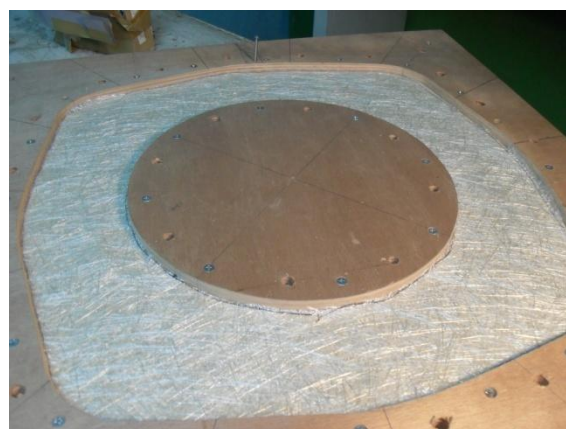


Σχήμα 6.5: Τα πηνία τυλίγονται με τη βοήθεια μηχανήματος που κατασκευάζεται με το χέρι ανάλογα με τις επιθυμητές διαστάσεις πηνίου. Στο κέντρο φαίνεται ο αποστάτης. Η χαρακτηριστική γυαλάδα στο πηνίο υποδεικνύει ότι έχει τυλιχτεί σωστά χωρίς επικαλύψεις σπειρών.

Αφού τυλιχτούν τα πηνία (τυλίγονται 2 ακόμα για ασφάλεια) λαμβάνονται μετρήσεις που αφορούν το βάρος και τις διαστάσεις τους. Το αξονικό πάχος των πηνίων προέκυψε μεγαλύτερο από το ζητούμενο κατά 1 mm περίπου. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να λυθεί ρυθμίζοντας τον αποστάτη στο τυλιχτήρι να είναι 1 mm λεπτότερος από το ζητούμενο πάχος. Επίσης υπολογίζεται ο συντελεστής πλήρωσης του καθενός. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο της διαστασιολόγησης επιλέχθηκε η τιμή 0,55 ως πιο πιθανή για το συντελεστή αυτό. Προέκυψαν όμως πηνία με συντελεστή έως και 0,7, κάτι που αλλάζει τη μορφή της κατασκευής αλλά όχι και τη λειτουργία της. Στην κατασκευή λοιπόν τα πηνία δε θα εφάπτονται το ένα στο άλλο αλλά θα έχουν κενό μεταξύ τους. Αυτό παραπέμπει σε μη αποδοτική εκμετάλλευση του χώρου και θα μπορούσε να αξιοποιηθεί εύκολα άμα δεν είχαν κατασκευαστεί οι δίσκοι του δρομέα. Η απουσία δυνατότητας μετακίνησης των μαγνητών εμποδίζει τη διόρθωση του προβλήματος.



(α)



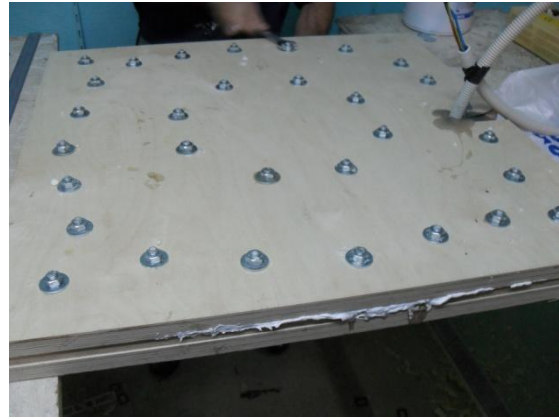
(β)

Σχήμα 6.6: (α) Τα πηνία που κατασκευάστηκαν μέσα στο καλούπι. Τα πηνία δεν εφάπτονται το ένα στο άλλο όπως θα έπρεπε να συμβαίνει. (β) Το καλούπι του στάτη έτοιμο για χρήση. Μέσα έχουν τοποθετηθεί υαλονήματα για καλύτερη μηχανική αντοχή της ρητίνης.

Στη γεννήτρια δεν υπάρχει πυρήνας, έτσι δεν υπάρχει και μηχανική στήριξη για τα πηνία. Η στήριξη επιτυγχάνεται και πάλι με πολυεστερική ρητίνη, μέσα στην οποία θα τοποθετηθεί το τύλιγμα. Για το σκοπό αυτό κατασκευάζεται ένα νέο καλούπι για το στάτη. Αποτελείται και πάλι από τρία μέρη. Βάση, εσωτερικό και καπάκι, τα οποία κόβονται από κόντρα πλακέ στην ίδια περίπου λογική με τα καλούπια του δρομέα. Σημαδεύονται οι θέσεις των πηνίων, τα πηνία σταθεροποιούνται και το τύλιγμα κατασκευάζεται με τη βοήθεια του κολλητηριού (συνδεσμολογία αστέρα). Στο κέντρο του εσωτερικού τμήματος τοποθετείται μικρότερος ξύλινος δίσκος ώστε να προκύψει κενό για να περάσει ο άξονας. Συνδέεται και ο ουδέτερος ο οποίος δεν αφήνεται στη γεννήτρια όπως συνηθίζεται αλλά βγαίνει έξω από αυτή μαζί με τις φάσεις για πειραματικούς σκοπούς.



(α)



(β)

Σχήμα 6.7: Το τύλιγμα (α) αμέσως αφού έχουν κολληθεί και σχηματιστεί οι φάσεις και (β) μέσα στο καλούπι με τη ρητίνη. Το καλούπι έχει βιδωθεί. Από το πλάι φεύγει η περισσευούμενη ρητίνη αλλά και σιλικόνη η οποία προτείνεται από τον κατασκευαστή. Δεν έφερε όμως παρά μόνο αρνητικά αποτελέσματα στη συγκεκριμένη κατασκευή.

Αφού το τύλιγμα έχει σταθεροποιηθεί και κολληθεί τοποθετείται στο καλούπι το οποίο έχει αλειφθεί με κερί. Η ρητίνη όπως ακριβώς και στο δρομέα αναμειγνύεται με καταλύτη και ταλκ (θερμοαπαγωγή) και χύνεται στο καλούπι. Πριν από την έγχυση της ρητίνης τοποθετείται και μία στρώση υαλονήματος για αντοχή στις καταπονήσεις. Το ίδιο συμβαίνει και μετά την έγχυση. Το καπάκι βιδώνεται, το πλεόνασμα ρητίνης εξέρχεται του καλουπιού και ο στάτης αφήνεται ένα εικοσιτετράωρο να στεγνώσει. Το καλούπι αποσυναρμολογείται προσεκτικά και ο στάτης είναι έτοιμος.



Σχήμα 6.8: Ο στάτης είναι έτοιμος για τοποθέτηση.

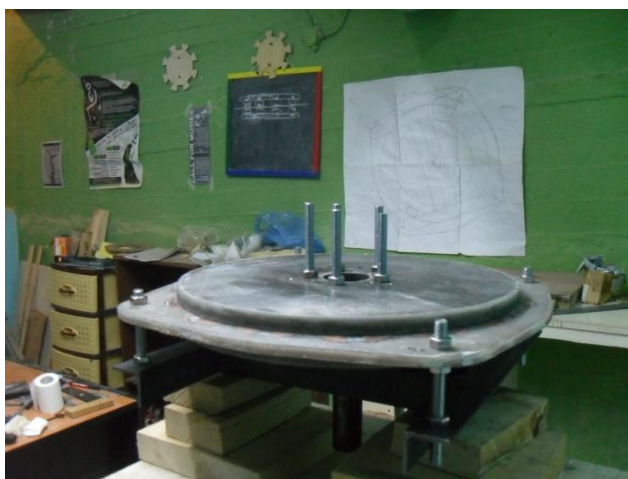
6.1.3. Η κατασκευή στήριξης και η συναρμολόγηση

Σειρά έχει η κατασκευής στήριξης. Εκεί θα στηρίζεται η γεννήτρια με το ρουλεμάν της. Είναι κατασκευασμένη από χάλυβα και τα διάφορα τμήματά της κολλάνε μεταξύ τους με ηλεκτροσυγκόλληση.



Σχήμα 6.9: Η κατασκευή στήριξης της γεννήτριας. Πρόκειται για μια “Γ” κατασκευή από χάλυβα.

Αυτό που απομένει είναι η συναρμολόγηση. Αρχικά ρυθμίζεται η απόσταση μεταξύ των δύο δίσκων του δρομέα με τη βοήθεια παξιμαδιών που τοποθετούνται στις ντιζες του άξονα. Στη συνέχεια προσαρμόζεται ο στάτης ώστε να υπάρχει το επιθυμητό διάκενο (το διάκενο αποτελείται από τον αέρα μεταξύ δρομέα-στάτη καθώς και από το πάχος της ρητίνης πάνω από τα πηνία και τους μαγνήτες και πρέπει να είναι ίσο με 3 mm, οπότε ανάλογα πρέπει να υπολογιστεί και να ρυθμιστεί το μηχανικό διάκενο). Όταν έχει γίνει και αυτό ο στάτης σταθεροποιείται στην τελική του θέση και πάλι με τη βοήθεια παξιμαδιών και ντιζών που βιδώνουν στην κατασκευή στήριξης.



Σχήμα 6.10: Η γεννήτρια συναρμολογείται και ρυθμίζεται το διάκενό της ώστε να προσεγγίζει όσο το δυνατόν περισσότερο τις σχεδιαστικές προδιαγραφές.

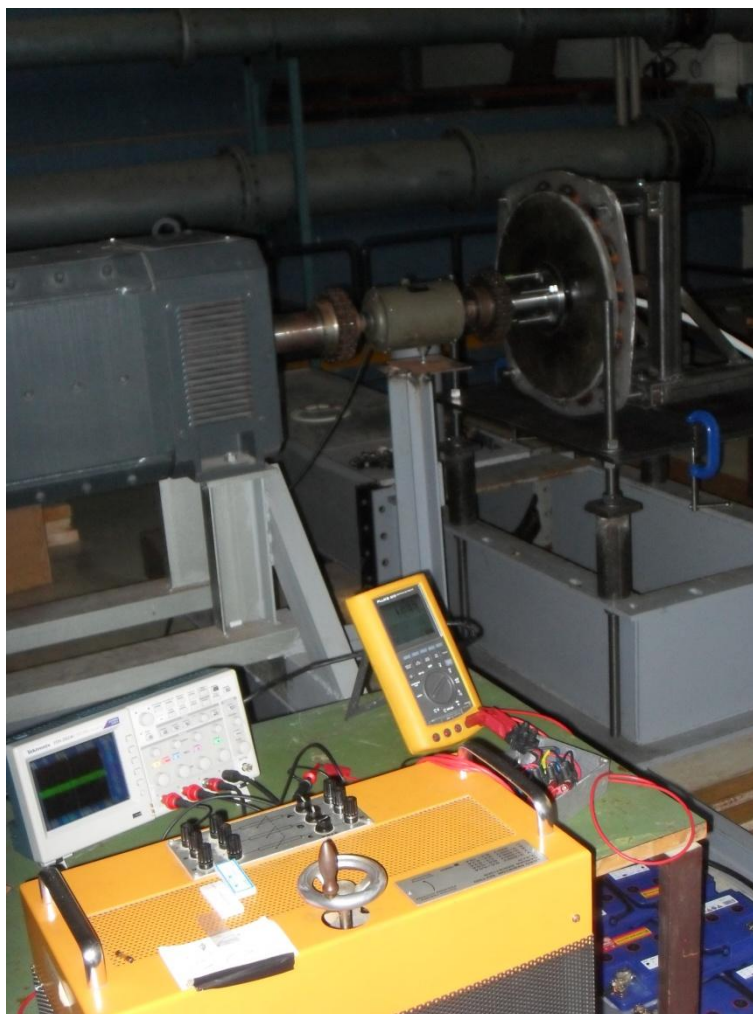
Πλέον η γεννήτρια είναι έτοιμη να μετρηθεί στο εργαστήριο.

6.2. Η μέτρηση της γεννήτριας

Η γεννήτρια μεταφέρεται στο Εργαστήριο Υδροδυναμικής της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. όπου είναι διαθέσιμος κινητήρας DC ονομαστικής ισχύος 110 kW και ονομαστικών στροφών 3000 RPM. Η γεννήτρια που θα μετρηθεί έχει ονομαστική ισχύ 3 kW και ονομαστικές στροφές 300 RPM. Πριν η γεννήτρια τοποθετηθεί ως φορτίο στον κινητήρα κατασκευάστηκε πέδη αλλά και βάση για τη στήριξή της.

6.2.1. Η πειραματική διάταξη και τα μετρούμενα μεγέθη

Ο κινητήρας που επιλέχθηκε έχει πολύ καλό έλεγχο στροφών (χαρακτηριστικό των DC κινητήρων) και για αυτό επιλέχθηκε. Παρακάτω φαίνεται η πειραματική διάταξη (σχήμα 6.11):



Σχήμα 6.11: Η πειραματική διάταξη.

Τα ρεύματα και οι τάσεις μετρώνται με τη βοήθεια ψηφιακού παλμογράφου αλλά και πολυμέτρου. Οι στροφές μετρώνται μέσω της συχνότητας από τον παλμογράφο ενώ μεταξύ κινητήρα και γεννήτρια έχει τοποθετηθεί ροτόμετρο με εύρος 5Nm-500Nm για μέτρηση της ροπής.

6.2.1.1. Η ΗΕΔ της γεννήτριας και η DC τάση ανοιχτοκύκλωσης

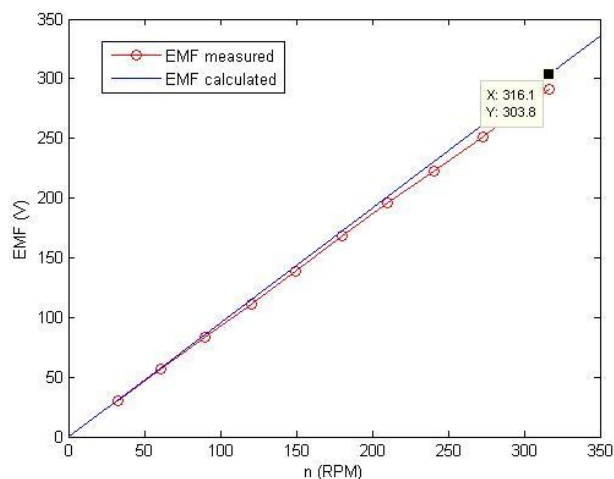
Πρώτο μέλημα είναι η μέτρηση της ηλεκτρεγερτικής δύναμης σε συνάρτηση με τις στροφές. Η γεννήτρια ανοιχτοκυκλώνεται και μετράται η φασική τάση στα άκρα της (αυτό επιτυγχάνεται εύκολα με τη βοήθεια του ουδετέρου). Οι στροφές του κινητήρα μεταβάλλονται από το δωμάτιο ελέγχου και η ΗΕΔ μετράται στον παλμογράφο μέχρι τις ονομαστικές στροφές.

Οι τρεις φάσεις δεν εμφανίζουν την ίδια ΗΕΔ. Πρόκειται για ασυμμετρία που οφείλεται στην κατασκευή του τυλίγματος (πηνία με λιγότερα ή περισσότερα ελίσματα) αλλά και στην τοποθέτησή του στο χώρο. Έτσι υπολογίζεται η μέση τιμή των τριών φάσεων η οποία θα χρησιμοποιηθεί από εδώ και στο εξής.

n (RPM)	EfA (V)	EfB (V)	EfC (V)	Efavg
32.82	30.4	29.6	30.3	30.10
61.20	56.7	57.8	56.5	57.00
89.76	84.0	84.1	83.1	83.73
120.42	110.0	112.0	111.0	111.00
149.40	139.0	139.0	139.0	139.00
180.06	168.0	168.0	168.0	168.00
210.06	189.0	194.0	204.0	195.67
240.36	222.0	222.0	224.0	222.67
272.70	257.0	254.0	243.0	251.33
302.40	278.0	279.0	279.0	278.67
316.14	298.0	285.0	290.0	291.00

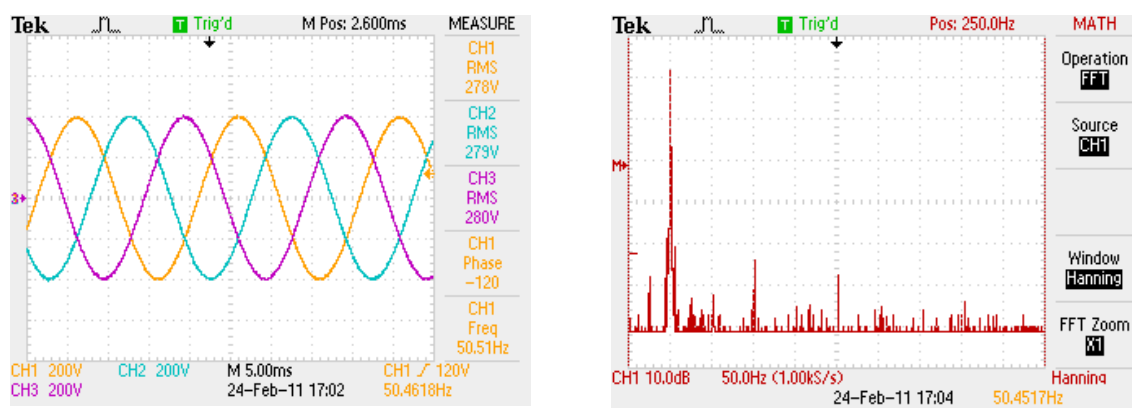
Πίνακας 6.1: Η φασική ΗΕΔ σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής.

Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 6.1 και η σχέση της ΗΕΔ με τις στροφές φαίνεται στο σχήμα 6.12. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται και η καμπύλη που προέκυψε από την προσομοίωση. Το μέγιστο σφάλμα ανέρχεται στο 4.4%, που είναι σημαντικό καθώς θα συσσωρευτεί στους υπόλοιπους υπολογισμούς.



Σχήμα 6.12: Η φασική ΗΕΔ με την ταχύτητα περιστροφής όπως μετρήθηκε στο εργαστήριο και όπως υπολογίστηκε στην προσομοίωση.

Η γεννήτρια λειτουργεί στα ονομαστικά της προκειμένου να παρατηρηθεί η κυματομορφή της ΗΕΔ. Αυτή προκύπτει ημιτονική όπως ήταν και η απαίτηση από τις σχεδιαστικές προδιαγραφές. Ταυτόχρονα φαίνεται ότι κάθε φάση καθυστερεί ή έπεται της άλλης κατά 120° , που αποτελεί σχεδιαστική προδιαγραφή προκειμένου το σύστημα να είναι τριφασικό. Στο σχήμα 6.13 φαίνεται η κυματομορφή της ΗΕΔ καθώς και η ανάλυση Fourier που δείχνει ότι πρόκειται για ένα καλό ημίτονο.



(α)

(β)

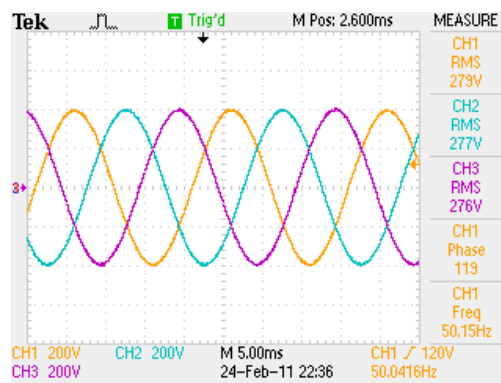
Σχήμα 6.13: (α) Η ΗΕΔ στις τρεις φάσεις της γεννήτριας όταν αυτή στρέφεται στις ονομαστικές της στροφές (300 RPM) και (β) η ανάλυση Fourier στη φάση Α.

Στη συνέχεια προστίθεται στη διάταξη αυτοσχέδιος μη ελεγχόμενος ανορθωτής και μετράται η DC τάση ανοιχτοκύκλωσης της γεννήτριας. Αυτό συμβαίνει και πάλι με τη βοήθεια του παλμογράφου. Οι μετρήσεις φαίνονται στον Πίνακα 6.2 όπου υπολογίζονται και οι αναμενόμενες με βάση τη θεωρία των ανορθωτών τιμές τις DC τάσης ανοιχτοκύκλωσης για να διαπιστωθούν πιθανές αποκλίσεις που θα βοηθήσουν αργότερα στη βελτίωση των προσομοιώσεων.

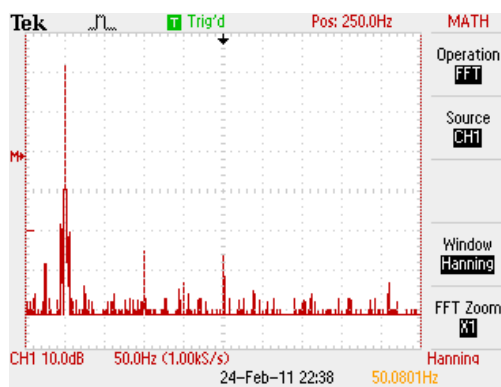
n (RPM)	EfA (V)	EfB (V)	EfC (V)	Efavg (V)	Vdc measured	Vdc calculated
30.72	28.8	28.2	28.8	28.60	65.1	66.87
61.32	57.2	56.8	58.4	57.47	131.2	134.37
90.18	85.9	84.8	83.8	84.83	192.2	198.36
120.12	113.0	111.0	112.0	112.00	258.2	261.89
151.50	142.0	141.0	142.0	141.67	325.1	331.25
183.06	168.0	171.0	172.0	170.33	390.3	398.29
210.24	186.0	193.0	203.0	194.00	450.5	453.62
240.00	223.0	223.0	221.0	222.33	516.7	519.88
270.30	255.0	250.0	240.0	248.33	578.7	580.67
300.90	279.0	277.0	276.0	277.33	643.5	648.48

Πίνακας 6.2: Φασική ΗΕΔ και DC τάση ανοιχτοκύκλωσης για διάφορες ταχύτητες περιστροφής.

Παρατηρήθηκε επίσης ότι σε κατάσταση ανοιχτοκύκλωσης ο ανορθωτής δεν επηρεάζει την κυματομορφή της ΗΕΔ.



(α)



(β)

Σχήμα 6.14: Η γεννήτρια συνδέεται σε ανορθωτή και μετράται (α) η ΗΕΔ στις τρεις φάσεις της γεννήτριας όταν αυτή στρέφεται στις ονομαστικές της στροφές (300 RPM) και (β) η ανάλυση Fourier στη φάση Α.

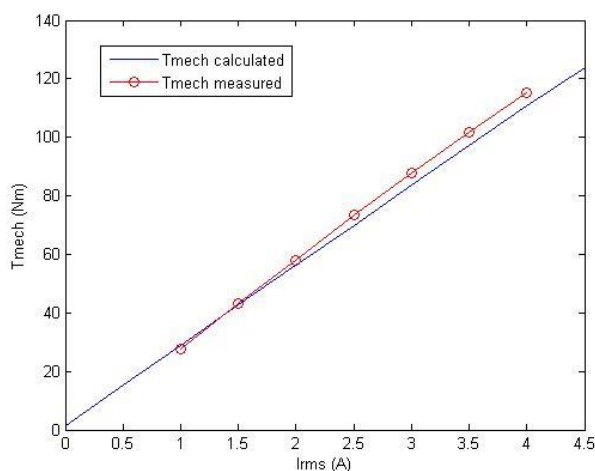
Οι μετρούμενες τιμές της DC φαίνεται να απέχουν έως και 5 V από τις αντίστοιχες θεωρητικές. Ποσοστιαία πρόκειται για μικρή τιμή αλλά στο τέλος το σφάλμα θα προστεθεί στην ισχύ. Το αποτέλεσμα θα είναι η ισχύς που προκύπτει στην έξοδο να είναι μικρότερη από αυτή της προσομοίωσης.

6.2.1.2. Μέτρηση της μηχανικής ροπής, της τερματικής τάσης και της απόδοσης υπό ωμικό τριφασικό φορτίο.

Στο σημείο αυτό συνδέουμε στα άκρα της γεννήτριας ένα τριφασικό μεταβαλλόμενο ωμικό φορτίο. Στο πείραμα οι στροφές παραμένουν σταθερές στην ονομαστική τους τιμή και ρυθμίζεται το ωμικό φορτίο έως ότου να μετρηθεί το κατάλληλο ρεύμα. Το ρεύμα πρέπει να μεταβάλλεται μέχρι την ονομαστική του τιμή (3.85 A) και λίγο παραπάνω για να διαπιστωθεί η λειτουργία της γεννήτριας σε υψηλότερους ανέμους. Για κάθε ρεύμα λαμβάνεται μέτρηση της ροπής μέσω του ροπομέτρου. Το ροπόμετρο έχει πολύ μεγάλο εύρος (5Nm-5kNm) και έτσι μπορεί να υπεισέρχονται σφάλματα σε μετρήσεις που βρίσκονται κοντά στο κάτω όριο. Η ροπή για κάθε ρεύμα φαίνεται στον Πίνακα 6.3 ενώ στο σχήμα 6.15 φαίνεται η αντίστοιχη γραφική παράσταση και συγκρίνεται με αυτήν που προέκυψε στην προσομοίωση.

I _{rms} (A)	T _{mech} (Nm)
0.5	11.92
1.0	27.79
1.5	43.03
2.0	58.08
2.5	73.59
3.0	87.96
3.5	101.84
4.0	115.29

Πίνακας 6.3: Η μηχανική ροπή της γεννήτριας σε σχέση με το ρεύμα γραμμής.



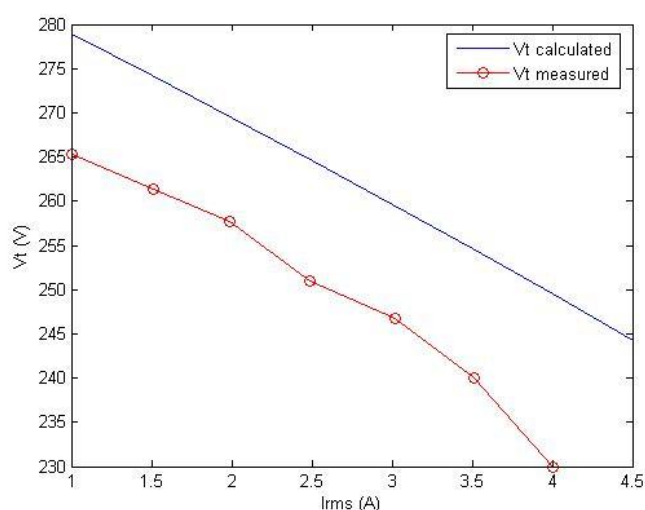
Σχήμα 6.15: Η μηχανική ροπή της γεννήτριας σε σχέση με το ρεύμα όπως μετρήθηκε στο εργαστήριο και όπως προέκυψε στην προσομοίωση.

Οι παραπάνω μετρήσεις θα βοηθήσουν αργότερα στον υπολογισμό της απόδοσης καθώς γνωρίζοντας τη μηχανική ροπή μπορεί να προκύψει εύκολα η μηχανική ισχύς στην είσοδο της γεννήτριας. Το σφάλμα όσον αφορά τη μηχανική ροπή είναι ίσο με 4.07% που θα επηρεάσει αργότερα την απόδοση.

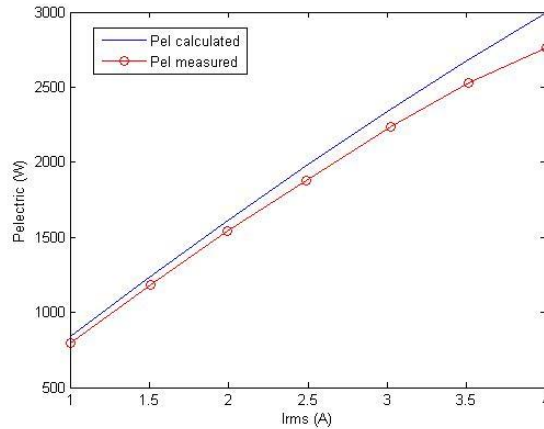
Στο ίδιο πείραμα μετράται ταυτόχρονα η τερματική τάση της γεννήτριας με τη βοήθεια του παλμογράφου για ονομαστικές στροφές. Οι μετρήσεις φαίνονται στον Πίνακα 6.4 όπου ταυτόχρονα υπολογίζεται και η ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο της γεννήτριας. Στη συνέχεια γίνεται η γραφική παράσταση της τερματικής τάσης σε σχέση με το ρεύμα (σχήμα 6.16) και της ηλεκτρικής ισχύος σε σχέση με το ρεύμα (σχήμα 6.17) όπου φαίνονται και οι αναμενόμενες από την προσομοίωση τιμές.

I _{rms} (A)	V _{tA} (V)	V _{tB} (V)	V _{tC} (V)	V _{t avg} (V)	P _{el} (W)
1.00	265	266	265	265.33	794.4
1.51	262	261	261	261.33	1183.8
1.99	258	258	257	257.67	1538.3
2.49	250	252	251	251.00	1875.0
3.02	247	247	246	246.67	2234.8
3.51	239	241	240	240.00	2527.2
4.00	230	231	229	230.00	2760.0

Πίνακας 6.4: Η τερματική τάση, το ρεύμα και η ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας.

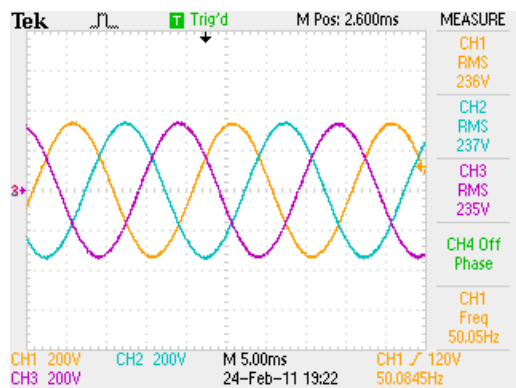


Σχήμα 6.16: Η τερματική τάση σε σχέση με το ρεύμα και οι αντίστοιχες τιμές όπως προέκυψαν στην προσομοίωση.

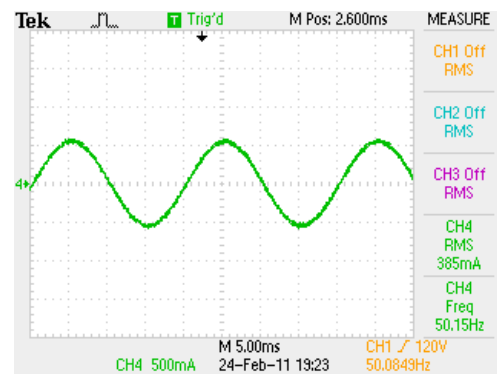


Σχήμα 6.17: Η ηλεκτρική ισχύς όπως μετρήθηκε στο εργαστήριο και όπως προέκυψε από την προσομοίωση.

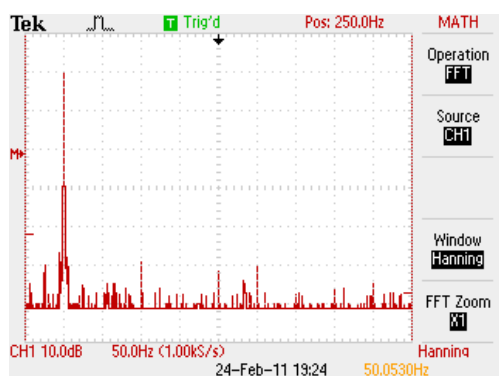
Επιπλέον, παρατηρούμε στον παλμογράφο ότι με το ωμικό φορτίο η τάση παραμένει ημιτονοειδής και η μόνη αλλαγή που υπάρχει σε σχέση με την ΗΕΔ αφορά την πτώση τάσης πάνω στο τύλιγμα. Το σφάλμα στην τερματική τάση είναι 8.4 % σε σχέση με την προσομοίωση ενώ το σφάλμα στην ισχύ είναι ίσο με 8.5 %.



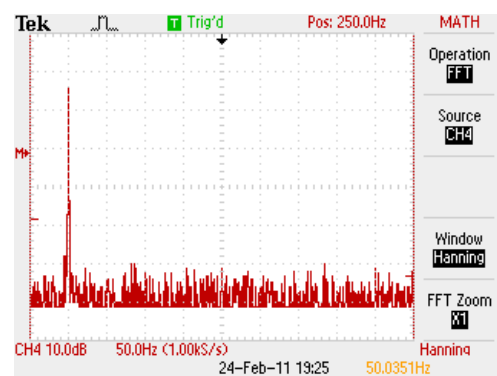
(α)



(γ)



(β)



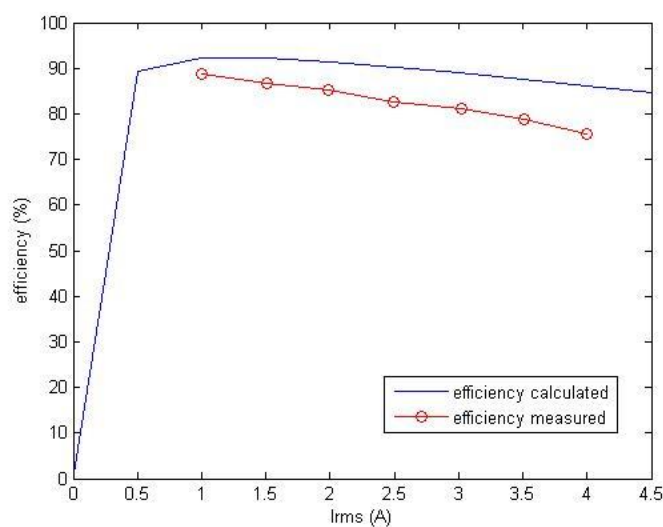
(δ)

Σχήμα 6.18: (α) Η τερματική τάση της γεννήτριας σε σχέση με το χρόνο και (β) η ανάλυση Fourier για τη φάση A. Επίσης στο (γ) η κυματομορφή του ρεύματος και στο (δ) η αντίστοιχη ανάλυση Fourier.

Στη συνέχεια, με τη βοήθεια της μηχανικής ροπής που μετρήθηκε προηγουμένως και δεδομένων των στροφών της γεννήτριας θα υπολογιστεί η απόδοση για διάφορα φορτία για ονομαστικές στροφές 300 RPM. Το σφάλμα στην απόδοση είναι αρκετά μεγάλο καθώς συσσωρεύονται όλα τα παραπάνω σφάλματα και προκύπτει ίσο με 14.13%.

Irms (A)	Vt avg φασική (V)	Pelectric (W)	Tmech (Nm)	Pmech (W)	Efficiency (%)
1.00	265.33	794.4	28.52	895.67	88.69
1.51	261.33	1183.8	43.52	1366.50	86.63
1.99	257.67	1538.3	57.58	1807.89	85.09
2.49	251.00	1875.0	72.22	2267.68	82.68
3.02	246.67	2234.8	87.74	2755.06	81.12
3.51	240.00	2527.2	102.09	3205.66	78.84
4.00	230.00	2760.0	116.44	3656.25	75.49

Πίνακας 6.5: Εύρεση της απόδοσης για λειτουργία υπό τριφασικό φορτίο στις 300 RPM.



Σχήμα 6.19: Η μεταβολή της απόδοσης για ονομαστικές στροφές και μεταβαλλόμενο ρεύμα.

Κατά τη μέτρηση της γεννήτριας παρατηρείται αυξημένη θερμοκρασία στο στάτη (χωρίς να είναι γνωστό αν πρόκειται για στοιχείο επικίνδυνο για τη λειτουργία). Ένας λόγος είναι ότι αφενός στο εργαστήριο δεν υπάρχει ο φυσικός αερισμός που θα υπάρχει όταν η γεννήτρια λειτουργεί σε ύψος πχ 12 m. Επίσης, οι μεγάλης διαμέτρου δίσκοι του δρομέα καθιστούν τον αερισμό δυσκολότερο. Ένας τρόπος πάντως (που δε μελετά τα παραπάνω) για να δούμε αν η γεννήτρια λειτουργεί σωστά ως προς τις θερμοκρασίες που αναπτύσσει είναι ο υπολογισμός του συντελεστή αποβολής θερμότητας c_q . Ο συντελεστής αυτός πρέπει να είναι το πολύ ίσος με $0,3 \text{ W/cm}^2$ [32] και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$cq = \frac{P_{losscoil}}{coilsurface} = \frac{I_a^2 \cdot Rc}{2 \cdot wc \cdot l_{avg}}$$

Για τη γεννήτρια που κατασκευάστηκε ο παραπάνω συντελεστής υπολογίζεται ίσος με $0,289 \text{ W/cm}^2$, στο όριο δηλαδή που τίθεται από τη βιβλιογραφία, κάτι που μπορεί να εξηγήσει τη θέρμανση του στάτη. Είναι σημαντικό να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι αν είχε κατασκευαστεί ακριβώς η προσομοιωθείσα διάταξη, αν δηλαδή ο συντελεστής πλήρωσης των πηνίων ήταν ίσος με 0,55 και όχι 0,65, ο συντελεστής αποβολής θερμότητας θα ήταν ίσος με $0,2 \text{ W/cm}^2$ με αποτέλεσμα το φαινόμενο της θέρμανσης του στάτη να μην εμφανίζεται τόσο έντονα. Ο συντελεστής πλήρωσης λοιπόν των πηνίων παίζει το ρόλο του σε αυτήν την περίπτωση, καθώς η λάθος εκτίμησή του μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα τυλίγματα που υπερθερμαίνονται.

6.2.1.3. Μέτρηση της αντίστασης του τυλίγματος

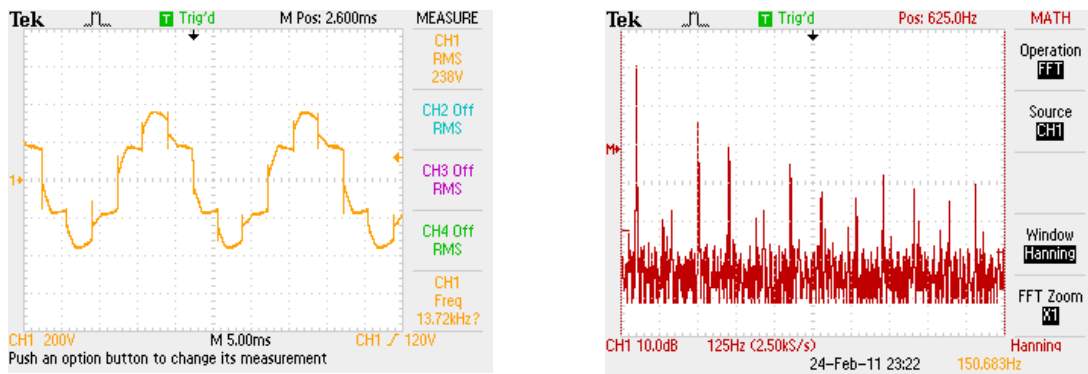
Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να μετρηθεί η αντίσταση του τυλίγματος της γεννήτριας όταν αυτή είναι ζεστή. Αποσυνδέουμε εντελώς τη γεννήτρια και με ένα τροφοδοτικό δίνουμε κάποια ρεύματα σε κάθε φάση και παρατηρούμε την τάση που αναπτύσσει το τροφοδοτικό. Στη συνέχεια με το νόμο του Ohm υπολογίζεται για κάθε φάση η αντίσταση. Οι μετρήσεις φαίνονται στον Πίνακα 6.6. Ο μέσος όρος της αντίστασης είναι ίσος με 8.39Ω . Η τιμή που περιμέναμε από τη θεωρία ήταν 7.3Ω σε χαμηλή όμως θερμοκρασία.

Φάση A		
I (A)	V _A (V)	R _A (Ω)
1,01	8,5	8,42
2,02	17	8,42
3,01	25,5	8,47
3,5	29,8	8,51
Φάση B		
I (A)	V _B (V)	R _B (Ω)
1	8,3	8,30
2,01	16,8	8,36
3,01	25,3	8,41
3,5	29,6	8,46
Φάση C		
I (A)	V _C (V)	R _C (Ω)
1,01	8,4	8,32
1,99	16,6	8,34
3,01	25,1	8,34
3,48	29,3	8,42
R _{AVG} (Ω)	8.39	

Πίνακας 6.6: Μέτρηση της αντίστασης κάθε φάσης του τυλίγματος.

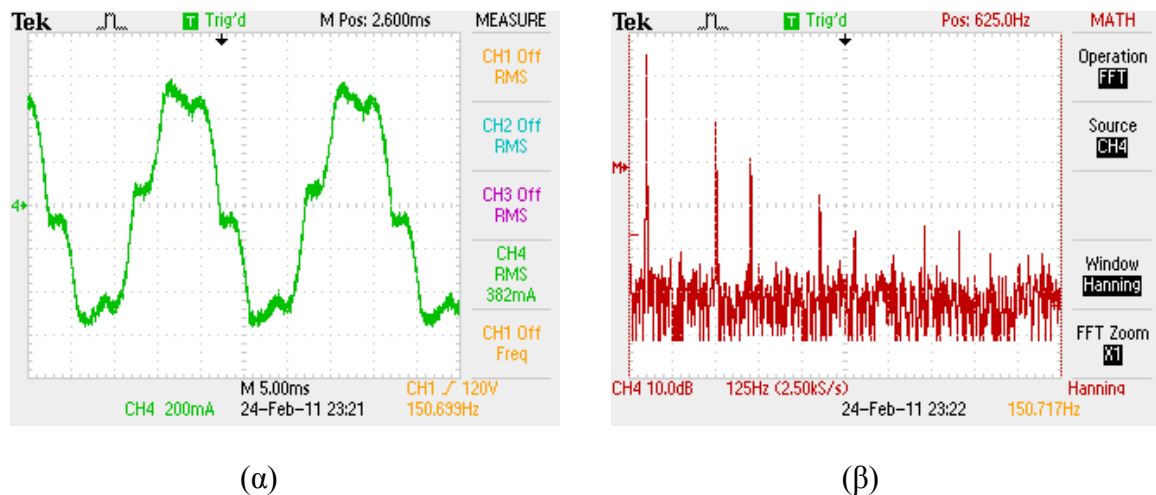
6.2.1.4. Μέτρηση της γεννήτριας υπό μονοφασικό φορτίο

Στο σημείο αυτό η γεννήτρια συνδέεται και πάλι με τον ανορθωτή προκειμένου εξετασθεί η λειτουργία της υπό μονοφασικό φορτίο. Στρέφουμε τη γεννήτρια στις ονομαστικές της στροφές και μεταβάλλουμε το φορτίο μέχρι να προκύψει ονομαστικό ρεύμα. Η κυματομορφή τερματικής τάσης είναι πολύ αλλοιωμένη λόγω του ανορθωτή και φαίνεται στο σχήμα 6.20 μαζί με την ανάλυση Fourier που δείχνει πόσο έχουν αυξηθεί οι αρμονικές.



Σχήμα 6.20: (α) Η τερματική τάση της γεννήτριας με την προσθήκη ανορθωτή και (β) οι αρμονικές της.

Στο σχήμα 6.21 φαίνεται η αντίστοιχη κυματομορφή του ρεύματος η οποία περιλαμβάνει επίσης πολλές αρμονικές.



(α)

(β)

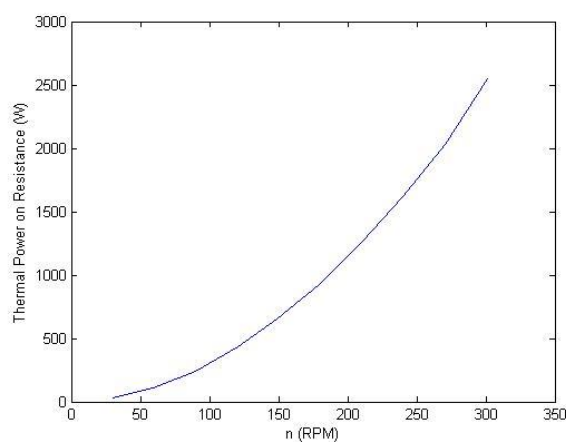
Σχήμα 6.21: (α) Η κυματομορφή του ρεύματος με την προσθήκη ανορθωτή και (β) οι αρμονικές του.

Στο σημείο αυτό του πειράματος μετράται το φορτίο ίσο με 107.46Ω και εξετάζεται η λειτουργία της γεννήτριας σε περίπτωση που είχε αυτό το φορτίο σταθερά στην έξοδό της (εφαρμογή θέρμανσης). Έτσι σταδιακά μειώνονται οι στροφές και μετρώνται οι τάσεις αλλά και τα ρεύματα τόσο στην AC όσο και στην DC πλευρά. Η

γεννήτρια παρουσίασε θόρυβο από τις 200 στροφές περίπου και μετά. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 6.7, ενώ ταυτόχρονα υπολογίζεται η ισχύς της γεννήτριας σε σχέση με τις στροφές της η γραφική παράσταση της οποίας φαίνεται στο σχήμα 6.22.

n (RPM)	VtA (V)	VtB (V)	VtC (A)	Vt avg (V)	Iac (A)	Vdc (V)	Idc (A)	Pac (W)	Pdc (W)
30.42	24.2	24.2	24.6	24.33	0.269	54.4	0.50	19.6	27.2
58.98	46.8	48.1	47.0	47.30	0.672	105.3	1.00	95.4	105.3
90.00	71.4	71.2	71.6	71.40	1.13	159.6	1.52	242.0	242.6
120.60	96.4	96.2	96.2	96.27	1.54	212.3	2.06	444.8	437.3
148.80	119.0	118.0	117.0	118.00	1.91	260.1	2.52	676.1	655.5
179.76	143.0	143.0	141.0	142.33	2.31	310.3	2.98	986.4	924.7
210.18	158.0	168.0	169.0	165.00	2.57	361.5	3.47	1272.1	1254.4
239.52	187.0	187.0	186.0	186.67	3.06	409.3	3.96	1713.6	1620.8
270.36	215.0	215.0	202.0	210.67	3.46	458.6	4.43	2186.7	2031.6
301.38	236.0	237.0	237.0	236.67	3.86	519.7	4.91	2740.6	2551.7

Πίνακας 6.7: Η τάση, το ρεύμα και η ισχύς της γεννήτριας σε σχέση με τις στροφές για σταθερό ωμικό φορτίο 107.46 Ω.



Σχήμα 6.22: Η ισχύς της γεννήτριας σε σχέση με τις στροφές για σταθερό ωμικό φορτίο.

6.2.1.5: Τα ονομαστικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας

Από την πειραματική διαδικασία μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι τα ονομαστικά μεγέθη της γεννήτριας απέχουν αρκετά από αυτά που θεωρήθηκαν στην αρχή. Αυτό επηρεάζει κυρίως την ακτίνα της φτερωτής που θα χρησιμοποιηθεί, καθώς η τελευταία έχει υπολογιστεί ώστε να αποδίδει μηχανική ισχύ ίση με 3330 W (ηλεκτρική ίση με 3 kW) ενώ η ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας στον ίδιο άνεμο (10m/s) υπολογίζεται ίση με 2750 W περίπου. Η φτερωτή που υπολογίστηκε λοιπόν αρχικά δεν ταιριάζει στη συγκεκριμένη γεννήτρια και πρέπει να υπολογιστεί ξανά.

Στο εργαστήριο φάνηκε ότι η ονομαστική ΗΕΔ είναι περίπου ίση με 291 V και επιτυγχάνεται στις 316 RPM που είναι και οι νέες ονομαστικές στροφές. Αν ο λόγος ακροπερυγίου θεωρήσουμε ότι διατηρείται σταθερός λόγω λειτουργίας MPPT, τότε μπορούμε να γράψουμε:

$$\lambda_{opt} = \frac{2\pi n_{nom}}{60} \frac{R}{v_{wnom}} \rightarrow \frac{R}{v_{wnom}} = \frac{\lambda_{opt} 60}{2\pi n_{nom}} \rightarrow \frac{R}{v_{wnom}} = 0.2116$$

Απαιτώντας μηχανική ισχύ ίση με 3330 W λαμβάνουμε:

$$P_{air} = \frac{1}{2} \rho c_p \pi R^2 v_{wnom}^3 \rightarrow R^2 v_{wnom}^3 = 5050.045$$

Λύνοντας το σύστημα των παραπάνω δύο εξισώσεων βρίσκουμε:

$$R = 2.17m \text{ και } v_{wnom} = 10.241m$$

Η γεννήτρια θα μπαίνει στο σύστημα και πάλι στα 200 V DC άρα στα 85 V AC, οπότε για τις στροφές και τον άνεμο σε cut-in μπορούμε να γράψουμε:

$$n_{cutin} = \frac{E_{fcutin}}{E_{fnom}} n_{nom} \rightarrow n_{cutin} = 93 \text{ RPM}$$

$$v_{wcutin} = \frac{2\pi R n_{cutin}}{60 \lambda_{opt}} \rightarrow v_{wcutin} = 3.02 \text{ m/s}$$

Τα αποτελέσματα όσον αφορά το εύρος λειτουργίας της ανεμογεννήτριας είναι αρκετά κοντινά στις αρχικές υποθέσεις και δε δημιουργούν κάποιο πρόβλημα όσον αφορά την πρακτική λειτουργία της ανεμογεννήτριας.

6.2.1.6: Συμπεράσματα

Φαίνεται από τα παραπάνω ότι η απόκλιση μεταξύ προσομοίωσης και πειραματικών μετρήσεων είναι πολύ μεγάλη. Αυτό δημιουργεί προβληματισμό και έτσι οι διαστάσεις της γεννήτριας μετρώνται εκ νέου προκειμένου να διαπιστωθούν τυχόν αποκλίσεις που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την προσομοίωση.

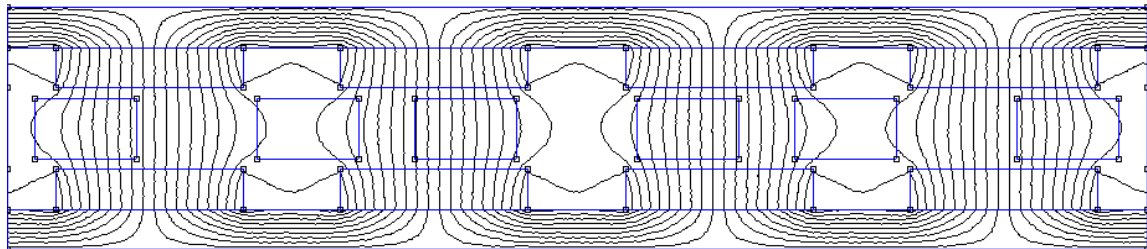
Η πρώτη προφανής διαφορά αφορά στο τύλιγμα. Όπως είδαμε και παραπάνω τα πηνία δεν εφάπτονται μεταξύ τους και προέκυψαν μικρότερα λόγω το μεγάλου συντελεστή πλήρωσης. Καθώς το εμβαδόν που σχηματίζεται από το χαλκό του ενός πηνίου δε μεταβάλλεται η λογική επιτάσσει ότι και η ΗΕΔ δε θα πρέπει να μεταβάλλεται. Παρ' όλα αυτά η νέα διάταξη προσομοιώνεται και προκύπτει όντως ότι η διαφορά αυτή δεν είναι υπεύθυνη για τη χαμηλή ισχύ που προκύπτει στην έξοδο.

Η δεύτερη διαφορά έχει να κάνει με το διάκενο. Τα δύο προβλήματα που εμφανίζονται είναι ότι τα πηνία υπολογίζονται στην προσομοίωση να έχουν πάχος 13.77 mm αλλά τελικά προκύπτουν στα 15 mm λόγω ατέλειας στο εργαλείο τυλίγματος. Επίσης, οι μεγάλοι δίσκοι δεν είναι παντού παράλληλοι μεταξύ τους με

αποτέλεσμα το διάκενο που στην προσομοίωση θεωρείται 3 mm να είναι στην πραγματικότητα ίσο με 2.463 mm. Η μία διαφορά τείνει να εξισορροπήσει την άλλη αλλά τελικά η συνολική απόσταση μεταξύ των μαγνητών είναι μεγαλύτερη από αυτή της προσομοίωσης. Αποτέλεσμα αυτού είναι τα χαμηλότερα πεδία στο τύλιγμα και άρα η μικρότερη ΗΕΔ, τερματική τάση και ισχύς.

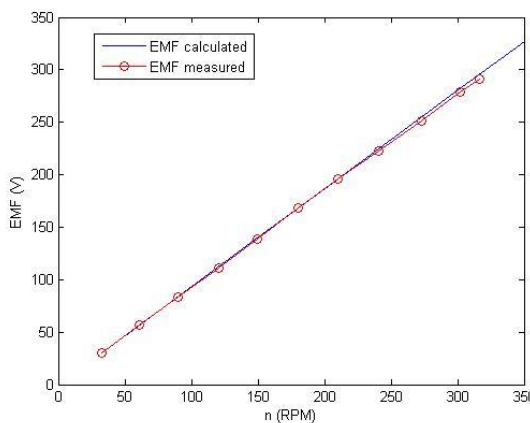
Ένας τελευταίος παράγοντας έχει να κάνει με την αντίσταση και την αυτεπαγωγή του τυλίγματος. Η αντίσταση έχει μετρηθεί σχετικά κρύα και υπολογίζεται ξανά με βάση τη θεωρία για λειτουργία στους 70°C (κάθε πηνίο μετρήθηκε πριν από τη συναρμολόγηση της γεννήτριας στα 1.6 Ω) ίση με 9.1 Ω/φάση ενώ η αυτεπαγωγή, η οποία έχει σχετικά μικρή επίδραση, δεν έχει μετρηθεί αλλά εκτιμάται από θεωρητική σχέση.

Αντικαθιστώντας όλα τα παραπάνω προκύπτει η εξής διάταξη:

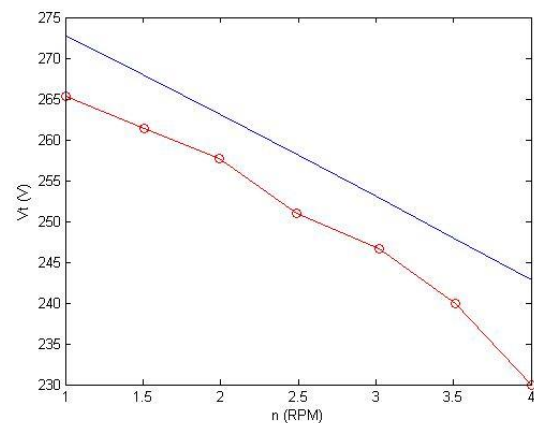


Σχήμα 6.23: Η διάταξη που τελικά κατασκευάστηκε προσομοιώνεται ξανά.

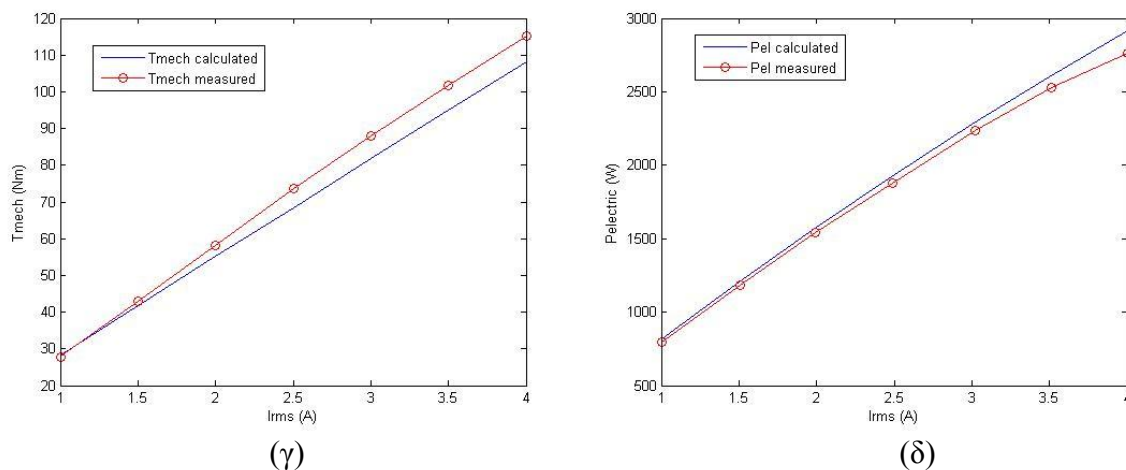
Η προσομοίωση της διάταξης αυτής δίνει τα εξής αποτελέσματα όσον αφορά την ΗΕΔ, την τερματική τάση, την ισχύ και τη ροπή:



(α)



(β)



Σχήμα 6.24: Η διάταξη προσομοιώνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια και προκύπτουν (α) η ΗΕΔ, (β) η θερματική τάση, (γ) η μηχανική ροπή και (δ) η ισχύς στην έξοδο.

Τα αποτελέσματα της νέας προσομοίωσης απέχουν λιγότερο από τα εργαστηριακά. Πιο συγκεκριμένα το σφάλμα στην ΗΕΔ είναι πλέον 1.4% (4.4%), το σφάλμα στην θερματική τάση είναι 5.5% (8.4%), το σφάλμα στην ισχύ είναι 5.5% (8.5%) και το σφάλμα στη ροπή μεγάλωσε στο 6.3% (4.07%). Όσον αφορά τη ροπή, οι εργαστηριακές μετρήσεις που έγιναν μπορεί να περιέχουν ούτως ή άλλως σφάλματα καθώς το ροπόμετρο που χρησιμοποιήθηκε δεν ήταν κατάλληλο για όλες τις ροπές. Λάθος μέτρηση της ροπής οδηγεί και σε λάθος μέτρηση της απόδοσης. Τέλος, και βλέποντας ότι η ΗΕΔ έχει πολύ μικρό σφάλμα μπορούμε να βγάλουμε το συμπέρασμα ότι το σφάλμα στην θερματική τάση έχει να κάνει κυρίως με κακό υπολογισμό της αντίστασης και της αυτεπαγωγής του τυλίγματος.

Το κόστος της γεννήτριας όπως αυτό προβλέφθηκε και όπως προέκυψε τελικά φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (οι τιμές σε ευρώ):

	Αγορά	Προσομοίωση
Μαγνήτες	205	212
Χαλκός	139,35	76,58
Σίδηρος	44,42	34,53
Ξύλο	125,10	79,64
Ρητίνη	24,71	13,07
Συνολικά	538,58	416
Επιπλέον κόστη που δε μελετήθηκαν στην προσομοίωση		
Ρουλεμάν		110
Ντίζες, Βίδες κλπ		19,77
Τελικό κόστος		668,35

Μεγάλη διαφορά παρατηρείται στο χαλκό, διαφορά η οποία εξηγείται αφενός από την αλλαγή μέσα σε λίγους μήνες της τιμής του χαλκού, αφετέρου από την κατασκευή 3 ακόμα πηνίων τα οποία δε χρησιμοποιήθηκαν καθώς δεν κατασκευάστηκαν σωστά.

Οι διαφορές τόσο στο σίδηρο όσο και στο ξύλο αφορούν τη φύρα, το κόστος της οποίας δεν υπολογίστηκε. Για το ξύλο πιο συγκεκριμένα το κόστος αυτό είναι αρκετά μεγάλο. Το κόστος της ρητίνης είναι και αυτό μεγαλύτερο καθώς δεν έχει συνυπολογιστεί το κόστος του καταλύτη, των υαλονημάτων και της θερμοαπαγωγικής σκόνης. Τέλος, και προκειμένου να προκύψει το τελικό κόστος της γεννήτριας θα πρέπει να προστεθούν τα σταθερά (ανεξάρτητα από τη διαστασιολόγηση) κόστη του ρουλεμάν και των ντιζών, βιδών κλπ. Κρίνοντας από τα παραπάνω μπορούμε να συνάγουμε ότι πρέπει να υπάρξει καλύτερος υπολογισμός του κόστους λαμβάνοντας υπόψη τις αλλαγές των τιμών καθώς και τη φύρα.

Το κόστος ανά kW της γεννήτριας είναι ίσο με 223 €. Στο κόστος αυτό όμως δεν έχει συνυπολογιστεί η ανθρώπινη εργασία που χρησιμοποιήθηκε. Πρέπει λοιπόν κανείς να λάβει υπόψη ότι χρειάστηκαν επιπλέον περίπου 280 εργατοώρες για την ολοκλήρωση της κατασκευής που περιλαμβάνει τη γεννήτρια και μόνο.

7.Σύνδεση Ανεμογεννητριών

Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετηθούν οι δύο τρόποι σύνδεσης μιας ανεμογεννήτριας, η AC και η DC σύνδεση. Θα γίνει βιβλιογραφική αναφορά στις συνδέσεις αυτές και θα μελετηθούν τα τμήματα από τα οποία αποτελούνται.

7.1. Μικροδίκτυα

7.1.1. Γενικά, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Ο τομέας της παραγωγής ενέργειας τα τελευταία χρόνια διογκώνεται ολοένα καθώς αυξάνονται οι ενεργειακές ανάγκες της κοινωνίας. Ωστόσο, η ανεξέλεγκτη αυτή ανάπτυξη έχει οδηγήσει σε μεγάλα περιβαλλοντικά και κοινωνικά προβλήματα. Η υπερθέρμανση του πλανήτη μέσω του φαινομένου του θερμοκηπίου είναι πλέον γεγονός και θα έχει καταστροφικές συνέπειες άμα εξακολουθήσει. Ο τομέας παραγωγής ενέργειας συμβάλλει στο φαινόμενο με την έκλυση διοξειδίου του άνθρακα καθώς και άλλων ρύπων. Πέραν του φαινομένου του θερμοκηπίου μολύνεται ο αέρας αλλά και το νερό δημιουργώντας έτσι δύσκολες συνθήκες διαβίωσης για την ίδια την ανθρωπότητα στο όνομα της οποίας γίνεται όλη αυτή η ανάπτυξη.

Επιπλέον προβλήματα δημιουργούνται από τα ορυκτά καύσιμα που συνήθως χρησιμοποιούνται σε συμβατικούς σταθμούς παραγωγής και δεν είναι ανεξάντλητα. Εκτός των περιβαλλοντικών ζητημάτων, υπάρχουν και κοινωνικά, όπως οι ενεργειακές κρίσεις των δεκαετιών '70 και '80. Ακόμα μεγαλύτερα προβλήματα δημιουργούνται όσον αφορά την αγορά πετρελαίου, όπου η εξασφάλιση φθηνού καυσίμου έχει οδηγήσει ακόμα και σε πολέμους. Τέλος, ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα είναι τεχνολογικού χαρακτήρα και αφορά την απόδοση των συμβατικών εγκαταστάσεων παραγωγής, η οποία είναι πολύ χαμηλή και πρέπει να βελτιωθεί.

Η απάντηση σε όλα τα παραπάνω προβλήματα μπορεί να είναι η οργάνωση της παραγωγής ενέργειας σε μικροδίκτυα. Η διεσπαρμένη παραγωγή, όπως αλλιώς ονομάζεται έχει το βασικό πλεονέκτημα ότι γίνεται πολύ κοντά στα φορτία, με αποτέλεσμα να μειώνονται οι απώλειες κατά τη διανομή αλλά και το κόστος κατασκευής ενός μεγάλου δικτύου. Τα μικροδίκτυα συνήθως αποτελούνται από κάποιο συνδυασμό ανανεώσιμων και συμβατικών πηγών ενέργειας κάνοντας τα εξαιρετικά φιλικά προς το περιβάλλον. Η παραγωγή οργανώνεται ανάλογα με τη διαθεσιμότητα πρωταρχικών πηγών σε κάθε περιοχή και περιλαμβάνει και τη συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας.

Γενικά τα μικροδίκτυα μπορούν να επικοινωνούν με το κεντρικό δίκτυο ή και να λειτουργούν αυτόνομα. Μπορεί να περιλαμβάνουν φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες, μικρά υδροηλεκτρικά, γεννήτριες Diesel, κυψέλες καυσίμου κ.ά. αλλά και μονάδες αποθήκευσης όπως συσσωρευτές ή σφονδύλους. Όταν λειτουργούν αυτόματα πρέπει να ρυθμίζονται διαρκώς τα επίπεδα τάσης και συχνότητας καθώς και να γίνεται η

σωστή διαχείριση της ισχύος. Μπορεί όμως να υπάρχει και αλληλεπίδραση με το κεντρικό δίκτυο, οπότε το μικροδίκτυο ρυθμίζεται με βάση το τελευταίο και μπορεί να ανταλλάσσει ενέργεια σε περίπτωση που έχει έλλειψη ή περίσσεια.

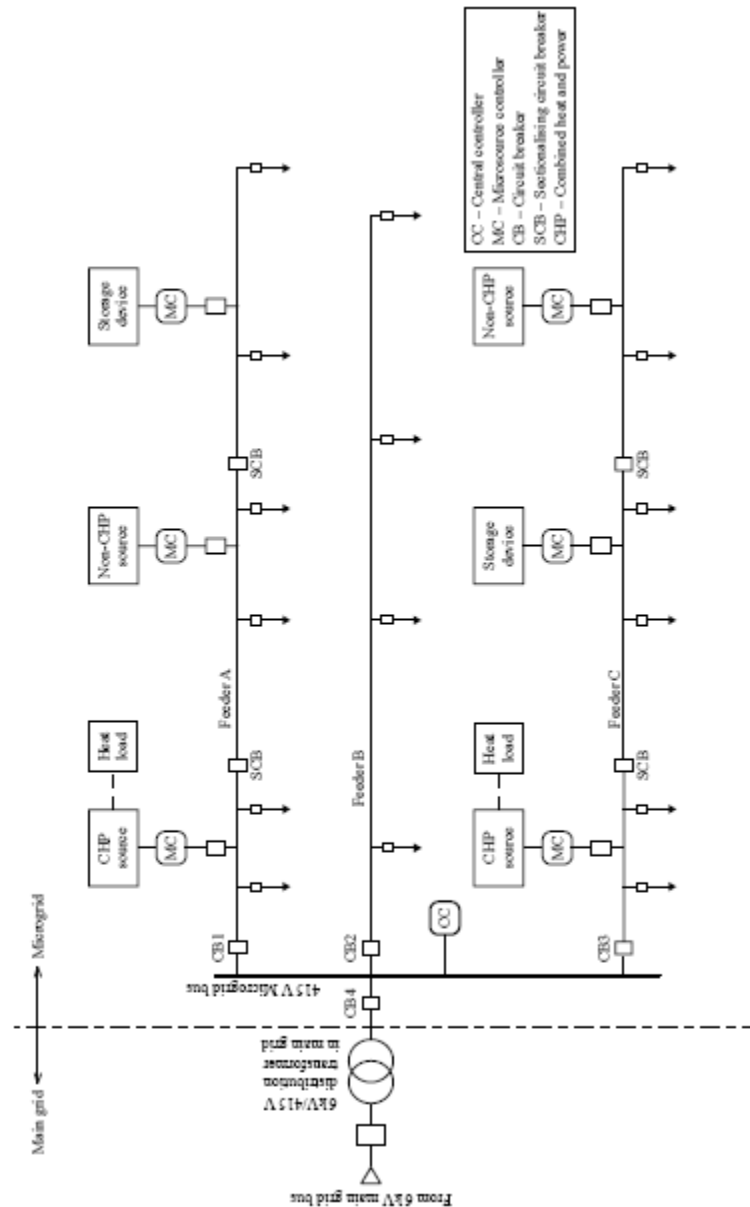
7.1.2. Διάταξη τυπικού μικροδικτύου

Ένα τυπικό μικροδίκτυο φαίνεται στο σχήμα 7.1 και αναλύεται στο [40]. Αποτελείται από φορτία και μικροπηγές που συνδέονται μέσω ενός LV δικτύου (≤ 1 kV). Τα φορτία (ιδιαίτερα τα θερμικά) και οι πηγές τοποθετούνται κοντά μεταξύ τους προκειμένου να μειωθούν οι θερμικές απώλειες κατά τη διανομή. Το συγκεκριμένο μικροδίκτυο αποτελείται από τρεις κλάδους A, B και C (feeders) για την τροφοδοσία. Έχει δύο μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (CPH) καθώς και δύο μονάδες στις οποίες δε συμβαίνει συμπαραγωγή (non-CPH). Επιπλέον διαθέτει μέσα αποθήκευσης. Οι μικροπηγές καθώς και τα μέσα αποθήκευσης συνδέονται στους κλάδους A και C μέσω ελεγκτών (microsource controllers-MC). Από τα φορτία κάποια θεωρούνται προτεραιότητας (διαρκής τροφοδοσία) ενώ άλλα όχι.

Το μικροδίκτυο συνδέεται με το δίκτυο μέσης τάσης (MV) μέσω του διακόπτη CB4 στο σημείο κοινής ζεύξης (point of common coupling-PCC). Μέσω αυτού του διακόπτη ελέγχεται η επικοινωνία με το κεντρικό δίκτυο. Τέτοιοι διακόπτες υπάρχουν και για να ελέγχουν τους κλάδους του μικροδικτύου (CB1, CB2, CB3). Οι πηγές δεν είναι συνδεδεμένες στο ζυγό του μικροδικτύου αλλά είναι απομακρυσμένες προκειμένου να μειωθούν οι θερμικές απώλειες, να βελτιωθεί η ποιότητα της τάσης και να χρησιμοποιηθεί με βέλτιστο τρόπο η αποβολή θερμότητας.

Το μικροδίκτυο έχει δύο τρόπους λειτουργίας: Λειτουργία με σύνδεση στο δίκτυο (grid-connected) και απομονωμένη λειτουργία (stand-alone). Στην πρώτη περίπτωση το μικροδίκτυο παραμένει συνδεδεμένο (ή μερικώς συνδεδεμένο) με το κεντρικό δίκτυο και ανταλλάσσει ενέργεια με αυτό. Αν υπάρξει κάποια ανωμαλία στη λειτουργία του κεντρικού δικτύου τότε το μικροδίκτυο αλλάζει τη λειτουργία του σε απομονωμένη, ενώ τροφοδοτεί διαρκώς τα φορτία προτεραιότητας. Αυτό επιτυγχάνεται είτε ανοίγοντας το διακόπτη CB4 ή ανοίγοντας τους διακόπτες CB1 και CB3 και απομονώνοντας τους αντίστοιχους κλάδους. Στην πρώτη περίπτωση το μικροδίκτυο θα λειτουργεί σαν ένα αυτόνομο δίκτυο ενώ στη δεύτερη θα τροφοδοτούνται μόνο τα φορτία προτεραιότητας στους κλάδους A και C ενώ ο κλάδος B αφήνεται να ξεπεράσει την ανωμαλία του δικτύου.

Η λειτουργία και διαχείριση του μικροδικτύου γίνεται μέσω των ελεγκτών μικροπηγών MCs καθώς και του κεντρικού ελεγκτή (Central Controller-CC) που περιγράφονται παρακάτω:



Σχήμα 7.1: Η διάταξη ενός τυπικού μικροδικτύου.

1) Ελεγκτής Μικροπηγών (Microsource Controller-MC): Κεντρική του λειτουργία είναι να ελέγχει αυτόνομα τη ροή ισχύος όπως επίσης και την τάση στην έξοδο των πηγών σε κάθε ανωμαλία ή μεταβολή φορτίου στο μικροδίκτυο. Αυτόνομος έλεγχος σημαίνει έλεγχος χωρίς την επικοινωνία με τον κεντρικό ελεγκτή CC. Επίσης ο ελεγκτής αυτός συμμετέχει στον οικονομικότερο προγραμματισμό της παραγωγής, τον έλεγχο των φορτίων και των μέσων αποθήκευσης. Επίσης εξασφαλίζει ότι κάθε πηγή αμέσως θα παράγει την ισχύ εκείνη που απαιτείται στην περίπτωση απομονωμένης λειτουργίας και ότι άμεσα θα επανέρχεται σε λειτουργία σύνδεσης στο δίκτυο όταν χρειάζεται. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό των ελεγκτών αυτών είναι η ταχύτητα αντίδρασης στην αλλαγή ρευμάτων και τάσεων ανεξάρτητα των δεδομένων άλλων τέτοιων ελεγκτών. Έτσι νέες μικροπηγές μπορούν να

τοποθετηθούν στο μικροδίκτυο δίχως να επηρεάζεται ο έλεγχος και η προστασία των άλλων μικροπηγών.

2) Κεντρικός ελεγκτής (Central Controller-CC): Είναι υπεύθυνος για το συνολικό έλεγχο και την προστασία του μικροδικτύου (ελέγχοντας και τους MCs). Στόχοι του είναι: α) η διατήρηση των επιπέδων της τάσης και της συχνότητας στα επιθυμητά επίπεδα μέσω ελέγχου ισχύος-συχνότητας (Power-frequency, P-f) και τάσης και β) η βέλτιστη ενεργειακή λειτουργία του μικροδικτύου. Επιπλέον είναι υπεύθυνος για την προστασία μέσω του συντονισμού των MCs και ορίζει τα σημεία λειτουργίας τους (ισχύς και τάση). Συνήθως λειτουργεί αυτόματα αλλά επιτρέπεται και η χειροκίνητη λειτουργία όταν αυτό κριθεί απαραίτητο. Εκτελεί δύο βασικές λειτουργίες:

A) Ενεργειακός Έλεγχος (Energy Management Module-EMM): Καθορίζει τα σημεία λειτουργίας κάθε MC όσον αφορά την ενεργό και άεργο ισχύ, την τάση και τη συχνότητα. Αυτή η λειτουργία υποστηρίζεται από σύγχρονες τεχνικές τηλεπικοινωνιών και τεχνητής νοημοσύνης. Τα σημεία αυτά καθορίζονται ανάλογα με τις λειτουργικές ανάγκες του μικροδικτύου. Γενικά ο ενεργειακός έλεγχος πρέπει να εξασφαλίζει:

- Ότι οι μικροπηγές τροφοδοτούν ικανοποιητικά τα θερμικά και ηλεκτρικά φορτία.
- Ότι το μικροδίκτυο λειτουργεί ικανοποιητικά ως προς τις απαιτήσεις που θέτει το κεντρικό δίκτυο.
- Ότι το μικροδίκτυο όντως θα μειώνει τις απώλειες του συστήματος καθώς και τις εκπομπές αερίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.
- Ότι οι μικροπηγές θα λειτουργούν με τη μέγιστη απόδοση.

B) Συντονισμός Προστασίας (Protection Co-ordination Module-PCM): πρόκειται για την αντίδραση σε βλάβες του δικτύου ή στην απώλεια αυτού για να εξασφαλιστεί η προστασία του μικροδικτύου. Έχει επίσης να κάνει με την προσαρμογή στα επίπεδα ρεύματος που προκύπτουν κατά την αλλαγή της λειτουργίας από συνδεδεμένη στο δίκτυο σε απομονωμένη. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο υπάρχει κατάλληλη επικοινωνία μεταξύ της λειτουργίας PCM και των MCs. Σε περίπτωση βλάβης στο κεντρικό δίκτυο το PCM οδηγεί το μικροδίκτυο σε απομονωμένη λειτουργία προκειμένου να τροφοδοτούνται τα φορτία προτεραιότητας με χαμηλότερο κόστος. Παρ' όλα αυτά για κάποια μικρά σφάλματα το PCM επιτρέπει στο μικροδίκτυο να παραμείνει για λίγο χρόνο συνδεδεμένο στο δίκτυο μέχρι να διορθωθεί το προσωρινό αυτό σφάλμα. Αν κάποια σφάλμα συμβεί σε κάποιον κλάδο του μικροδικτύου (όπως π.χ. ο A ή ο C) απομονώνεται το μικρότερο δυνατό τμήμα του κλάδου προκειμένου να διασφαλιστεί η τροφοδοσία για τα υγιή τμήματα.

Οι λειτουργίες του κεντρικού ελεγκτή για σύνδεση στο δίκτυο είναι οι εξής:

- Επιβλέπει την ευεξία του συστήματος συγκεντρώνοντας πληροφορίες από τις μικροπηγές και τα φορτία.

- Εκτελεί εκτίμηση της κατάστασης καθώς και του επιπέδου ασφαλείας, οικονομικό προγραμματισμό της παραγωγής και έλεγχο ενεργού και άεργου ισχύος (active and reactive power control) των μικροπηγών και εξάγει συναρτήσεις για τη ζήτηση των φορτίων χρησιμοποιώντας πληροφορίες που έχει συγκεντρώσει.
- Εξασφαλίζει συγχρονισμένη με το κεντρικό δίκτυο λειτουργία διατηρώντας την ανταλλαγή ισχύος στα συμφωνημένα.

Οι λειτουργίες του κεντρικού ελεγκτή για απομονωμένη σύνδεση είναι οι εξής:

- Έλεγχος ενεργού και άεργου ισχύος των μικροπηγών προκειμένου να εξασφαλιστεί σταθερή τάση και συχνότητα στα φορτία.
- Να υιοθετεί στρατηγικές διακοπής φορτίων και διαχείρισης φορτίων.

7.2. Τρόποι σύνδεσης ανεμογεννητριών

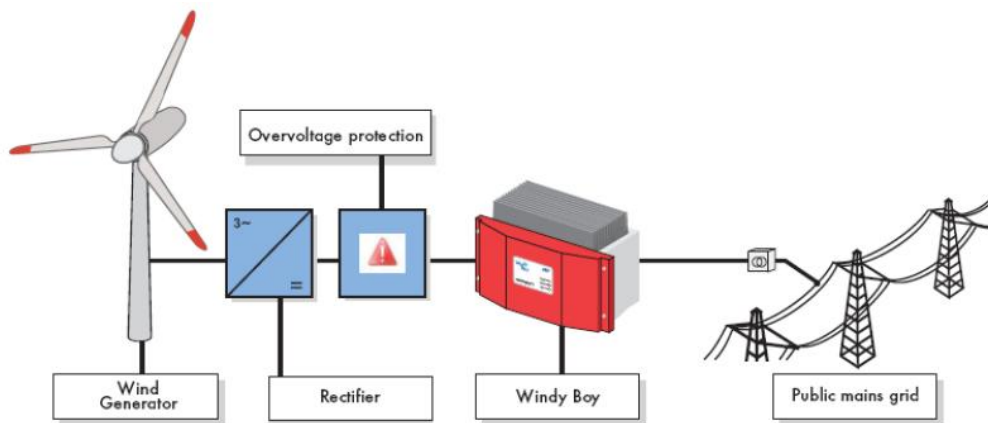
Οι πηγές που εμφανίζονται πιο συχνά σε ένα μικροδίκτυο είναι τα φωτοβολταϊκά και οι μικρές ανεμογεννήτριες. Το μικροδίκτυο μπορεί να αναφέρεται σε μια κοινότητα αλλά ακόμα και σε μία μόνο οικία η οποία τροφοδοτείται για παράδειγμα από μια γεννήτρια Diesel, φωτοβολταϊκά και μικρές Α/Γ. Η σύνδεση των πηγών μπορεί να γίνει στο ζυγό AC του μικροδικτύου (εναλλακτικά στο ζυγό χαμηλής τάσης του δικτύου) ή σε έναν ζυγό DC ο οποίος περιλαμβάνει μέσα αποθήκευσης. Οι δύο συνδέσεις εφαρμόζονται και έχουν η καθεμία τα πλεονεκτήματά της σε διαφορετικές περιπτώσεις που θα αναλυθούν παρακάτω.

7.2.1. Η AC σύνδεση

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η AC σύνδεση αναφέρεται στη σύνδεση της Α/Γ στον AC ζυγό ενός μικροδικτύου. Η σύνδεση γίνεται μέσω ενός αντιστροφέα (MC). Ομοίως συμβαίνει και όταν η σύνδεση γίνεται στο δίκτυο. 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. Αυτό καθιστά την AC σύνδεση κατάλληλη για ένα μεγάλο μικροδίκτυο (οικισμός) και όχι για το μικροδίκτυο μιας οικίας. Επιπλέον, τα υψηλά επίπεδα τάσης οδηγούν σε χαμηλότερες απώλειες. Φυσικά θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και το κόστος ηλεκτρονικών ισχύος όπως είναι οι ελεγκτές που αναφέρθηκαν παραπάνω αλλά και άλλα ηλεκτρονικά όπως αυτά που περιγράφονται στη συνέχεια:

7.2.1.1. Η γενική δομή της AC σύνδεσης

Η γενική δομή της AC σύνδεσης μπορεί να περιγραφεί με το παρακάτω σχήμα:



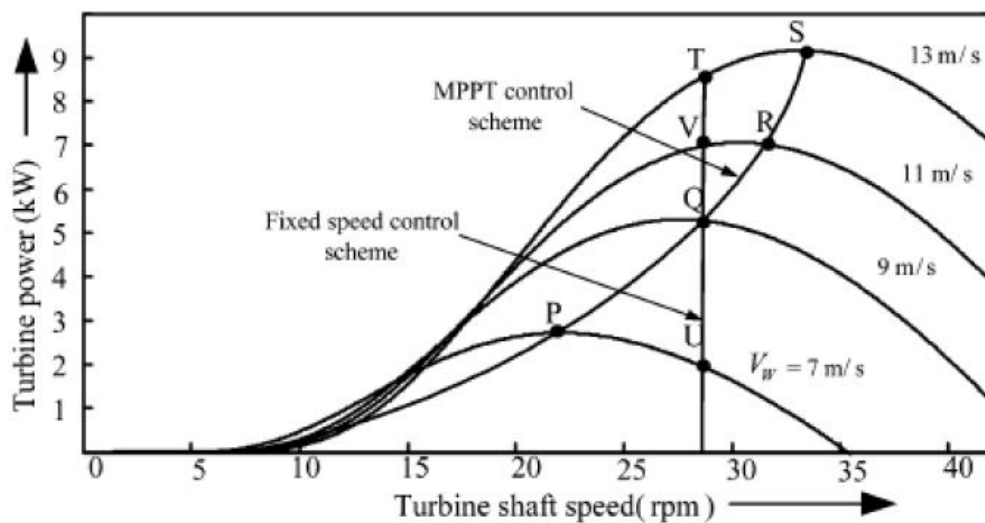
Σχήμα 7.2: Η γενική δομή της AC σύνδεσης.

Η γεννήτρια είναι σύγχρονη τριφασική και η έξοδος της αρχικά ανορθώνεται και γίνεται DC με μια μη ελεγχόμενη τριφασική ανόρθωση γέφυρας. Στη συνέχεια περνά από έναν μονοφασικό αντιστροφέα στον οποίο είναι ενσωματωμένος ένας DC/DC μετατροπέας που εκτελεί τη σημαντικότερη διεργασία του MPPT που θα αναλυθεί αργότερα στο κεφάλαιο αυτό. Αφού η έξοδος γίνει και πάλι AC μέσω του αντιστροφέα όλο το σύστημα συνδέεται στο δίκτυο.

Στο ίδιο σχήμα φαίνεται μια προστασία υπέρτασης. Η προστασία αυτή συνοδεύει συνήθως τον ανορθωτή και προστατεύει τον αντιστροφέα από υπερτάσεις αλλά και την έλικα από ανάπτυξη μεγάλων επιταχύνσεων. Πρόκειται ουσιαστικά για ένα απορριπτικό φορτίο (dump load). Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται η ΗΕΔ της γεννήτριας (ανάλογα με τις στροφές) και άρα και η τερματική της τάση, η τάση δηλαδή που βλέπει ο ανορθωτής και κατά συνέπεια ο αντιστροφέας ο οποίος χρειάζεται προστασία. Έτσι όταν φυσήξει πάνω από τα ονομαστικά και πριν δράσει το σύστημα Furling για να μειώσει την ισχύ, η γεννήτρια θα δώσει ισχύ στο απορριπτικό φορτίο, έτσι θα περάσουν μεγαλύτερα ρεύματα από το τύλιγμά της και θα την επιβραδύνουν αυξάνοντας -την αντίθετη στη ροπή του ανέμου- ηλεκτρομαγνητική ροπή. Είναι σαν η γεννήτρια να βραχυκυκλώνεται αλλά σταδιακά, αφαιρώντας ολοένα αντιστάσεις ώστε να περνάει μεγαλύτερο ρεύμα και η γεννήτρια να φρενάρει [20]. Μάλιστα, για πολύ μικρές γεννήτριες (της τάξης των εκατοντάδων W) ο τρόπος αυτός φρεναρίσματος (βραχυκύκλωση) μπορεί να χρησιμοποιείται φθείροντας όμως έντονα τη γεννήτρια. Γι' αυτό και χρησιμοποιείται το απορριπτικό φορτίο. Η συσκευή αυτή είναι εξαιρετικά χρήσιμη για προστασία και κατά τη διάρκεια που ο αντιστροφέας συγχρονίζει με το δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή η γεννήτρια είναι ανοιχτοκυκλωμένη και άμα φυσήξει πολύ μπορεί να επιταχυνθεί έντονα με αποτέλεσμα τη φθορά της. Μία ακόμα εφαρμογή σύμφωνα με το [11] υπάρχει στην περίπτωση εκείνη που ξαφνικά για κάποιο λόγο το δίκτυο που τροφοδοτεί η γεννήτρια χαθεί. Τότε η ισχύς παύει να παρέχεται στο δίκτυο και παρέχεται πλέον στο απορριπτικό φορτίο.

7.2.1.2. Μέθοδος μεγιστοποίησης αποδιδόμενης ισχύος (MPPT)

Από τις καμπύλες c_p - λ που αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο 1 για τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά μπορεί κανείς εύκολα να παρατηρήσει ότι υπάρχει ένα συγκεκριμένο λ για το οποίο ο αεροδυναμικός συντελεστής μεγιστοποιείται. Για την τιμή αυτή του λ μεγιστοποιείται συνεπώς η παραγόμενη ισχύς της ανεμογεννήτριας. Αυτό σημαίνει ότι έχοντας σχεδιάσει το διάγραμμα ισχύος-στροφών είναι επιθυμητό η γεννήτρια να λειτουργεί κάθε φορά στο σημείο εκείνο (στροφές-άνεμος) που μεγιστοποιείται η ισχύς ή αλλιώς να ακολουθεί την καμπύλη που ενώνει όλες αυτές τις κορυφές και φαίνεται και στο σχήμα. 7.3. Για λειτουργία στην καμπύλη αυτή το λ παραμένει σταθερό στη βέλτιστη τιμή του και το c_p σταθερό στη μέγιστη τιμή του. Έτσι κάθε φορά παράγεται η μέγιστη ενέργεια.



Σχήμα 7.3: Οι αεροδυναμικές καμπύλες και η καμπύλη του MPPT.

Στο ίδιο σχήμα φαίνεται η καμπύλη που θα ακολουθούσε μια γεννήτρια σταθερών στροφών. Είναι προφανές ότι μια τέτοια γεννήτρια που προκειμένου να συνδεθεί στο δίκτυο απευθείας (και άρα με σταθερή τάση και συχνότητα) δε μεταβάλλει τις στροφές της, δε λειτουργεί πάντα στο σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος. Γι' αυτό και τέτοιες γεννήτριες χρησιμοποιούνται πιο σπάνια. Γιατί η σταθερότητα της συχνότητας και της τάσης επιτυγχάνεται πλέον όχι από τη γεννήτρια αλλά από τα ηλεκτρονικά ισχύος μέσω των οποίων αυτή συνδέεται στο δίκτυο.

Στο σημείο αυτό θα παρουσιαστούν μερικές μέθοδοι με τις οποίες επιτυγχάνεται η λειτουργία MPPT όπως περιγράφηκε παραπάνω. Σύμφωνα με το [41] υπάρχουν δύο βασικές ιδέες:

Κατά την πρώτη μέθοδο εξετάζεται επαναληπτικά η ισχύς που παράγει η ανεμογεννήτρια. Σε κάθε βήμα της επανάληψης και με τη βοήθεια ενός μετατροπέα το φορτίο της γεννήτριας μεταβάλλεται. Η ισχύς που παράγεται σε μια χρονική στιγμή t συγκρίνεται με την ισχύ που παράγεται ένα βήμα αργότερα $t+t_s$. Αν η τελευταία είναι μεγαλύτερη από την επιθυμητή το φορτίο αλλάζει κατάλληλα και

εξακολουθεί να μεταβάλλεται με τον ίδιο τρόπο. Αν η τελευταία τιμή της ισχύος που έχει μετρηθεί είναι μικρότερη από την προηγούμενή της, τότε το φορτίο πρέπει και πάλι να μεταβληθεί έως ότου να βρεθεί η μέγιστη τιμή. Εύκολα καταλαβαίνει κανείς ότι η μέθοδος αυτή είναι χρονοβόρα και στην περίπτωση μιας ανεμογεννήτριας, όπου οι άνεμοι μεταβάλλονται πολύ γρήγορα, σίγουρα θα παρουσιαστούν καθυστερήσεις.

Μια βελτίωση της παραπάνω μεθόδου αναφέρει απλά ότι όταν οι αποκλίσεις από το βέλτιστο είναι μεγάλες, μεγάλες θα είναι και οι μεταβολές στο φορτίο, ενώ όταν η μέθοδος είναι κοντά στο να βρει λύση, οι αποκλίσεις δηλαδή στην ισχύ είναι μικρές, τότε και οι μεταβολές στα φορτία θα πρέπει να είναι μικρές. Έτσι μπορεί η μέθοδος να συγκλίνει πιο γρήγορα.

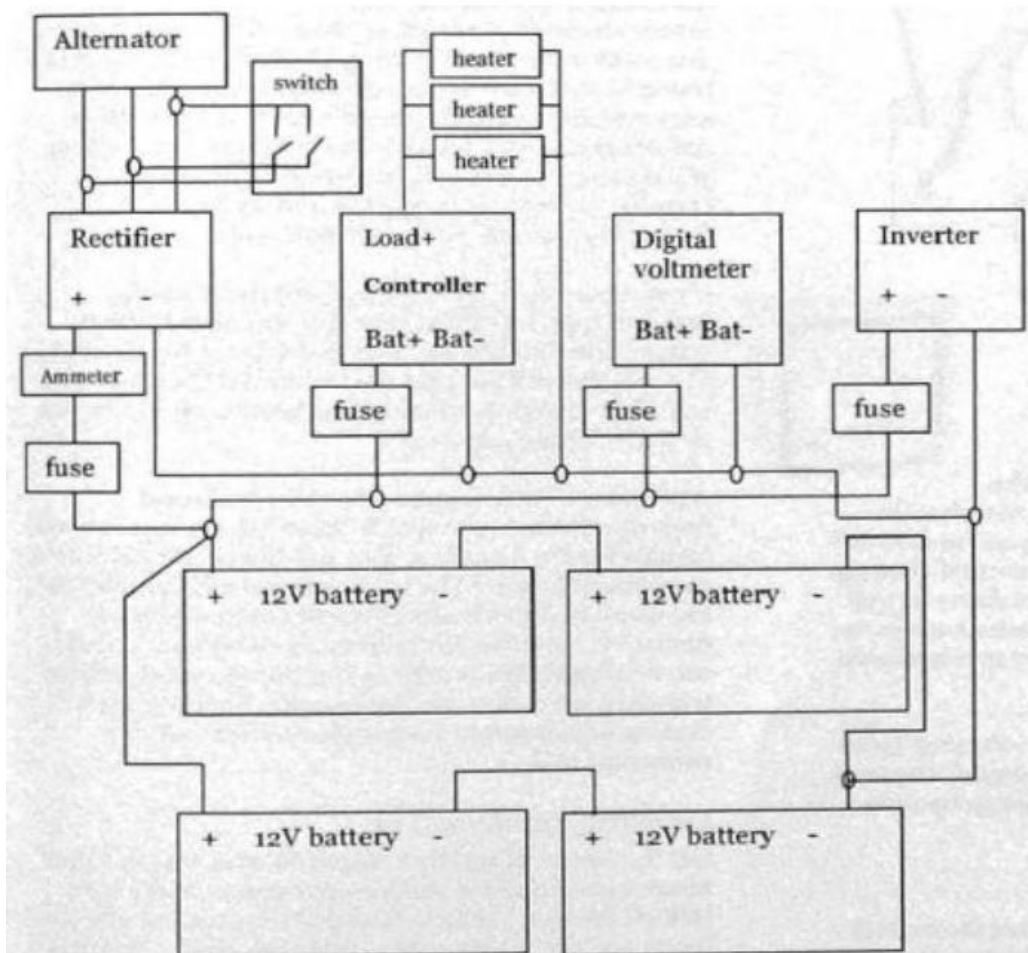
Η δεύτερη ιδέα βασίζεται στην ύπαρξη ενός πίνακα ή μιας εξίσωσης που δίνει τα βέλτιστα φορτία για κάθε άνεμο. Κάθε φορά μετράται με ανεμόμετρο η ταχύτητα του ανέμου και ύστερα, είτε από τους πίνακες, είτε από κάποια εξίσωση, υπολογίζεται το κατάλληλο φορτίο. Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά γρήγορη και χωρίς χρονικές καθυστερήσεις στις ρυθμίσεις της.

7.2.2. Η DC σύνδεση

Στην περίπτωση μιας αυτόνομης εγκατάστασης, όπως π.χ. μια οικία που δε συνδέεται με το δίκτυο, ο καταλληλότερος τρόπος σύνδεσης είναι η DC σύνδεση. Το πλεονέκτημα σε σχέση με την AC σύνδεση είναι ότι αποφεύγονται οι τουλάχιστον δύο αντιστροφείς της AC σύνδεσης (ένας για επικοινωνία με το δίκτυο και ένας για έλεγχο της μικροπηγής). Έτσι το κόστος γίνεται αρκετά μικρότερο. Μια αυτόνομη εγκατάσταση περιλαμβάνει συνήθως φωτοβολταϊκά και μικρές ανεμογεννήτριες που είναι αρκετά εύκολο να εγκατασταθούν ακόμα και σε μία ταράτσα.

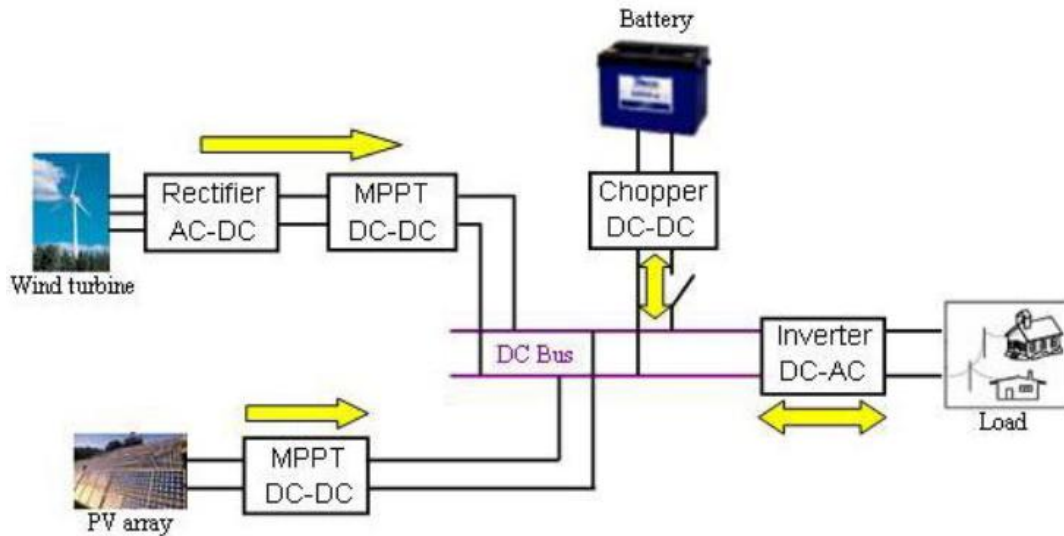
Στη DC σύνδεση όλες οι μικροπηγές συνδέονται άμεσα στον DC ζυγό συσσωρευτών. Στη συνέχεια η τάση των συσσωρευτών αντιστρέφεται και λαμβάνει κατάλληλη τιμή (τάση -συχνότητα) με τη βοήθεια αντιστροφέα πηγής τάσης. Ο αντιστροφέας αυτός στη συνέχεια τροφοδοτεί φορτία. Φυσικά, υπάρχουν και περιπτώσεις που δε χρησιμοποιείται αντιστροφέας. Η συνηθισμένη πάντως σύνδεση έχει ως εξής (σχήμα 7.4): Η τριφασική έξοδος της ανεμογεννήτριας ανορθώνεται από έναν τριφασικό ανορθωτή γέφυρας. Έτσι η τάση γίνεται DC και μπορεί πλέον η γεννήτρια να συνδεθεί στις μπαταρίες. Μεταξύ γεννήτριας και ανορθωτή υπάρχει ένας διπολικός διακόπτης, που στόχο έχει τη βραχυκύκλωση της γεννήτριας έτσι ώστε αυτή να μην περιστρέφεται όταν πρέπει π.χ. να γίνουν εργασίες συντήρησης. Ένας ρυθμιστής φόρτισης συνδέεται επίσης στο σύστημα προκειμένου να ελέγχει 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 αλγόριθμους για τη φόρτιση και εκφόρτισή τους. Αυτή την εργασία εκτελεί ο ρυθμιστής φόρτισης, ο οποίος όταν παρατηρήσει ότι η φόρτιση των μπαταριών έχει πέσει κάτω από ένα επίπεδο θα δώσει εντολή στις πηγές να τις φορτίσουν, ενώ όταν παρατηρήσει ότι οι

μπαταρίες είναι φορτισμένες θα διοχετεύσει την περισσευούμενη ισχύ σε ένα απορριπτικό φορτίο όπου η ισχύς θα μετατραπεί σε θερμότητα με δυνατότητα αυτή να ζεστάνει νερό.



Σχήμα 7.4: Σύνδεση μικρής ανεμογεννήτριας σε σύστημα DC με συσσωρευτές.

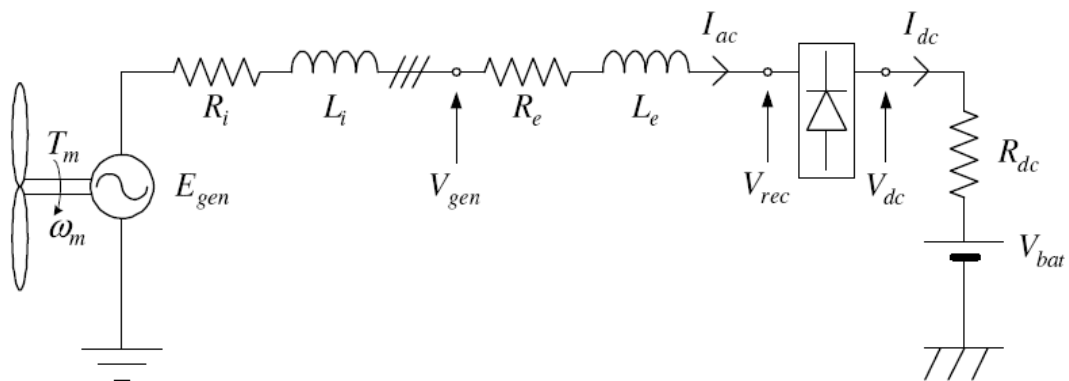
Αυτό που παρατηρεί κανείς στη DC σύνδεση είναι η έλλειψη MPPT. Η σύνδεση της ανεμογεννήτριας απευθείας σε συσσωρευτές έχει ως αποτέλεσμα η τάση της γεννήτριας να παραμένει σταθερή και ίση περίπου με την τάση των συσσωρευτών. Έτσι η τάση δεν μπορεί να μεταβληθεί και να ρυθμιστεί ώστε να αποδίδεται διαρκώς η μέγιστη ισχύς. Η λύση και στο σημείο αυτό είναι ένας DC/DC μετατροπέας που συνδέεται μεταξύ ανορθωτή και συσσωρευτών. Ο αντιστροφέας διατηρεί την τάση στην έξοδό του σταθερή (ίση με των συσσωρευτών) και έχει τη δυνατότητα να ελέγχει την τάση στην είσοδό του (τερματική τάση της γεννήτριας) ώστε η ανεμογεννήτρια να λειτουργεί πάντα για βέλτιστο λ και μέγιστο c_p . Ένα DC σύστημα που περιλαμβάνει ανεμογεννήτριας, φωτοβολταϊκά και εκτελεί και λειτουργία MPPT φαίνεται στο σχήμα 7.5 που ακολουθεί.



Σχήμα 7.5: Ανεμογεννήτρια και φωτοβολταϊκά σε ένα DC σύστημα που εκτελεί λειτουργία MPPT.

7.2.2.1. Σύνδεση απευθείας σε συσσωρευτές-Το μοντέλο της AC ανάλυσης

Στο σημείο αυτό θα αναλυθεί η απευθείας σύνδεση της ανεμογεννήτριας στους συσσωρευτές προκειμένου να μελετηθεί η λειτουργία και τα χαρακτηριστικά της στην περίπτωση αυτή. Η ανάλυση γίνεται στο [17] και έχει ως εξής: Η ανεμογεννήτρια συνδέεται μέσω καλωδίου στον ανορθωτή ο οποίος τροφοδοτεί τις μπαταρίες, που παριστάνονται από μια DC τάση και την εσωτερική τους αντίσταση. Το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα δίνεται στο σχήμα 7.6:



Σχήμα 7.6: Το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας συνδεδεμένης απευθείας σε συσσωρευτές.

όπου:

- R_i η εσωτερική αντίσταση της γεννήτριας. Πρόκειται για την αντίσταση μίας φάσης της γεννήτριας, δηλαδή $R_i = qR_c$ (σχέση (2.9)).

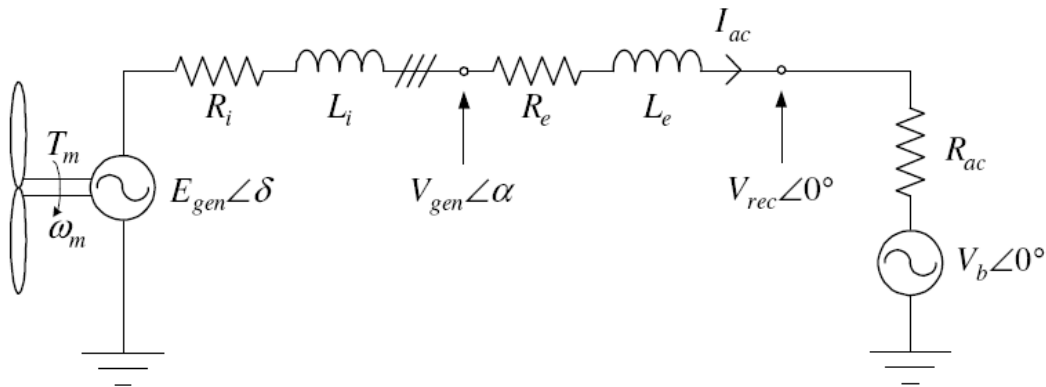
- L_i η αυτεπαγωγή μιας φάσης του τυλίγματος, όπως υπολογίζεται από τη σχέση (2.10).
- R_{cc} και L_{cc} η αντίσταση και αυτεπαγωγή του καλωδίου μέσω του οποίου συνδέεται η γεννήτρια στον ανορθωτή.
- R_{bat} και V_{bat} η εσωτερική αντίσταση και η τάση των συσσωρευτών.

Το σύστημα μπαταρία-ανορθωτής πρέπει να συμπεριλαμβάνει την πτώση τάσης στις διόδους του ανορθωτή V_d και μπορεί να αντικατασταθεί από μια ισοδύναμη πηγή V_b και μια αντίσταση R_{ac} για τα οποία ισχύει:

$$V_b = \frac{\sqrt{2}(V_{bat} + 2V_d)}{\pi}$$

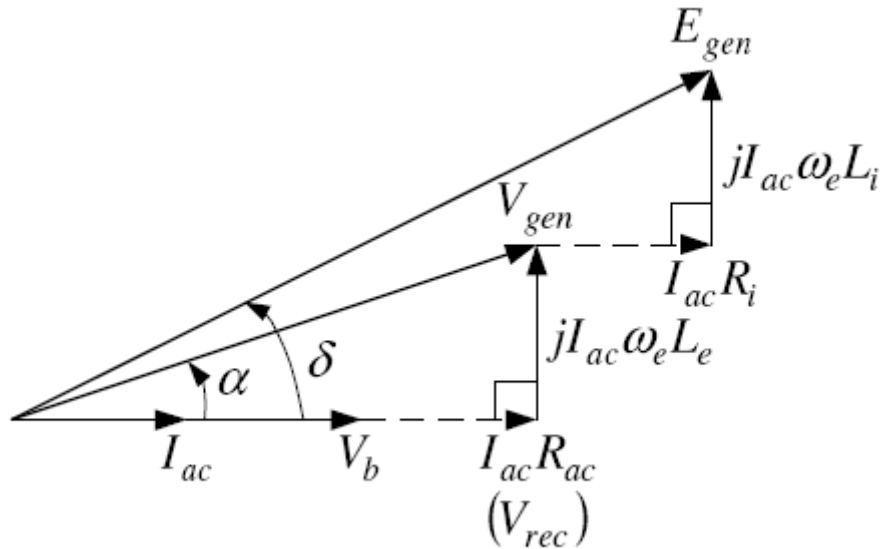
$$R_{ac} = \frac{6R_{bat}}{\pi^2}$$

Ο ανορθωτής επιβάλλει μοναδιαίο συντελεστή ισχύος στην είσοδό του και έτσι η τάση V_{rec} που βλέπει το σύστημα ανορθωτής-μπαταρία έχει γωνία 0° . Ομοίως, το σύστημα θεωρείται ωμικό, οπότε το ίδιο ισχύει για την τάση V_b . Η ύπαρξη όμως των στοιχείων αυτεπαγωγής στα καλώδια και στο τύλιγμα της γεννήτριας έχουν ως αποτέλεσμα να υπάρχει καθυστέρηση, και αντίστοιχη γωνία, στην τερματική τάση V_{gen} με γωνία α και στην ΗΕΔ της γεννήτριας E_{gen} με γωνία δ . Οπότε προκύπτει το ισοδύναμο AC κύκλωμα:



Σχήμα 7.7: Το ισοδύναμο AC κύκλωμα για την απευθείας σύνδεση γεννήτριας σε συσσωρευτές.

Από το παραπάνω κύκλωμα προκύπτει εύκολα το αντίστοιχο διανυσματικό διάγραμμα του σχήματος 7.8:



Σχήμα 7.8: Το διανυσματικό διάγραμμα του συστήματος.

Με δεδομένες όλες τις αντιστάσεις του ισοδύναμου κυκλώματος, καθώς επίσης και την πεπλεγμένη ροή ανά πηνίο Fluxos η ανάλυση του συστήματος γίνεται ως εξής: Οι στροφές της γεννήτριας μεταβάλλονται μέχρι τις ονομαστικές και κάθε φορά υπολογίζεται η συχνότητα, η γωνιακή ταχύτητα (ηλεκτρική και μηχανική) και η ΗΕΔ της γεννήτριας όπως περιγράφεται στα κεφάλαια 2 και 3. Η ανεμογεννήτρια θα ξεκινήσει να δίνει ισχύ στο σύστημα όταν η ΗΕΔ της ξεπεράσει την ισοδύναμη τάση μπαταρίας αντιστροφή V_b . Μέχρι τότε λειτουργεί ανοιχτοκυκλωμένη και αφού δέξει ρεύμα το σύστημα αυτό βλέπει στην είσοδό του την ΗΕΔ της γεννήτριας και μόνο. Για τις στροφές εκείνες όπου η ΗΕΔ της γεννήτριας θα ξεπεράσει τη V_b λέμε ότι η γεννήτρια μπαίνει στο σύστημα και οι στροφές αυτές είναι οι n_{cutin} . Προφανώς, λοιπόν, οι στροφές στις οποίες μπαίνει η γεννήτρια εξαρτώνται από την τάση της μπαταρίας. Πριν μπει η γεννήτρια στο σύστημα δεν υπάρχει ρεύμα και δεν αποδίδεται ισχύς. Παρ' όλα αυτά υπάρχουν απώλειες περιστροφής και δινορρευσμάτων οι οποίες υπολογίζονται από τις σχέσεις (2.15) και (2.16).

Καθώς αυξάνονται οι στροφές η γεννήτρια μπαίνει στο σύστημα και αρχίζει να τροφοδοτεί με ισχύ τις μπαταρίες η τάση των οποίων δεν είναι εντελώς σταθερή καθώς υπάρχει και πτώση τάσης στην εσωτερική τους αντίσταση. Με απλή κυκλωματική ανάλυση του ισοδύναμου προκύπτει ότι το ρεύμα που ρέει στο σύστημα θα είναι συμφασικό με την τάση στα άκρα του συστήματος μπαταρία-ανορθωτής και υπολογίζεται (στις R_s και L_s περιλαμβάνονται όλα τα στοιχεία εκείνα τα οποία μπορεί να συνδεθούν σε σειρά από τη γεννήτρια μέχρι τον ανορθωτή):

$$E_{gen} \angle \delta = V_b \angle 0 + \tilde{I}_{ac} (R_s + j\omega_e L_s + R_{ac})$$

$$\rightarrow E_{gen}^2 = V_b^2 + I_{ac}^2 [(R_s + R_{ac})^2 + \omega_e^2 L_s^2] + 2V_b I_{ac} (R_s + R_{ac})$$

Λύνοντας το τριώνυμο:

$$\Delta = [2V_b(R_s + R_{ac})]^2 - 4[(R_s + R_{ac})^2 + \omega_e^2 L_s^2](V_b^2 - E_{gen}^2)$$

$$I_{ac} = \frac{-2V_b I_{ac}(R_s + R_{ac}) + \sqrt{\Delta}}{2[(R_s + R_{ac})^2 + \omega_e^2 L_s^2]}$$

Έχοντας υπολογίσει το ρεύμα μπορεί πλέον να υπολογιστεί από το διανυσματικό διάγραμμα και η γωνία δ :

$$\delta = \tan^{-1} \frac{I_{ac} \omega_e L_s}{V_b + I_{ac}(R_s + R_{ac})}$$

Έτσι μπορεί πλέον να βρεθεί η τερματική τάση της γεννήτριας που είναι ίση με την τάση που βλέπει ο ανορθωτής αν υποθέσουμε ότι αμελούμε το καλώδιο. Σε κάθε περίπτωση η τάση καθώς και η ισχύς που βλέπει το σύστημα ανορθωτή-μπαταρίας στην είσοδό του θα είναι:

$$V_{rec} = I_{ac} R_{ac} + V_b$$

$$P_{ac} = 3V_{rec} I_{ac}$$

Επιστρέφοντας τώρα στα DC μεγέθη είναι εύκολο να βρεθεί το DC ρεύμα του συστήματος, η τάση και η ισχύς:

$$I_{dc} = \frac{3\sqrt{2}I_{ac}}{\pi}$$

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{6}V_{rec}}{\pi} = V_{bat} + I_{dc} R_{dc}$$

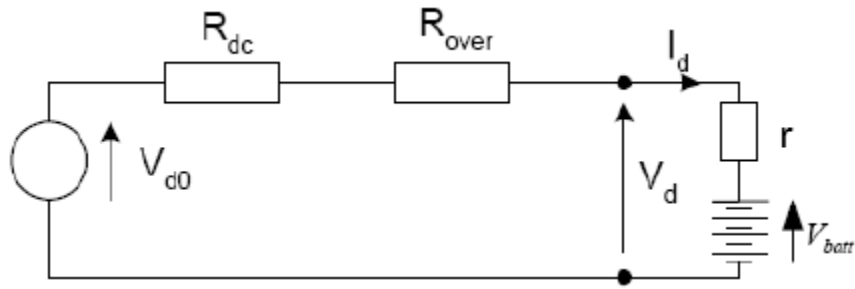
$$P_{dc} = V_{dc} I_{dc}$$

Ταυτόχρονα υπολογίζονται και οι απώλειες χαλκού, περιστροφής και δινορρευμάτων καθώς και η απόδοση. Επιπλέον υπολογίζονται και οι απώλειες στον αντιστροφέα από τη σχέση:

$$P_d = 2V_d I_{dc}$$

7.2.2.2. Σύνδεση απευθείας σε συσσωρευτές-Το μοντέλο της DC ανάλυσης

Αντίστοιχη ανάλυση του συστήματος χρησιμοποιώντας αυτή τη φορά το DC ισοδύναμο γίνεται στο [21]. Η ανάλυση αυτή, που είναι αρκετά απλούστερη, δε λαμβάνει υπόψη την πτώση τάσης στις διόδους, κάτι που αλλοιώνει το τελικό αποτέλεσμα. Όσο όμως μεγαλώνει η τάση των μπαταριών η επίδραση αυτής της μικρής πτώσης τάσης ελαττώνεται με αποτέλεσμα η ανάλυση να γίνεται πιο έγκυρη. Ωστόσο, για συστήματα μέχρι και 48 V η επίδραση είναι αισθητή. Το DC ισοδύναμο είναι το εξής:



Σχήμα 7.9: Απλοποιημένο ισοδύναμο DC γεννήτριας-ανορθωτή-συσσωρευτών.

$$R_{DC} \approx 2R_{phase}$$

$$R_{over} = \frac{3}{\pi} \omega_e L_s$$

Η ανορθωμένη ΗΕΔ της γεννήτριας δίνεται:

$$V_{do} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E_f$$

και το dc ρεύμα καθώς και η τάση στους ακροδέκτες των συσσωρευτών βρίσκονται αναλύοντας το κύκλωμα:

$$I_{dc} = \frac{V_{do} - V_{batt}}{R_{dc} + R_{over} + r}$$

$$V_d = V_{do} - I_d R_{dc} - I_d R_{over}$$

Η ανάλυση και σε αυτήν την περίπτωση γίνεται με τον ίδιο τρόπο όπως και στην AC ανάλυση. Δε μοντελοποιείται όμως καθόλου ο ανορθωτής οπότε δεν επιλέγεται στη συνέχεια.

8. Ενεργειακή Απόδοση

8.1. Υπολογισμός της ενεργειακής απόδοσης A/Γ

Η ενεργειακή απόδοση μιας ανεμογεννήτριας είναι εκείνο το χαρακτηριστικό που πρέπει να ενδιαφέρει περισσότερο ακόμα και από την ονομαστική της ισχύ. Πρόκειται ουσιαστικά για την ενέργεια που μπορεί να αποδώσει η γεννήτρια σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, συνήθως ενός έτους. Η ενεργειακή απόδοση μιας ανεμογεννήτριας έχει αφενός να κάνει με την ονομαστική της ισχύ και την απόδοσή της αλλά επίσης και με την κατανομή του ανέμου στην περιοχή που θα τοποθετηθεί. Εκείνο που πρέπει να είναι γνωστό για τον υπολογισμό της είναι αφενός η κατανομή του ανέμου, αφετέρου τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας τα οποία συνοψίζονται στην καμπύλη ισχύος. Η καμπύλη αυτή περιγράφει τη διακύμανση της ισχύος εξόδου ανάλογα με την ταχύτητα ανέμου και διαφέρει για κάθε σύνδεση. Για την ίδια λοιπόν γεννήτρια, άλλη θα είναι η καμπύλη ισχύος για απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές και άλλη για λειτουργία MPPT κ.ο.κ. Έτσι λοιπόν θα αλλάζει και η ενεργειακή απόδοση.

Ένα άλλο ζήτημα που πρέπει να εξεταστεί είναι αυτό του εύρους των ανέμων στο οποίο λειτουργεί μια ανεμογεννήτρια. Γενικά, για ημιαστικές περιοχές όπου οι μέσες ταχύτητες ανέμου είναι χαμηλές, είναι απαραίτητο η γεννήτρια να εργάζεται καλά γύρω από αυτές τις τιμές. Έτσι, για μια μέση τιμή ανέμου 5 m/s μια γεννήτρια που εργάζεται από 3-10 m/s (ύστερα το σύστημα furling μειώνει την ισχύ) θα δώσει καλύτερη ενεργειακή απόδοση από μια που εργάζεται από 4-11m/s (η τελευταία κατασκευάζεται με ονομαστικό άνεμο τα 11 m/s προκειμένου να έχει μικρότερη φτερωτή άρα και κόστος). Επίσης η ίδια γεννήτρια θα έχει καλύτερη ενεργειακή απόδοση από μια άλλη που εργάζεται από 4-10 m/s επειδή αυτά είναι τα όρια του επιλεγμένου αντιστροφέα. Πρέπει λοιπόν να δίνεται μεγάλη προσοχή στην ενεργειακή απόδοση για να γίνει επιλογή μεταξύ μικρών εμπορικών ανεμογεννητριών διαφορετικών ποιοτικών χαρακτηριστικών.

$$E = T \int_0^{\infty} h(V_w)P(V_w)dV_w \quad (8.1)$$

Η ενεργειακή απόδοση υπολογίζεται από τη σχέση 8.1 και σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι ο υπολογισμός της για διάφορα είδη σύνδεσης. Έτσι, θα μελετηθεί η γεννήτρια 3 kW που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε για απευθείας σύνδεση στο δίκτυο μέσω ανορθωτή και αντιστροφέα ο οποίος θα εκτελεί λειτουργία MPPT. Θα προσομοιωθεί η λειτουργία της, θα εξαχθεί η καμπύλη ισχύος και θα βρεθεί η ενεργειακή της απόδοση. Επιπλέον θα μελετηθεί άλλη γεννήτρια ονομαστικής ισχύος 850 W που έχει κατασκευαστεί [11] με τα κριτήρια του χαμηλού κόστους και της ιδιοκατασκευής για DC σύνδεση. Πρόκειται για σύνδεση απευθείας σε συσσωρευτές μέσω ανορθωτή. Θα μελετηθεί όμως και η αντίστοιχη λειτουργία MPPT (με αντιστροφέα) για τη σύνδεση αυτή. Τέλος, θα μελετηθεί η σύνδεση εν σειρά μιας αυτεπαγωγής πριν από τον ανορθωτή προκειμένου να βελτιωθεί η ενεργειακή απόδοση.

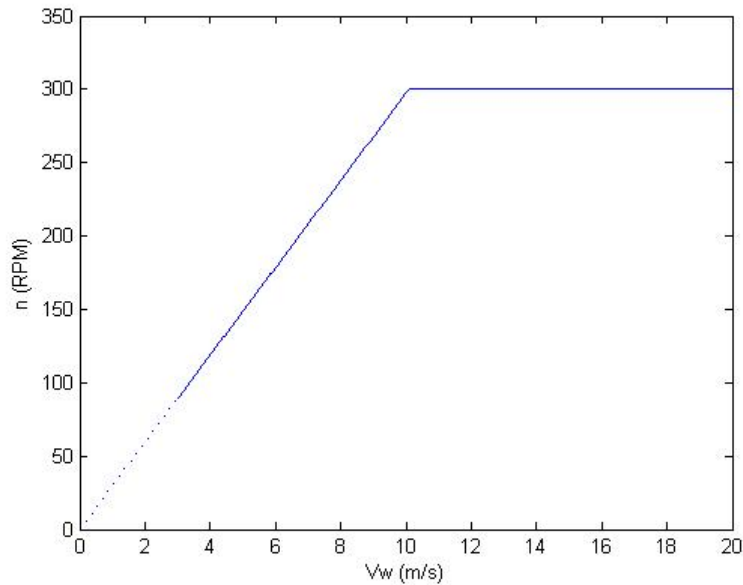
8.2. Η AC σύνδεση

Η ανεμογεννήτρια 3 kW που κατασκευάστηκε συνδέεται μέσω ανορθωτή και καλωδίου σε σύστημα μεγιστοποίησης ισχύος MPPT. Σκοπός είναι η εύρεση των χαρακτηριστικών λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, της καμπύλης ισχύος της και τέλος της ενεργειακής της απόδοσης. Όλα τα παραπάνω θα γίνουν με τη βοήθεια προγραμμάτων που γράφτηκαν σε λογισμικό Matlab.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί κατά τη λειτουργία MPPT ο αεροδυναμικός συντελεστής διατηρείται σταθερός στη μέγιστη τιμή του 0,35 όπως επίσης και ο λόγος ταχύτητας ακροπερυγίου διατηρείται στη βέλτιστη τιμή του 7.

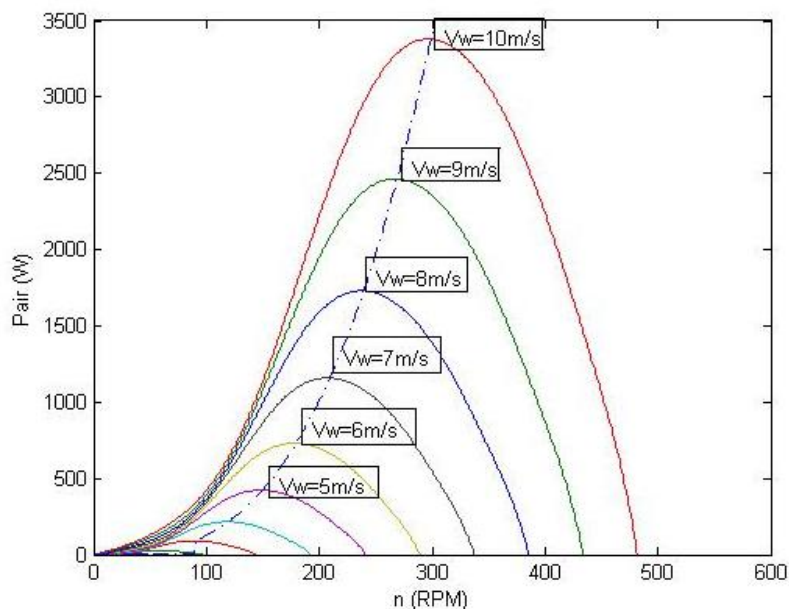
Για κάθε ταχύτητα ανέμου υπολογίζονται οι στροφές μέσω του σταθερού βέλτιστου λόγου ταχύτητας ακροπερυγίου $\lambda=7$ με δεδομένη φυσικά την ακτίνα της φτερωτής. Μπορούν ταυτόχρονα να υπολογιστούν η ΗΕΔ, η συχνότητα και οι γωνιακές ταχύτητες (ηλεκτρική και μηχανική). Αν η ταχύτητα του ανέμου είναι μικρότερη των 3 m/s η γεννήτρια δε δίνει ισχύ στο δίκτυο. Όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει τα 3 m/s και πριν τα 10 m/s ξεκινά η λειτουργία MPPT. Με λίγα λόγια, για κάθε άνεμο είναι γνωστή η μηχανική ισχύς της γεννήτριας. Γνωρίζοντας τις απώλειες περιστροφής (εξαρτώνται από το βάρος και τις στροφές μόνο) μπορεί πλέον να βρεθεί η ηλεκτρομαγνητική ισχύς και από εκεί η ροπή. Μέσω της ροπής αλλά και της σχέσης ροπής-ρεύματος που βρέθηκε στο κεφάλαιο 5 βρίσκεται το ρεύμα ενώ μέσω των σχέσεων (4.4) και (4.5) υπολογίζονται η τερματική τάση και η γωνία ισχύος δ . Εν συνεχεία μπορεί αν βρεθεί η ηλεκτρική ισχύς πριν και μετά τον ανορθωτή. Για ταχύτητες ανέμου που ξεπερνάνε τα 10 m/s ενεργοποιείται το σύστημα περιορισμού ισχύος furling του οποίου η συμπεριφορά δεν είναι απολύτως γνωστή και έτσι οι περιοχές αυτή ανέμων δε μελετάται, ούτε και λαμβάνεται υπόψη κατά την εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης αργότερα στο ίδιο κεφάλαιο.

Η πρώτη σχέση που βρίσκεται είναι αυτή των στροφών σε σχέση με τον άνεμο, όπου καθώς το λ είναι σταθερό αναμενόταν να είναι γραμμική. Μάλιστα μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι οι στροφές στα 3 m/s είναι $n_{cut-in}=89$ ΣΑΛ και ότι οι ονομαστικές στροφές (για 10 m/s) είναι ίσες με $n_{nom}=297$ ΣΑΛ. Μετά τον ονομαστικό άνεμο το σύστημα furling πρέπει θεωρητικά να διατηρεί τις στροφές σταθερές.



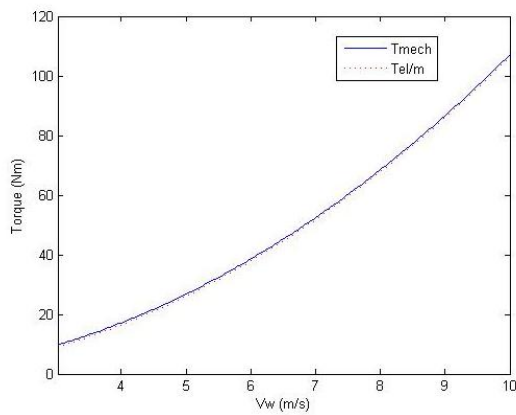
Σχήμα 8.1: Χαρακτηριστική ελέγχου στροφών.

Η μηχανική ισχύς στην είσοδο της γεννήτριας σε σχέση με τις στροφές φαίνεται στο σχήμα 8.2. Ταυτόχρονα, στο ίδιο σχήμα φαίνεται η αεροδυναμική ισχύς της γεννήτριας για διάφορους ανέμους σε διάφορες στροφές. Σκοπός της απεικόνισης αυτής είναι να φανεί η λειτουργία MPPT καθώς για κάθε τιμή των στροφών της γεννήτριας βλέπουμε ότι η ισχύς στην είσοδό της (άρα και στην έξοδο) μεγιστοποιείται.

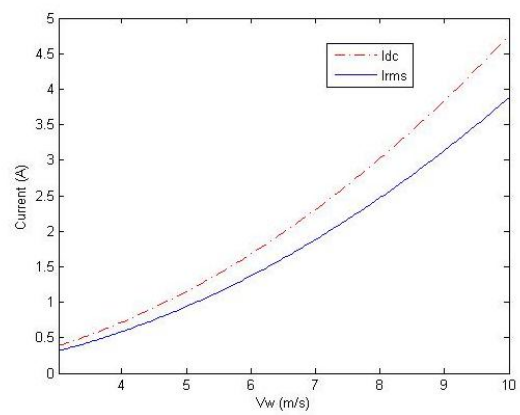


Σχήμα 8.2: Χαρακτηριστική ελέγχου ανεμογεννήτριας.

Η μεταβολή της μηχανικής και ηλεκτρομαγνητικής ροπής σε σχέση με τον άνεμο και η αντίστοιχη μεταβολή των ρευμάτων πριν και μετά τον ανορθωτή φαίνονται στο σχήμα 8.3.



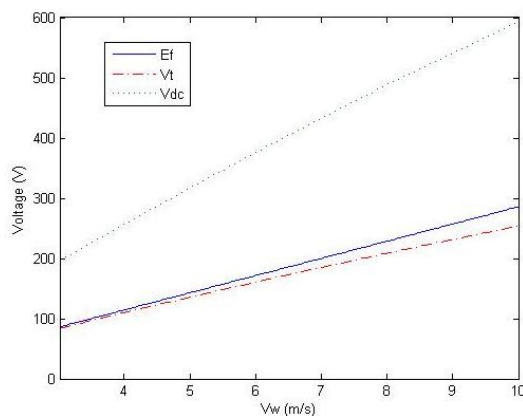
(α)



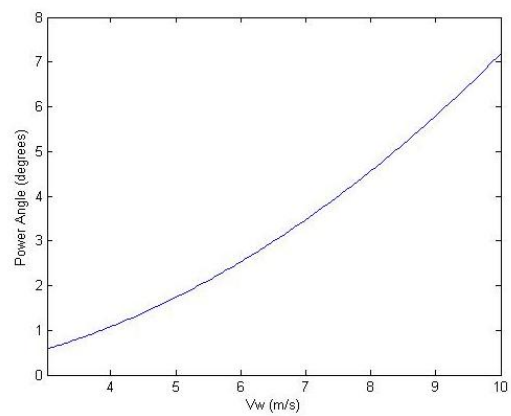
(β)

Σχήμα 8.3: (α) Η μηχανική και ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας και (β) το ρεύμα γραμμής και το DC ρεύμα σε σχέση με την ταχύτητα ανέμου.

Η ΗΕΔ, η τερματική τάση καθώς και η τάση μετά τον ανορθωτή σε σχέση με τον άνεμο φαίνονται στο σχήμα 8.4 (α) ενώ στο σχήμα 8.4 (β) φαίνεται η αντίστοιχη μεταβολή για τη γωνία ισχύος δ.



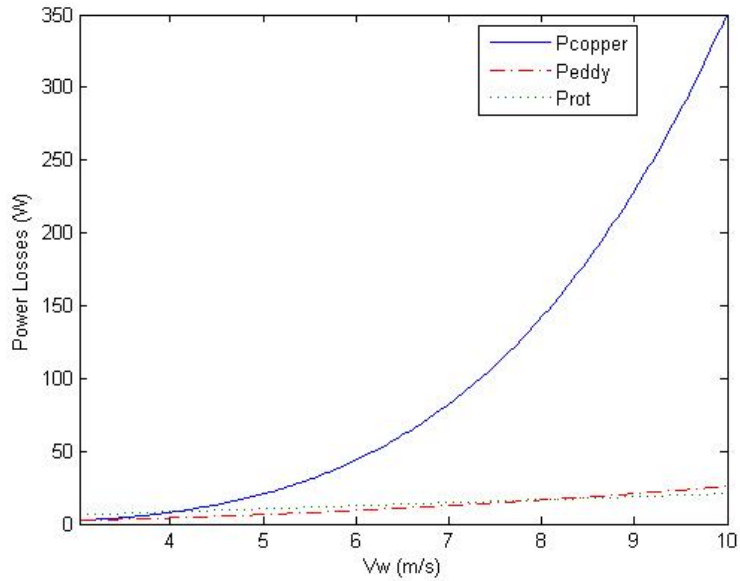
(α)



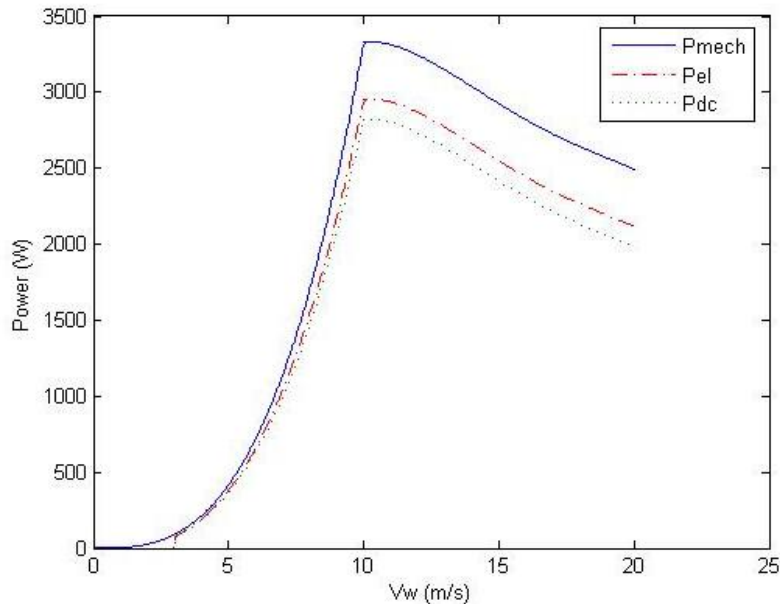
(β)

Σχήμα 8.4: (α) Οι τάσεις που αναπτύσσει η γεννήτρια καθώς και (β) η γωνία ισχύος σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου.

Τέλος βρίσκονται οι καμπύλες ισχύος της ανεμογεννήτριας όσον αφορά την αεροδυναμική, την τριφασική και την DC ισχύ και παριστάνονται όλες μαζί στο σχήμα 8.6 καθώς και οι καμπύλες των απωλειών:

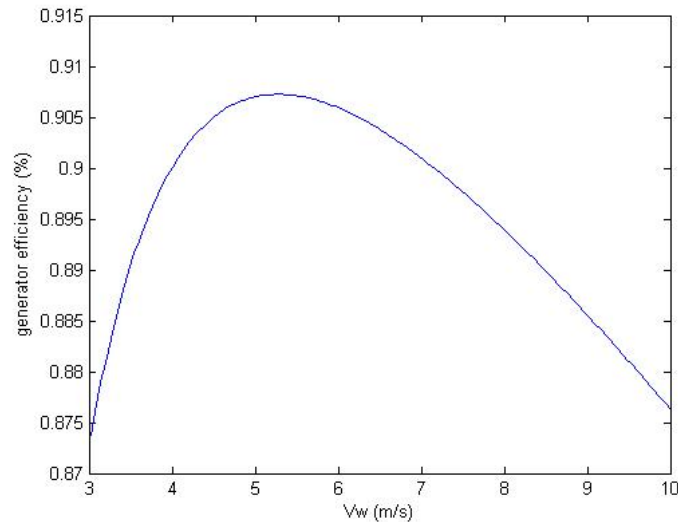


Σχήμα 8.5: Οι απώλειες ισχύος σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου.



Σχήμα 8.6: Καμπύλες ισχύος της ανεμογεννήτριας.

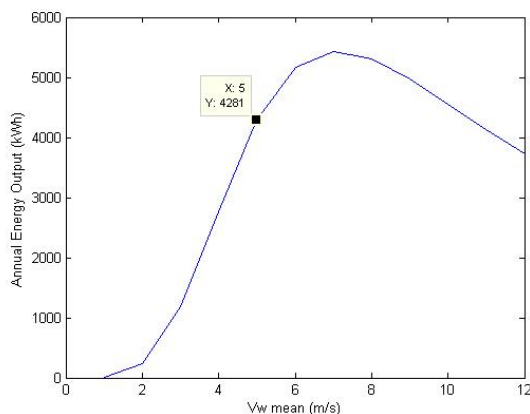
Τέλος βρίσκεται η μεταβολή της απόδοσης σε σχέση με τον άνεμο στο σχήμα 8.7. Φαίνεται από την προσομοίωση ότι η απόδοση της γεννήτριας διατηρείται σχετικά υψηλή από 87,5% -90,7% για όλους τους ανέμους. Αυτό είναι ενδεικτικό μιας καλής ενεργειακής απόδοσης για τη γεννήτρια.



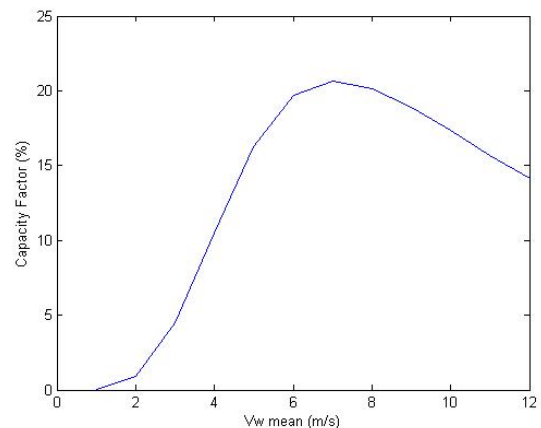
Σχήμα 8.7: Η μεταβολή της απόδοσης της ανεμογεννήτριας με την ταχύτητα του ανέμου.

Υπολογίζεται στο σημείο αυτό η ενεργειακή απόδοση της ανεμογεννήτριας και σχεδιάζεται το διάγραμμα της ενεργειακής απόδοσης με τη μέση τιμή του ανέμου. Επιπλέον μπορεί να υπολογιστεί και να βρεθεί και η σχέση που έχει ο συντελεστής χρησιμοποίησης της Α/Γ με τον μέσο άνεμο. Ο συντελεστής χρησιμοποίησης δίνεται από τη σχέση (8.2) και πρόκειται για το λόγο της ενεργειακής απόδοσης της γεννήτριας προς την ενέργεια που θα έδινε η γεννήτρια αν λειτουργούσε στα ονομαστικά της για ένα έτος.

$$CF = \frac{E}{T \cdot P_{gen_{nom}}} \quad (8.2)$$



(α)



(β)

Σχήμα 8.8: (α) Η ενεργειακή απόδοση της γεννήτριας για διάφορες μέσες τιμές ανέμου και (β) ο συντελεστής χρησιμοποίησης.

8.3. Η DC σύνδεση

Στο σημείο αυτό, αφού γίνει μια σύντομη παρουσίαση της γεννήτριας 850 W, θα μελετηθεί η DC σύνδεση της και θα βρεθούν οι χαρακτηριστικές λειτουργίες της καθώς και η ενεργειακή της απόδοση.

8.3.1. Η γεννήτρια 850 W που κατασκευάστηκε για DC σύνδεση

Η γεννήτρια αυτή κατασκευάστηκε για σύνδεση σε σύστημα με μπαταρίες 48 V. Η γεννήτρια συνδέεται μέσω ανορθωτή απευθείας στους συσσωρευτές. Συνοπτικά τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας είναι τα εξής:

Όνομαστική Ισχύς	850 W
Αριθμός πόλων	12
Αριθμός πηνίων/φάση	3
Αντίσταση φάσης	0,614 Ω
Αυτεπαγωγή φάσης	1,793 mH
Ακτίνα φτερωτής	1,2 m
Βέλτιστο λ	7
Μέγιστο cp	0,35
Όνομαστικός άνεμος	10 m/s
Άνεμος cut-in	3 m/s
Όνομαστικές στροφές	550 RPM
Cut-in στροφές	200 RPM
Cut-in ΗΕΔ	20,5 V
Bp	0.4 T
RMS τιμή της πεπλεγμένης ροής μιας φάσης	0,15 Wb

Πίνακας 8.1: Βασικά χαρακτηριστικά γεννήτριας 850 W.

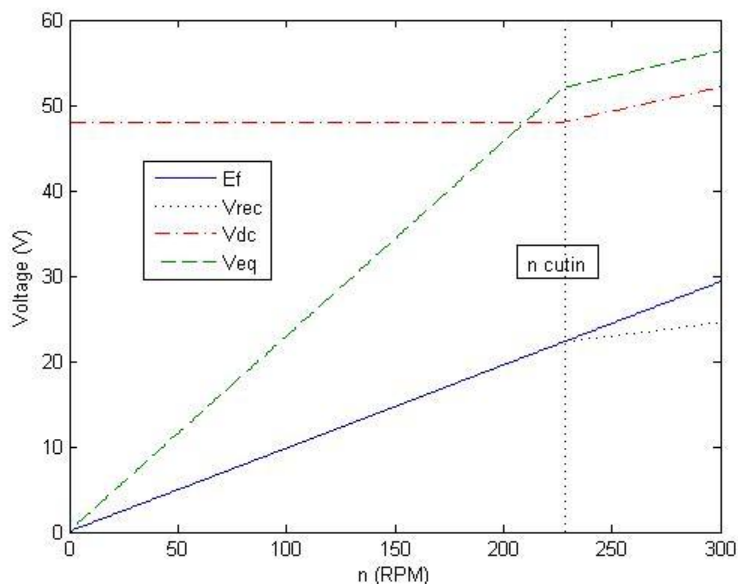
Η γεννήτρια αυτή πρόκειται να συνδεθεί με διάφορους τρόπους σε DC σύνδεση. Πάντα θα συνδέεται με καλώδιο συνολικής αντίστασης 0,35 Ω (60 m, 6 mm²) στον ανορθωτή ο οποίος έχει πτώση τάσης σε κάθε δίοδο 0,7 V. Στη συνέχεια η έξοδος οδηγείται στους συσσωρευτές των οποίων η τάση ανοιχτοκύκλωσης θεωρείται 48 V. Οι συσσωρευτές έχουν επίσης μια εσωτερική αντίσταση που μεταβάλλεται κανονικά ανάλογα με το βαθμό φόρτισης αλλά στην ανάλυση αυτή θα θεωρηθεί σταθερή και ίση με 0,4 Ω. Η εκτίμηση αυτή είναι προσεγγιστική για τους συσσωρευτές και μπορεί να προσθέσει αργότερα σφάλματα στην προσομοίωση.

8.3.2. Απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές

Η πρώτη περίπτωση που θα μελετηθεί είναι η απευθείας σύνδεση της γεννήτριας στους συσσωρευτές. Όπως έχει αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο θα χρησιμοποιηθεί η AC ανάλυση του συστήματος. Το πρόβλημα με τους συσσωρευτές είναι ότι διατηρούν την τερματική τάση της γεννήτριας σε πολύ χαμηλά επίπεδα εμποδίζοντάς την να απορροφήσει τη μέγιστη αεροδυναμική ισχύ. Με λίγα λόγια δεν επιτρέπει να μείνει σταθερός ο συνδυασμός αεροδυναμικού συντελεστή και λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου 0,35-7 αντίστοιχα.

Το σύστημα αναλύεται ως εξής: Καθώς αυξάνονται οι στροφές υπολογίζεται η ΗΕΔ της γεννήτριας. Όταν η ΗΕΔ ξεπεράσει την ισοδύναμη τάση αντιστροφέα-συσσωρευτών V_b αρχίζει η έγχυση ισχύος από τη γεννήτρια προς τους συσσωρευτές. Οι στροφές αυτές είναι οι cut-in και διαφέρουν από τις στροφές που έχουν

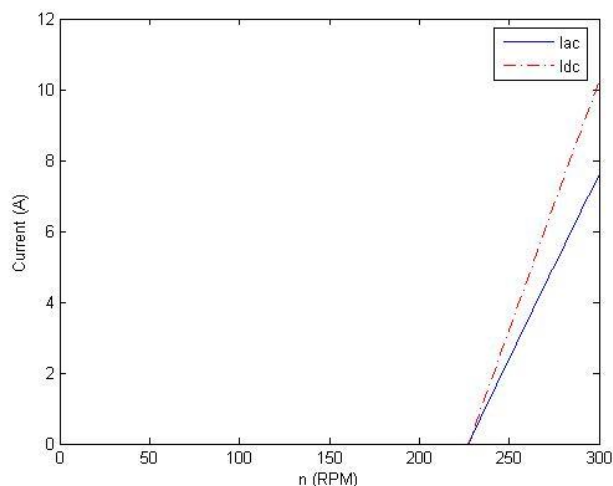
υπολογιστεί σαν ονομαστικές, καθώς αυτές έχουν υπολογιστεί για $\lambda=7$ που δεν ισχύει για σύνδεση σε συσσωρευτές. Στη συνέχεια ακολουθείται ακριβώς η AC ανάλυση, υπολογίζεται η ηλεκτρική ισχύς και οι απώλειες και από εκεί η μηχανική ισχύς της γεννήτριας για να προκύψουν οι χαρακτηριστικές στη συνέχεια.



Σχήμα 8.9: Οι τάσεις που αναπτύσσονται στο σύστημα σε σχέση με τις στροφές.

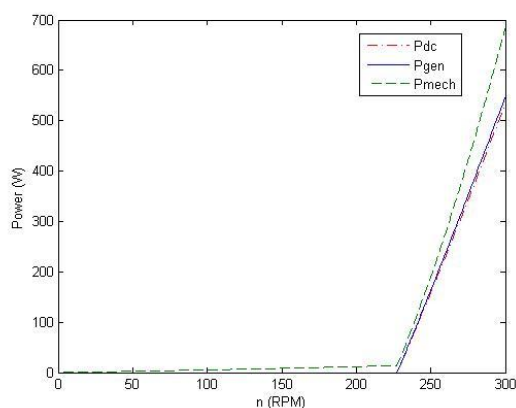
Πρώτες φαίνονται οι καμπύλες της τάσης. Διακρίνονται τέσσερις καμπύλες. Η μία είναι η ΗΕΔ η οποία εξαρτάται κατά τα γνωστά μόνο από τις στροφές και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά. Η ΗΕΔ (E_f) εξακολουθεί να αυξάνεται ανεξάρτητα αν το σύστημα δίνει ισχύ στις μπαταρίες (έχουν ξεπεραστεί οι στροφές cut-in). Η άλλη είναι η τάση στην είσοδο του ανορθωτή V_{rec} . Η τάση αυτή είναι ίδια με την ΗΕΔ όσο το σύστημα δε δίνει ισχύ στις μπαταρίες, καθώς δε ρέει ρεύμα και άρα δεν υπάρχουν πτώσεις τάσης στο τύλιγμα της γεννήτριας και στο καλώδιο. Η τάση αυτή αλλάζει όμως στο cut-in και σταθεροποιείται καθώς προσαρμόζεται στην τάση της μπαταρίας. Η μικρή της μεταβολή οφείλεται στην πτώση τάσης πάνω στην αντίσταση της μπαταρίας. Τέλος παρουσιάζονται δύο ακόμα τάσεις: Η τάση V_{eq} που είναι μια ισοδύναμη (βοηθητική) τάση που βλέπει το ισοδύναμο σύστημα ανορθωτή μπαταρίας. Η τάση αυτή πρέπει να ξεπεράσει τα 48 V της μπαταρίας αλλά και την πτώση τάσης στον ανορθωτή (γι' αυτό και σταθεροποιείται γύρω στα 52 V) προκειμένου το σύστημα να δώσει ισχύ στις μπαταρίες. Τέλος φαίνεται και η dc τάση. Πρόκειται για την τάση που θα μέτραγε ένα βολτόμετρο στους ακροδέκτες των συσσωρευτών. Η τάση αυτή θα παραμένει στα 48 V μέχρι το σύστημα να αρχίσει να δίνει ισχύ, δηλαδή μέχρι να ξεκινήσει ροή ρεύματος. Μέχρι τότε δεν υπάρχει DC ισχύς στην έξοδο, ούτε και πτώσεις τάσης. Όταν το σύστημα ξεπεράσει τις στροφές cut-in ρεύμα ρέει στις μπαταρίες με αποτέλεσμα η DC τάση στην έξοδο να αυξάνεται κατά την πτώση τάσης στην εσωτερική αντίσταση της γεννήτριας. Ταυτόχρονα φαίνονται και οι στροφές σε κατάσταση cut-in για τις οποίες ισχύει: $n_{cut-in}=227$ ΣΑΛ. Οι στροφές αυτές αλλάζουν ανάλογα με την πτώση τάσης στις διόδους του ανορθωτή. Έτσι θα μπορούσε κανείς να θεωρήσει ότι πρόκειται για τις στροφές όταν οι διόδοι σταδιακά αρχίζουν να άγουν και το αποτέλεσμα να προκύψει διαφορετικό από το τελευταίο, στο οποίο βρίσκονται οι στροφές όταν οι διόδοι έχουν ανοίξει εντελώς.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι καμπύλες ρεύματος. Πιο συγκεκριμένα φαίνονται τα ρεύματα στην AC και την DC πλευρά του συστήματος. Όπως ειπώθηκε και προηγουμένως ρεύμα ρέει στο σύστημα όταν ξεπεραστούν οι στροφές cut-in. Η γραμμική αύξηση των ρευμάτων με τις στροφές οφείλεται στην πολύ μικρή αυτεπαγωγή της γεννήτριας και στην κυριαρχία του ωμικού στοιχείου στο σύστημα.

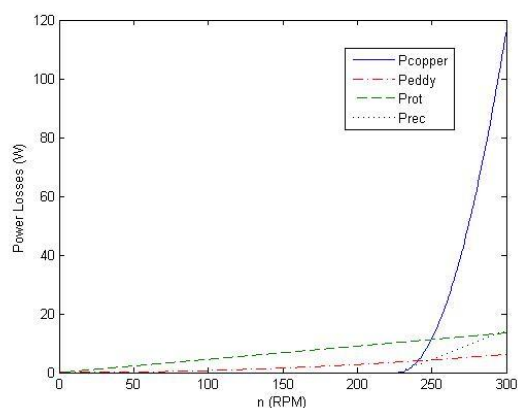


Σχήμα 8.10: Τα ρεύματα της γεννήτριας σε σχέση με τις στροφές.

Οι ισχύεις φαίνονται στο σχήμα 8.11 (α). Πιο συγκεκριμένα αρχικά υπολογίζεται η DC ισχύς από την τάση στη μπαταρία και το ρεύμα της. Αφαιρώντας τις απώλειες του ανορθωτή ($P_d=2VdI_{dc}$) καθώς και τις απώλειες πάνω στο καλώδιο προκύπτει η ισχύς που παρέχει η γεννήτρια P_{gen} και αφαιρώντας τις απώλειες δινορρευμάτων, χαλκού και περιστροφής προκύπτει η μηχανική ισχύς στην είσοδο της γεννήτριας. Στο σχήμα 8.11 (β) φαίνονται και οι απώλειες σε σχέση με τις στροφές.



(α)

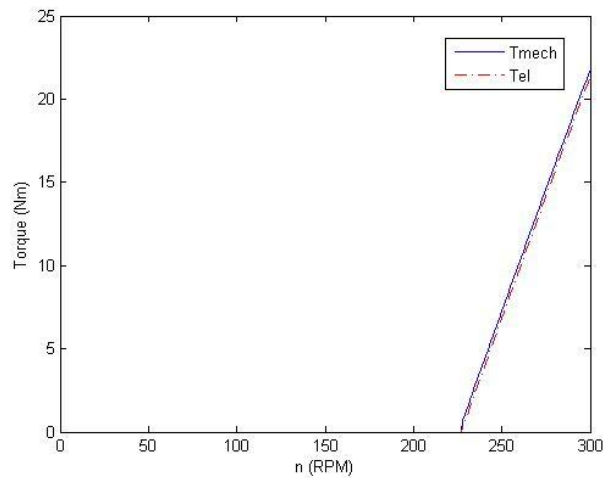


(β)

Σχήμα 8.11: (α) Οι ισχύεις του συστήματος και (β) απώλειες ισχύος της γεννήτριας σε σχέση με τις στροφές.

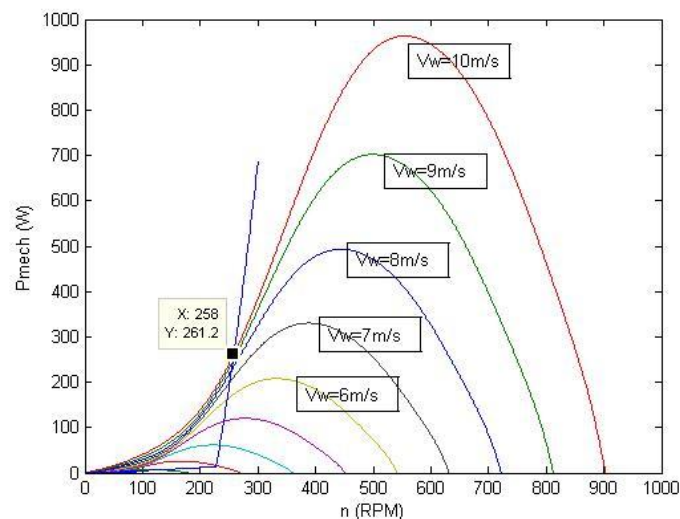
Φαίνεται ότι η πιο σημαντική συνιστώσα των απωλειών είναι οι ωμικές απώλειες, οι οποίες υφίστανται από τη στιγμή που ρέει ρεύμα στο σύστημα. Το ίδιο ισχύει και για τις απώλειες στον ανορθωτή. Οι απώλειες δινορρευμάτων και περιστροφής εξαρτώνται από τις στροφές μόνο και γι' αυτό υπάρχουν και πριν το σύστημα ξεκινήσει να αποδίδει ισχύ.

Με γνωστή την ισχύ μπορούν πλέον να υπολογιστούν και οι ροπές απλά διαιρώντας κάθε ισχύ με την αντίστοιχη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής. Προκύπτουν έτσι και οι καμπύλες τη ροπής (μηχανικής και ηλεκτρομαγνητικής):



Σχήμα 8.12: Η μηχανική και ηλεκτρομαγνητική ροπή που αναπτύσσει η γεννήτρια.

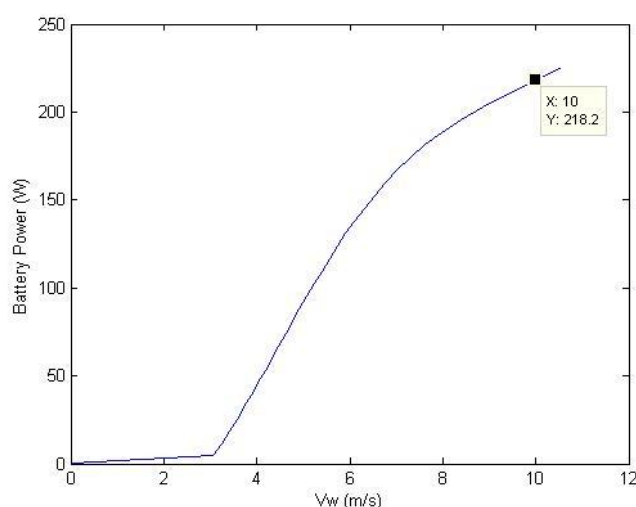
Μια παρατήρηση πρέπει να γίνει εδώ όσον αφορά το εύρος στροφών στο οποίο λειτουργεί η γεννήτρια. Τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο παύουν να ισχύουν ως προς τις στροφές, αν και η γεννήτρια εξακολουθεί να ξεκινάει την έναρξη της έγχυσης ισχύος στα 3 m/s και το σύστημα furling ενεργοποιείται και πάλι στα 10 m/s. Ωστόσο η σύνδεση των μπαταριών αλλάζει την απαιτούμενη τάση στα άκρα της γεννήτριας και έτσι αλλάζουν και οι στροφές. Ήδη φαίνεται ότι η γεννήτρια μπαίνει στο σύστημα στις 227 ΣΑΛ πλέον και όχι στις 200 ΣΑΛ. Για τις ονομαστικές στροφές πρέπει να σχεδιαστούν ταυτόχρονα οι αεροδυναμικές καμπύλες και η καμπύλη μηχανική ισχύος-στροφές της γεννήτριας όπως γίνεται παρακάτω:



Σχήμα 8.13: Οι αεροδυναμικές καμπύλες και η καμπύλη της ισχύος της ανεμογεννήτριας με τις στροφές προκειμένου να καθοριστεί η σχέση της ισχύος με τον άνεμο.

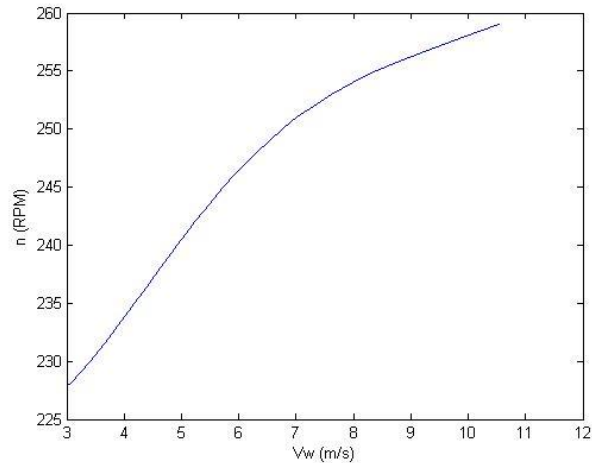
Φαίνεται στο σχήμα αυτό ότι για ονομαστικό άνεμο 10 m/s οι στροφές πλέον γίνονται 258 και η μηχανική ισχύς περίπου 261 W σε σχέση με τα 850 W που θα έδινε η γεννήτρια σε λειτουργία MPPT που θα αναλυθεί αργότερα.

Ήδη μπορεί κανείς να αντιληφθεί από τα παραπάνω ότι η γεννήτρια απευθείας συνδεδεμένη σε συσσωρευτές θα παράγει πολύ μικρή ενέργεια σε σχέση με αυτή που μπορεί. Η εύρεση της ενεργειακής απόδοσης θα βοηθήσει στην απόδειξη αυτού του ισχυρισμού. Για να γίνει κάτι τέτοιο πρέπει κατά τα γνωστά να βρεθεί η καμπύλη ισχύος. Γνωρίζοντας τις αεροδυναμικές καμπύλες αλλά και την καμπύλη μηχανικής ισχύος-στροφών της γεννήτριας το πρόβλημα ανάγεται στην εύρεση για όλες τις στροφές του ανέμου εκείνου για τον οποίο παράγεται η αντίστοιχη μηχανική ισχύς (τα σημεία τομής των καμπυλών του σχήματος 8.13). Η σχέση $cp(\lambda)$ είναι γνωστή και έχει προσεγγιστεί με ένα πολυώνυμο δεκάτου βαθμού (κεφάλαιο 1). Αντικαθιστώντας τον άνεμο ($\lambda = \omega R / Vw$), υπολογίζοντας την αεροδυναμική ισχύ και εξισώνοντάς τη με τη μηχανική προκύπτει νέο πολυώνυμο δεκάτου βαθμού η λύση του οποίου πρέπει να βρεθεί. Για τη λύση του χρησιμοποιείται και πάλι το λογισμικό Matlab. Η διαδικασία πάντως είναι αρκετά χρονοβόρα καθώς πολλά τέτοια πολυώνυμα (εκατοντάδες) πρέπει να λυθούν για να προκύψει με ακρίβεια η καμπύλη ισχύος. Και πάλι το σύστημα αναλύεται μέχρι τα 10 m/s οδηγώντας φυσικά σε μειωμένη σε σχέση με την πραγματική ενεργειακή απόδοση. Με την παραπάνω ανάλυση προέκυψε η καμπύλη ισχύος (καμπύλη της DC ισχύος που εισρέει στις μπαταρίες):



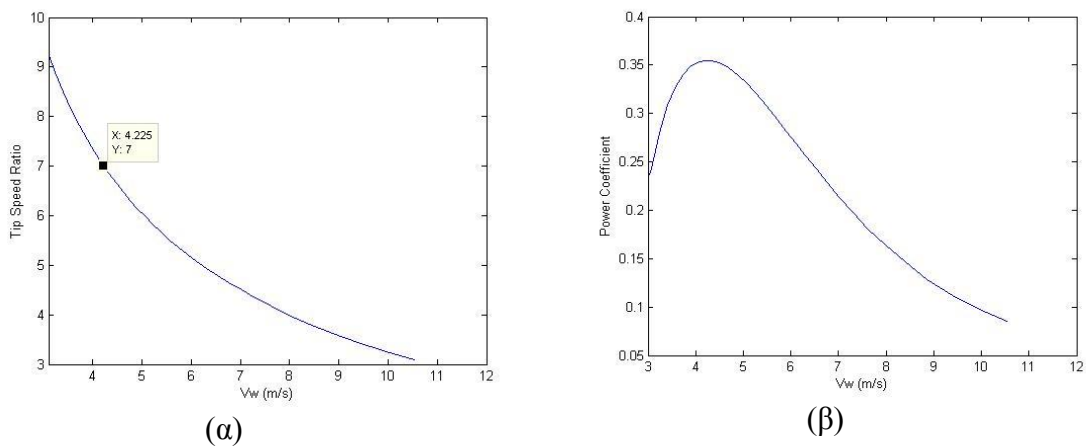
Σχήμα 8.14: Η ισχύς που απορροφά η μπαταρία σε σχέση με τον άνεμο.

Φαίνεται στο σχήμα αυτό η ισχύς που θα εισέρχεται στη μπαταρία για τον ονομαστικό άνεμο των 10 m/s και είναι ίση με 218 W από τα 850 W που θα έδινε η γεννήτρια αν δεν ήταν συνδεδεμένη στη μπαταρία. Επιπλέον, στο σχήμα 8.15 φαίνεται και η εξάρτηση των στροφών από τον άνεμο. Οι στροφές για άνεμο 10 m/s είναι 258 ΣΑΛ έναντι των 550 που είναι οι ονομαστικές.



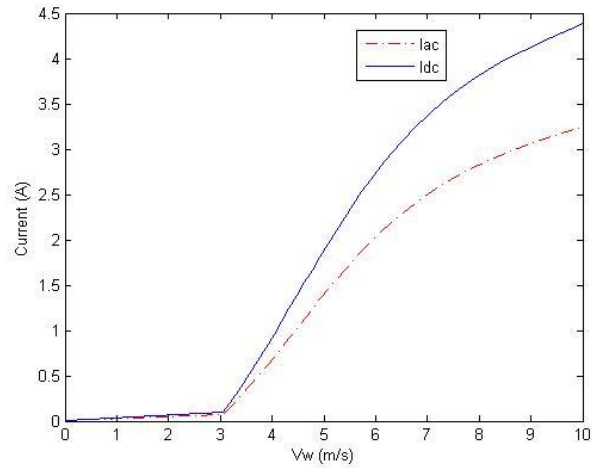
Σχήμα 8.15: Η εξάρτηση των στροφών από την ταχύτητα του ανέμου.

Επιπλέον υπολογίζεται ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου για κάθε άνεμο καθώς και ο αντίστοιχος αεροδυναμικός συντελεστής. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 8.16 από όπου προκύπτει ότι το βέλτιστο λ αλλά και ο μέγιστος αεροδυναμικός συντελεστής επιτυγχάνονται μόνο στα 4,2 m/s.

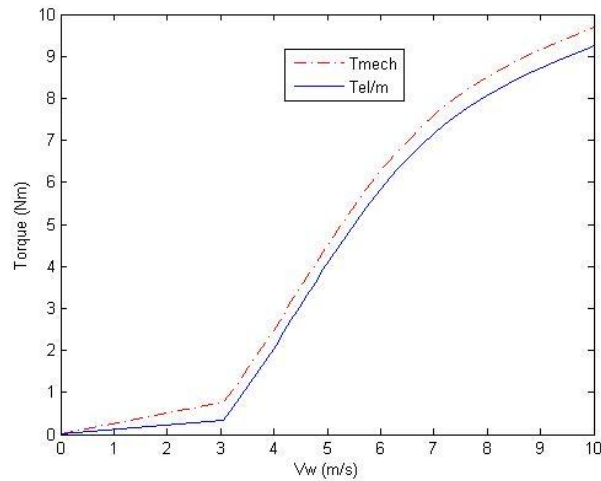


Σχήμα 8.16: Η εξάρτηση (α) του λόγου ακροπτερυγίου και (β) του αεροδυναμικού συντελεστή από την ταχύτητα του ανέμου.

Επιπλέον χαράσσονται οι καμπύλες του ρεύματος (DC και AC) σε σχέση με τον άνεμο αλλά και η ροπή (μηχανική και ηλεκτρομαγνητική). Το ονομαστικό ρεύμα που ρέει στη γεννήτρια για άνεμο ταχύτητας 10 m/s είναι ίσο με 3,3 A.

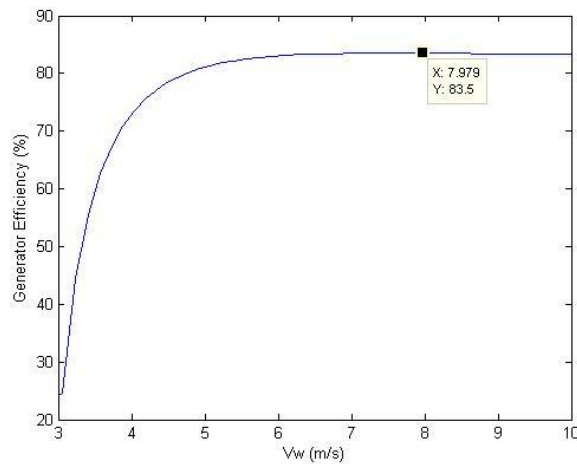


Σχήμα 8.17: Η μεταβολή των ρευμάτων σε σχέση με τον άνεμο.



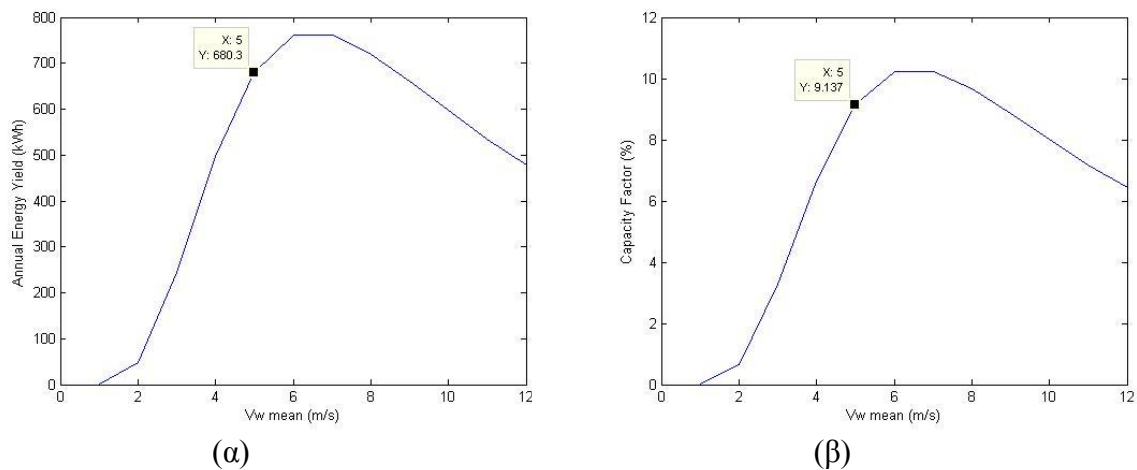
Σχήμα 8.18: Η μεταβολή της ροπής σε σχέση με τον άνεμο.

Τέλος για κάθε άνεμο υπολογίζεται η απόδοση της γεννήτριας. Η απόδοση είναι πολύ μικρή σε χαμηλούς ανέμους, μεγαλώνει όμως σταδιακά μέχρι να φτάσει στη μέγιστη τιμή της 83.5 % στα 8 m/s. Από εκεί και πέρα μένει σχετικά σταθερή.



Σχήμα 8.19: Η μεταβολή της απόδοσης της γεννήτριας σε σχέση με τον άνεμο.

Έχοντας βρει την καμπύλη ισχύος και για την κατανομή Rayleigh που περιγράφεται στο κεφάλαιο 1 με τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά είναι δυνατόν πλέον να βρεθεί και η ενεργειακή απόδοση του συστήματος ανεμογεννήτρια-συσσωρευτές. Η μεταβολή της σε σχέση με το μέσο άνεμο (σε περίπτωση που θέλει κανείς να μελετήσει τη μεταβολή της ενεργειακής απόδοσης με τη μεταβολή της θέσης εγκατάστασης) φαίνεται στο σχήμα 8.20 (α) ενώ η τιμή της για τη συνηθισμένη μέση τιμή των 5m/s είναι ίση με 680,3 kWh. Ταυτόχρονα, και γνωρίζοντας ότι η ονομαστική ισχύς της γεννήτριας είναι 850 W μπορεί να βρεθεί βάση αυτής ο συντελεστής χρησιμοποίησης (σχήμα 8.20 (β)). Ο συντελεστής χρησιμοποίησης θα αυξανόταν κατά πολύ αν σαν ονομαστική θεωρούνταν η ισχύς που παράγει η γεννήτρια για άνεμο 10 m/s όταν είναι συνδεδεμένη απευθείας σε συσσωρευτές. Εδώ ως ονομαστική ισχύς θα λαμβάνεται η κατασκευαστική ονομαστική ισχύς της γεννήτριας η οποία δεν εξαρτάται από τον τρόπο σύνδεσης. Η τιμή του συντελεστή αυτού στα 5 m/s είναι ίση με 9,14%, τιμή γενικά χαμηλή.

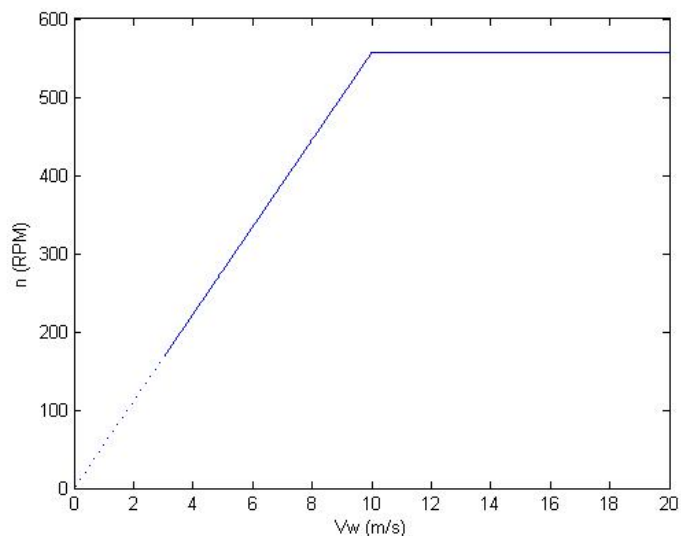


Σχήμα 8.20: Η μεταβολή (α) της ενεργειακής απόδοσης και (β) του συντελεστή χρησιμοποίησης με τη μέση τιμή του ανέμου.

8.3.3. Σύνδεση με σύστημα μεγιστοποίησης ισχύος (MPPT)

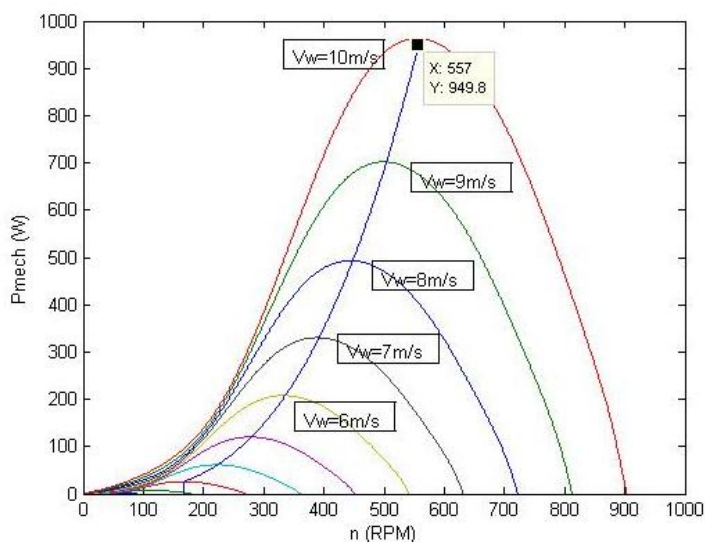
Όπως έχει ήδη αναφερθεί μπορεί και στη DC σύνδεση να χρησιμοποιηθεί σύστημα μεγιστοποίησης της ισχύος αν και οι αντιστροφείς που το κάνουν αυτό είναι σχετικά περιορισμένοι στην αγορά. Οι περισσότεροι εκτελούν λειτουργία MPPT για την περίπτωση της AC σύνδεσης. Η ανάλυση πάντως παραμένει ίδια με αυτή της AC σύνδεσης που έχει παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 8.2 αλλάζοντας φυσικά τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας.

Για κάθε ταχύτητα ανέμου λοιπόν διατηρείται ο βέλτιστος λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου $\lambda=7$ και ο μέγιστος αεροδυναμικός συντελεστής $c_p=0,35$. Αρχικά παρουσιάζεται η σχέση των στροφών με την ταχύτητα του ανέμου (σχήμα 8.21) όπου μετά τα 10 m/s οι στροφές σταθεροποιούνται στις ονομαστικές (557 ΣΑΛ). Το σταθερό αυτό τμήμα της γραφικής απεικονίζει την υπόθεση ότι το σύστημα furling σταθεροποιεί τις στροφές.



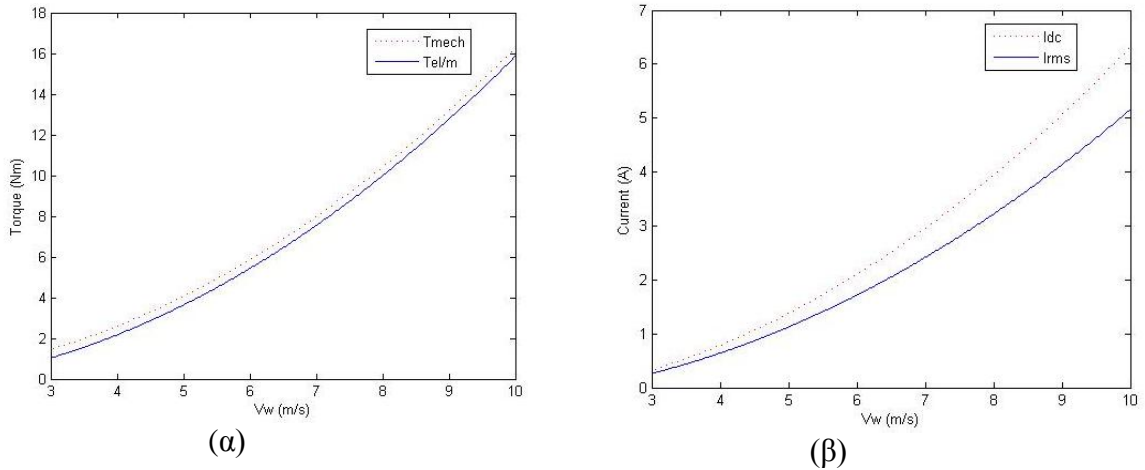
Σχήμα 8.21: Η μεταβολή των στροφών με την ταχύτητα του ανέμου για σύνδεση σε σύστημα MPPT.

Κατά τη λειτουργία MPPT η γεννήτρια απορροφά τη μέγιστη αεροδυναμική ισχύ. Με λίγα λόγια, για κάθε άνεμο η μηχανική ισχύς στην είσοδο της γεννήτριας μεγιστοποιείται. Αυτό φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα (σχήμα 8.22) όπου απεικονίζονται οι αεροδυναμικές καμπύλες μαζί με την καμπύλη μηχανική ισχύς-στροφές της γεννήτριας. Πρόκειται ουσιαστικά για τη χαρακτηριστική ελέγχου της ανεμογεννήτριας.



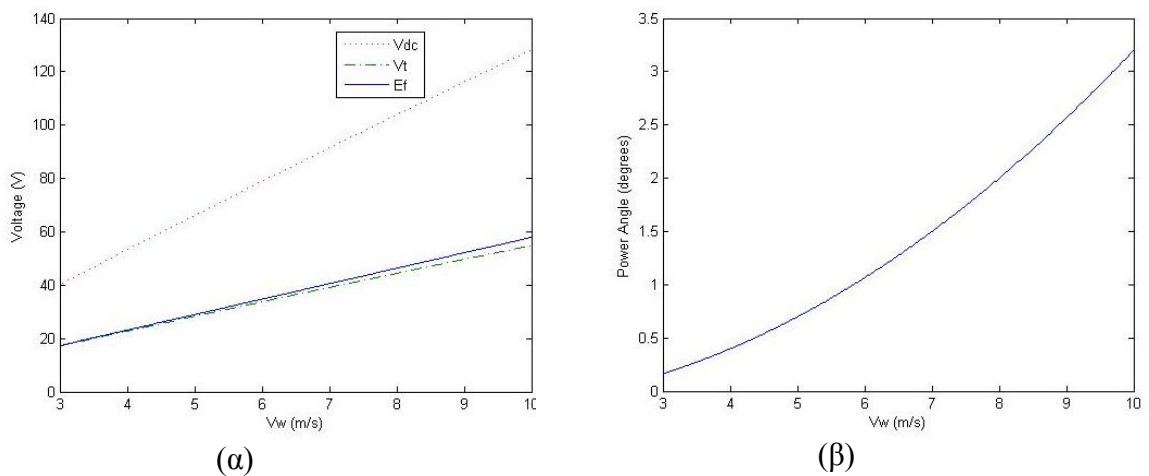
Σχήμα 8.22: Η χαρακτηριστική ελέγχου της γεννήτριας για σύνδεση σε σύστημα MPPT.

Επιπλέον παριστάνονται οι ροπές (μηχανική και ηλεκτρομαγνητική) και τα ρεύματα (dc και ac).



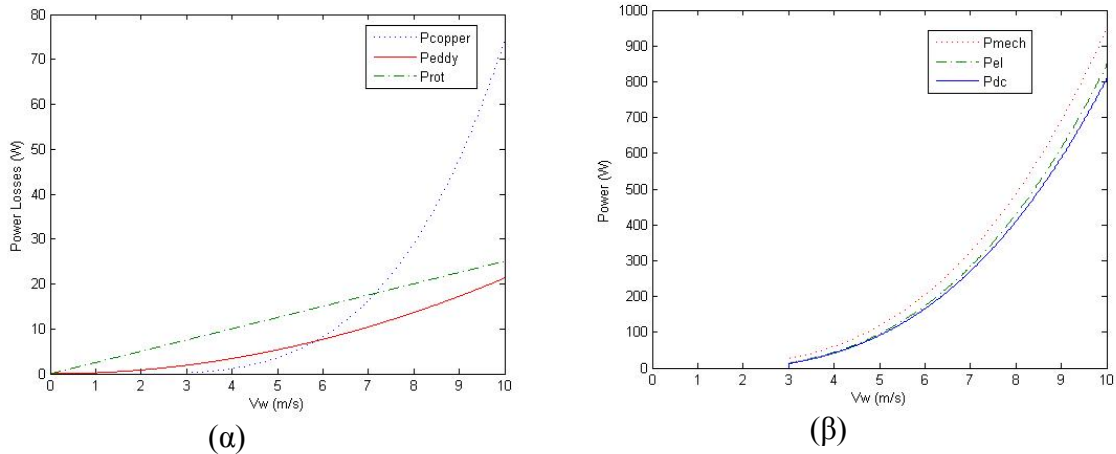
Σχήμα 8.23: Η μεταβολή (α) της ροπής και (β) του ρεύματος για σύνδεση σε σύστημα MPPT.

Στο σχήμα 8.24 φαίνονται οι τάσεις της γεννήτριας. Η τερματική τάση είναι λίγο μικρότερη από την ΗΕΔ εξαιτίας της πτώσης τάσης πάνω στην αντίσταση του τυλίγματος. Η ονομαστική τερματική τάση της γεννήτριας για άνεμο 10 m/s είναι ίση με 54.88 V . Η γωνία ισχύος δ υπολογίζεται στο ίδιο σχήμα. Οι μικρές τιμές τις οφείλονται στην μικρή αυτεπαγωγή του τυλίγματος της γεννήτριας.



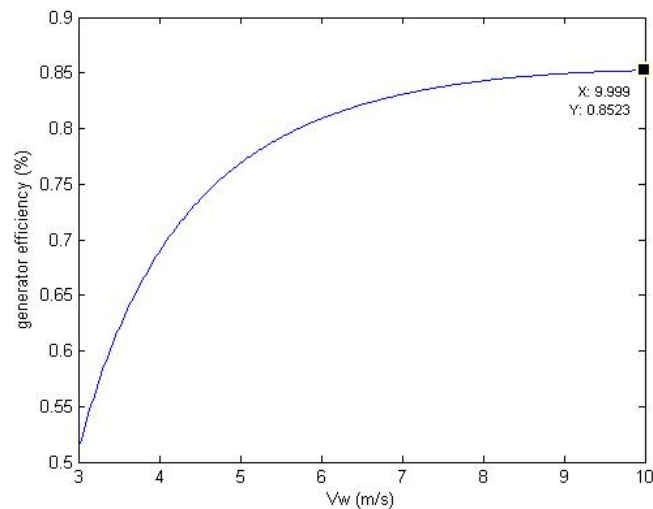
Σχήμα 8.24: Η μεταβολή (α) της τάσης και (β) της γωνίας ισχύος για σύνδεση σε σύστημα MPPT.

Στο σχήμα 8.25 χαράσσονται οι καμπύλες των απωλειών και η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας.



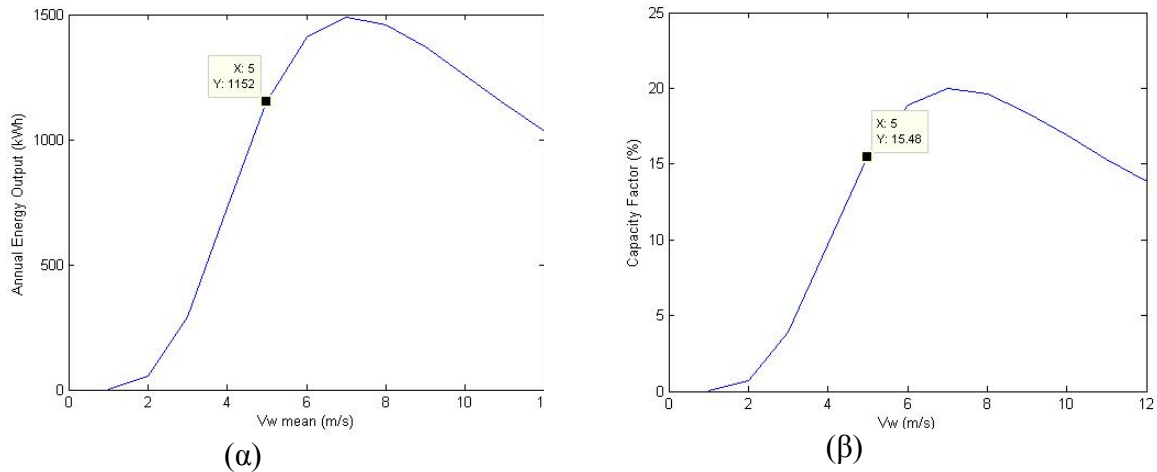
Σχήμα 8.25: Η μεταβολή (α) των απωλειών και (β) της ισχύος για σύνδεση σε σύστημα MPPT.

Η ονομαστική ισχύς που θα εισέρχεται στις μπαταρίες στην περίπτωση αυτή είναι ίση με 810 W. Η βελτίωση σε σχέση με την απευθείας σύνδεση με τους συσσωρευτές είναι προφανής και θα φανεί ακόμα περισσότερο εξετάζοντας την ενεργειακή απόδοση του συστήματος. Πριν από αυτό βρίσκεται η μεταβολή της απόδοσης της γεννήτριας με τον άνεμο (σχήμα 8.26). Συγκρίνοντας με την απευθείας σύνδεση βλέπουμε ότι το εύρος των αποδόσεων μεταβάλλεται από 25%-80% σε 52%-85% επιδεικνύοντας μεγάλη βελτίωση.



Σχήμα 8.26: Η μεταβολή της απόδοσης για σύνδεση σε σύστημα MPPT.

Πλέον μπορεί να βρεθεί και η ενεργειακή απόδοση της γεννήτριας, αλλά και ο συντελεστής χρησιμοποίησης θεωρώντας ονομαστική ισχύ τα 850 W (σχήμα 8.27). Η ενεργειακή απόδοση για μέσο άνεμο 5 m/s είναι ίση με 1152 kWh ενώ ο συντελεστής χρησιμοποίησης ίσος με 15,48 %. Τα αντίστοιχα για απευθείας σύνδεση ήταν 650 kWh και 9,137%.



Σχήμα 8.27: Η μεταβολή (α) της ενεργειακής απόδοσης και (β) του συντελεστή χρησιμοποίησης με τη μέση τιμή του ανέμου για σύνδεση σε σύστημα MPPT.

8.3.4. Βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης-Σύνδεση αυτεπαγωγής

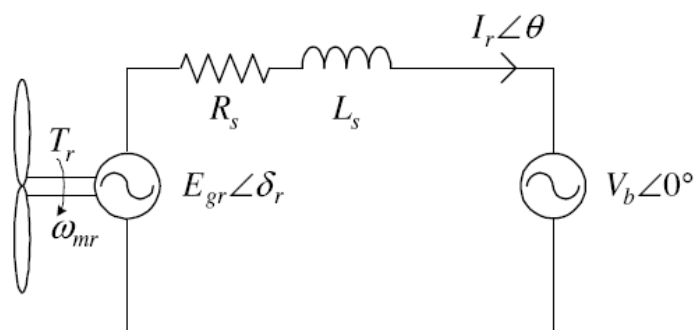
Στο κεφάλαιο 8.3.2. όπου μελετήθηκε η σύνδεση της γεννήτριας απευθείας σε συσσωρευτές εύκολα μπορεί κανείς να καταλάβει ότι η ενεργειακή απόδοση είναι πολύ χαμηλή και ότι η γεννήτρια δεν αξιοποιείται σωστά. Η σύνδεση συστήματος μεγιστοποίησης ισχύος MPPT θα δώσει το καλύτερο αποτέλεσμα αν κάποιος θέλει να βελτιώσει την ενεργειακή απόδοση του συστήματός του. Παρ' όλα αυτά ένα τέτοιο σύστημα είναι αρκετά ακριβό και μπορεί να μη συμφέρει η αγορά του για μια αυτόνομη εγκατάσταση π.χ. μιας οικίας. Πρέπει λοιπόν να βρεθεί ένας νέος, φθηνός τρόπος για να βελτιωθεί η ενεργειακή ισχύς.

Βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης επιτυγχάνεται όσο η καμπύλη ισχύος του συστήματος απευθείας σύνδεσης στους συσσωρευτές προσεγγίζει αυτή του MPPT. Κάτι τέτοιο μπορεί να συμβεί με τη σύνδεση σε σειρά με τη γεννήτρια και πριν από τον ανορθωτή μιας αυτεπαγωγής [17]. Στόχος σύμφωνα με τη συγκεκριμένη έρευνα είναι να διέρχεται η καμπύλη ισχύος από το σημείο ονομαστικού ανέμου - ονομαστικών στροφών- μέγιστης ισχύος. Γνωρίζοντας το σημείο αυτό αλλά και το αντίστοιχο cut-in σημείο γίνεται παρακάτω η ανάλυση για την εύρεση της κατάλληλης αυτεπαγωγής. Παράλληλα η ανάλυση γράφεται σε κώδικα Matlab προκειμένου να εξεταστούν διάφορες περιπτώσεις σημείων από όπου θέλουμε να διέρχεται η καμπύλη ισχύος-στροφών.

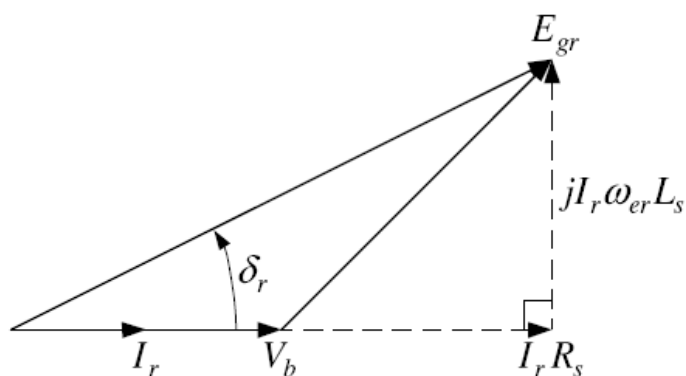
Με την προσθήκη αυτεπαγωγής το σύστημα παραμένει ίδιο με αυτό που μελετήθηκε για την απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές. Η μόνη διαφορά είναι η προσθήκη εν σειρά μιας αυτεπαγωγής σε κάθε φάση. Στόχος στο σημείο αυτό είναι ο υπολογισμός της αυτεπαγωγής αυτής.

Ο υπολογισμός βασίζεται σε δύο σημεία από τα οποία θα διέρχεται η νέα καμπύλη ισχύος. Στόχος είναι αυτή η καμπύλη να προσεγγίζει όσο το δυνατόν περισσότερο την αντίστοιχη του MPPT. Το ένα σημείο θα έχει να κάνει με τις στρόφες στις οποίες το σύστημα θα ξεκινήσει να τροφοδοτεί τους συσσωρευτές. Το άλλο μπορεί να είναι το σημείο ονομαστικής λειτουργίας (για άνεμο 10m/s) ή οποιοδήποτε άλλο σημείο στο οποίο μπορεί να λειτουργήσει η γεννήτρια. Στη συνέχεια η ανάλυση θα γίνει με

χρήση του ισοδύναμου κυκλώματος και του διανυσματικού διαγράμματος των σχημάτων 8.28 και 8.29.



Σχήμα 8.28: Το ισοδύναμο κύκλωμα το συστήματος.



Σχήμα 8.29: Το διανυσματικό διάγραμμα για το παραπάνω κύκλωμα.

όπου:

$$R_s = R_i + R_{cc} + R_e + R_{ac} \quad (8.3)$$

- R_s η συνολική ισοδύναμη αντίσταση του συστήματος
- R_i η αντίσταση του τυλίγματος της γεννήτριας
- R_{cc} η αντίσταση του καλωδίου με το οποίο συνδέεται η γεννήτρια στον ανορθωτή
- R_e η ωμική αντίσταση της αυτεπαγωγής που θα συνδεθεί.
- R_{ac} η ισοδύναμη αντίσταση του συστήματος ανορθωτή-μπαταρίας.

και

$$L_s = L_i + L_{cc} + L_e \quad (8.4)$$

- L_s η ισοδύναμη αυτεπαγωγή του συστήματος
- L_i η αυτεπαγωγή του τυλίγματος της γεννήτριας
- L_{cc} η αυτεπαγωγή του καλωδίου με το οποίο συνδέεται η γεννήτρια στον ανορθωτή
- L_e η αυτεπαγωγή που πρόκειται να συνδεθεί.

Προκειμένου το σύστημα ξεκινήσει να παρέχει ισχύ στους συσσωρευτές (στιγμαία κατάσταση cut-in) η ΗΕΔ της γεννήτριας πρέπει να ξεπεράσει την ισοδύναμη τάση ανορθωτή-μπαταρίας V_b . Από τη στιγμή που η τάση αυτή είναι σταθερή οι στρόφες cut-in δε θα επηρεαστούν από τη σύνδεση αυτεπαγωγής και θεωρούνται ίσες με 227 RPM όπως έχουν υπολογιστεί στις προσομοιώσεις. Θεωρώντας ως δεύτερο σημείο αυτό των ονομαστικών θα ισχύει:

$$\frac{E_{fcutin}}{E_{fnom}} = \frac{n_{cutin}}{n_{nom}} \rightarrow E_{fnom} = V_b \frac{n_{nom}}{n_{cutin}} \quad (8.5)$$

Υποθέτοντας μηδενικές απώλειες αερισμού μπορούμε να υπολογίσουμε την αεροδυναμική ισχύ ίση με:

$$P_{air} = 3E_f I_{rms} \cos\delta \quad (8.6)$$

ενώ ταυτόχρονα από το διανυσματικό διάγραμμα βρίσκουμε:

$$\cos\delta = \frac{V_b + I_{rms}R_s}{E_f} \quad (8.7)$$

$$\sin\delta = \frac{I_{rms}\omega_e L_s}{E_f} \quad (8.8)$$

όπου

$$\omega_e = \frac{2\pi n \text{ poles}}{60 \cdot 2} \quad (8.9)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση (8.7) στη σχέση (8.6) και λύνοντας το τριώνυμο υπολογίζουμε το ρεύμα:

$$I_{rms} = \frac{\sqrt{V_b^2 + \frac{4}{3}R_s P_{air}} - V_b}{2R_s} \quad (8.10)$$

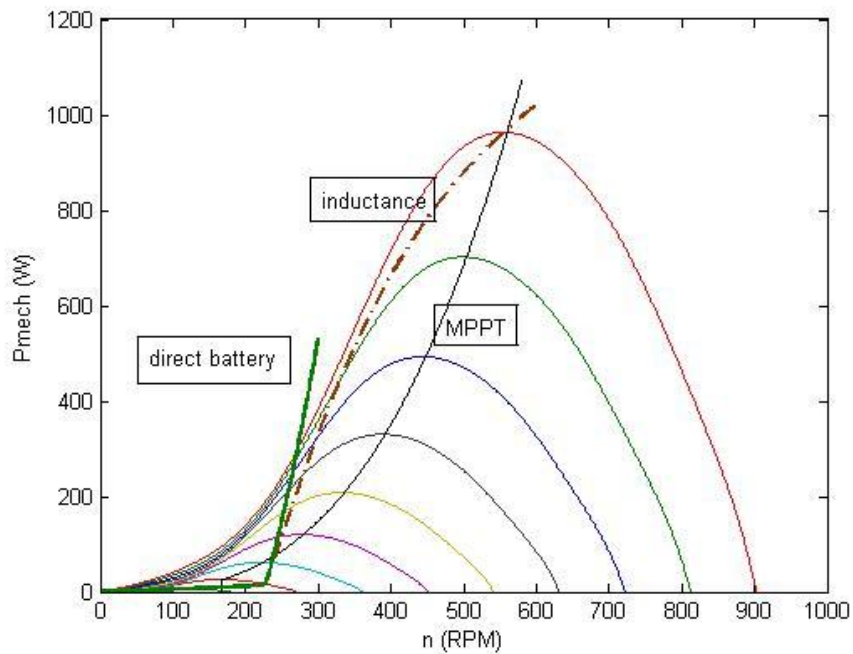
Με δεδομένη την ισχύ (η μέγιστη για άνεμο 10 m/s για τα ονομαστικά ή η ισχύς για οποιοδήποτε άλλο σημείο) και την ισοδύναμη αντίσταση το ρεύμα είναι πλέον γνωστό. Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (8.5), (8.8) και (8.9) στην (8.4) και λύνοντας ως προς την αυτεπαγωγή βρίσκουμε:

$$L_e = \left(\frac{60V_b}{\text{poles} \cdot \pi \cdot n_{cutin}} \right) \frac{\sin\delta}{I_{rms}} - L_{cc} - L_i \quad (8.11)$$

όπου η γωνία δ υπολογίζεται από τη σχέση (8.7) αφού εκτός των άλλων η ΗΕΔ και το ρεύμα είναι επίσης γνωστά.

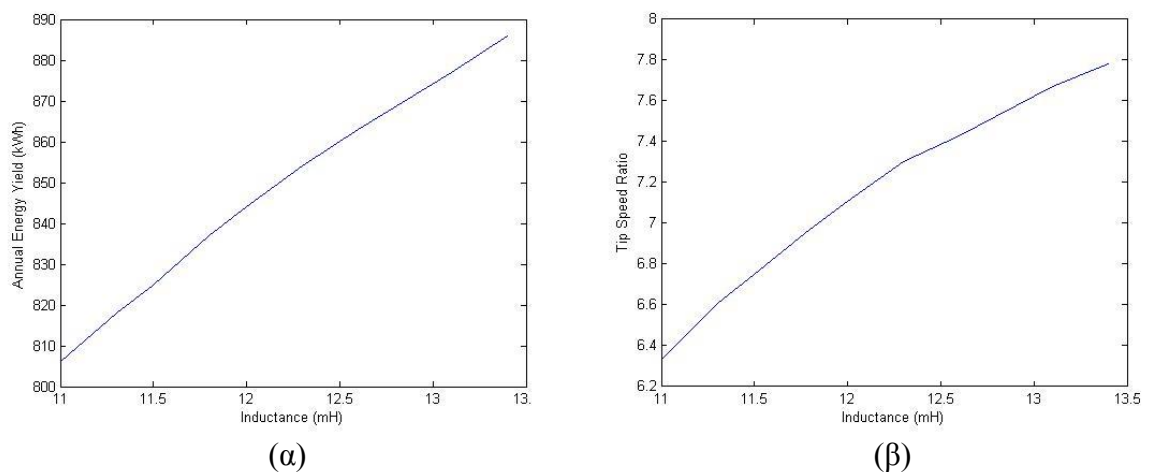
Με χρήση της παραπάνω μεθοδολογίας υπολογίζεται ότι για να περνά η καμπύλη ισχύος από το σημείο μέγιστης ισχύος για άνεμο 10m/s πρέπει σε κάθε φάση να συνδεθεί μία αυτεπαγωγή 11.8 mH (σύνδεση μέσω καλωδίου αντίστασης 0.35 Ω). Τα παραπάνω φαίνονται στο σχήμα 8.30 όπου απεικονίζεται η καμπύλη ισχύος για

λειτουργία σε MPPT, για απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές και για σύνδεση σε συσσωρευτές μέσω αυτεπαγωγής.



Σχήμα 8.30: Οι αεροδυναμικές καμπύλες και οι καμπύλες ισχύος για σύνδεση απευθείας σε συσσωρευτές, σύνδεση μέσω αυτεπαγωγής και σύνδεση MPPT.

Στη συνέχεια υπολογίζεται η ενεργειακή απόδοση για τη σύνδεση αυτεπαγωγών (για μέσο άνεμο 5 m/s) και προκύπτει ίση με 825 kWh, μεγαλύτερη από την απευθείας σύνδεση (680 kWh) και μικρότερη φυσικά από το MPPT (1152 kWh). Στο σημείο αυτό η αυτεπαγωγή αυξάνεται προκειμένου να εξεταστεί η επιρροή της στην ενεργειακή απόδοση αλλά και στο λόγο ταχύτητας ακροπερυγίου λ . Ο τελευταίος γνωρίζουμε από τον σχεδιαστή [2] ότι μπορεί να φτάσει μέχρι και το 8 καθώς από εκεί και πέρα θα εμφανίζονται δονήσεις στη λειτουργία της φτερωτής.

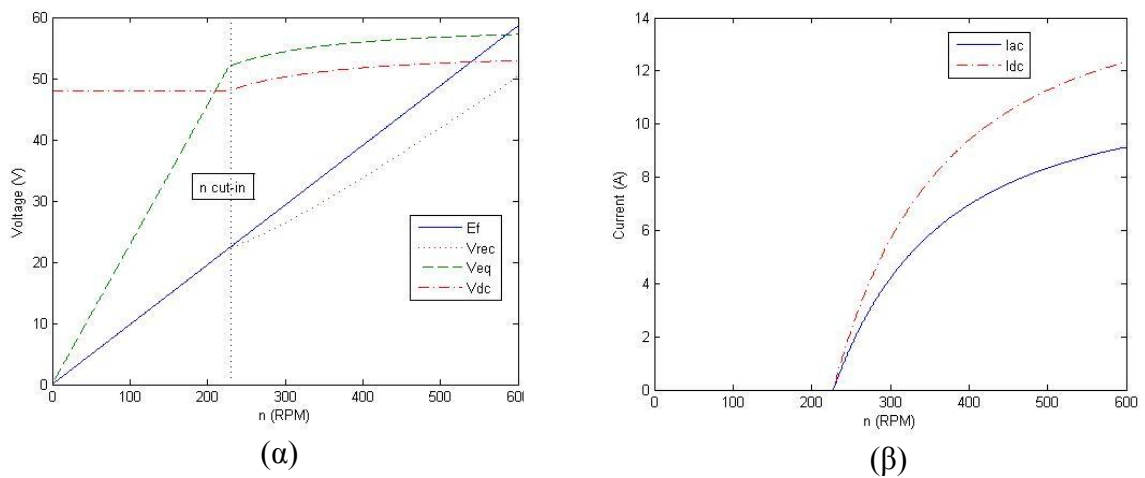


Σχήμα 8.31: (α) Η σχέση της αυτεπαγωγής με την ενεργειακή απόδοση του συστήματος και (β) με το λόγο ταχύτητας ακροπερυγίου.

Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η αυτεπαγωγή αυξάνεται και η ενεργειακή απόδοση αλλά το ίδιο συμβαίνει και με το λ για λειτουργία της γεννήτριας στον ονομαστικό άνεμο.

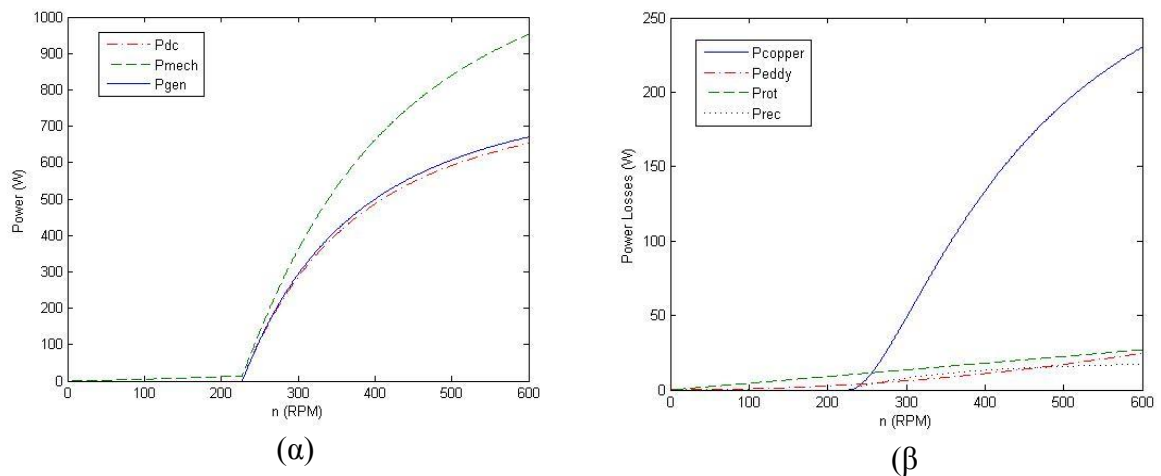
Στο σημείο αυτό επιλέγουμε αυτεπαγωγή ίση με 12.3 mH η οποία είναι διαθέσιμη και προσομοιώνεται η λειτουργία της γεννήτριας. Σε συνθήκες πραγματικής λειτουργίας, όπου η γεννήτρια θα συνδεθεί με καλώδιο μήκους περίπου 60 m και διατομής 6mm² η ενεργειακή απόδοση προκύπτει ίση με 854 kWh. Η ωμική αντίσταση της αυτεπαγωγής θεωρείται περίπου ίση με 0.246 Ω όπως μετρήθηκε η διαθέσιμη των 12.3 mH. Η προσομοίωση που ακολουθεί αφορά την πειραματική διάταξη όπου το καλώδιο έχει αντίσταση 0.06 Ω .

Στο σχήμα 8.32 φαίνονται όλες οι τάσεις που αναπτύσσονται στο σύστημα και παρουσιάζονται τα ρεύματα.



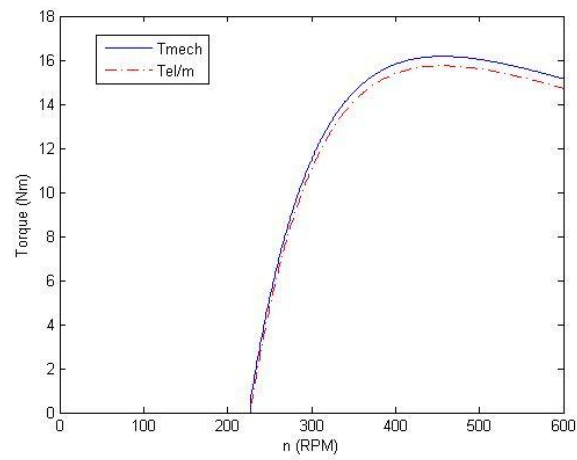
Σχήμα 8.32: (α) Οι τάσεις που αναπτύσσονται στο σύστημα σε σχέση με τις στροφές και (β) τα ρεύματα της γεννήτριας σε σχέση με τις στροφές.

Η ισχύς φαίνεται στο σχήμα 8.33 όπου φαίνονται και οι απώλειες σε σχέση με τις στροφές.



Σχήμα 8.33: (α) Η DC, AC και μηχανική ισχύς του συστήματος και (β) οι απώλειες ισχύος της γεννήτριας σε σχέση με τις στροφές.

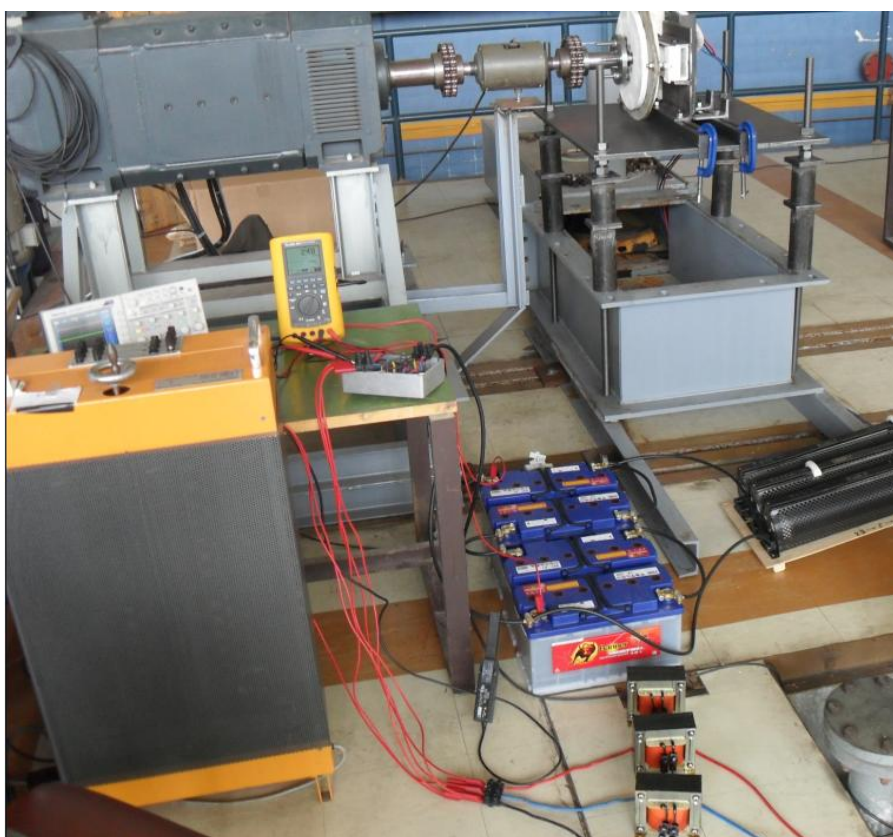
Με γνωστή την ισχύ μπορούν πλέον να υπολογιστούν και οι ροπές απλά διαιρώντας κάθε ισχύ με την αντίστοιχη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής. Προκύπτουν έτσι και οι καμπύλες τη ροπής (μηχανικής και ηλεκτρομαγνητικής):



Σχήμα 8.34: Η μηχανική και ηλεκτρομαγνητική ροπή που αναπτύσσει η γεννήτρια.

9. Μέτρηση της γεννήτριας σε DC σύνδεση

Η γεννήτρια 850 W που σχεδιάστηκε για σύνδεση σε συσσωρευτές θα μετρηθεί στο Εργαστήριο Υδροδυναμικής του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Η γεννήτρια θα μετρηθεί ανοιχτοκυκλωμένη με αντιστροφέα και χωρίς, με τριφασικό και μονοφασικό φορτίο, με σύνδεση απευθείας στους συσσωρευτές αλλά και με τη σύνδεση αυτεπαγωγής. Καθώς ο ουδέτερος της γεννήτριας αυτής είχε μείνει στο εσωτερικό της δεν ήταν δυνατόν να μετρηθούν φασικά μεγέθη αλλά έπρεπε να μετρούνται ανά δύο τα πολικά. Έτσι λαμβάνονταν πρώτα μέτρηση για τις πολικές τάσεις V_{ab} και V_{ac} και στη συνέχεια για τις τάσεις V_{ba} και V_{bc} στον παλμογράφο.



Σχήμα 9.1: Η πειραματική διάταξη περιλαμβάνει DC κινητήρα, ροτόμετρο, γεννήτρια 850 W, παλμογράφο, ωμικό τριφασικό φορτίο, τριφασική ανόρθωση γέφυρας, μπαταρίες 48 V, τριφασική αυτεπαγωγή, DC ωμικό φορτίο.

9.1: Μέτρηση της γεννήτριας υπό συνθήκες ανοιχτοκύκλωσης

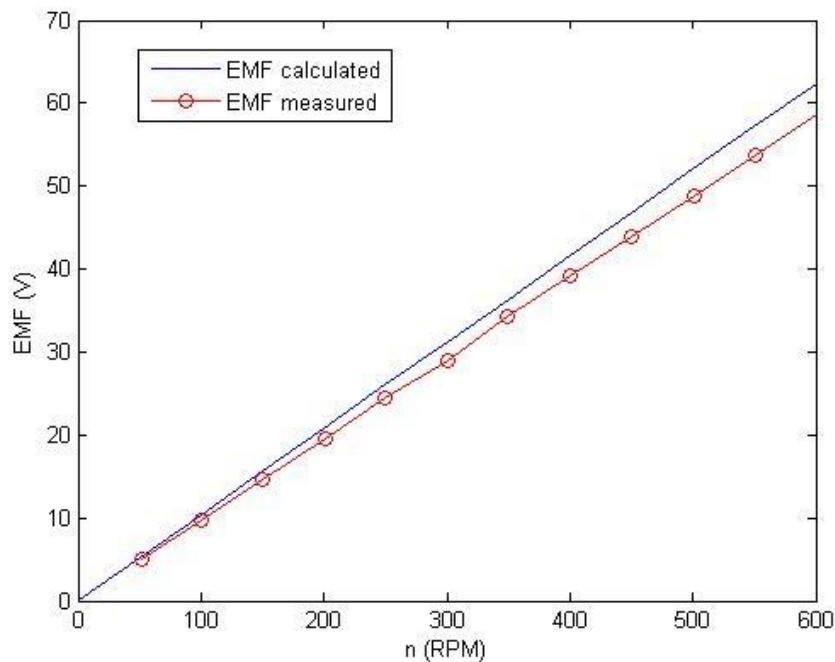
Στο σημείο αυτό θα μετρηθεί η ΗΕΔ της γεννήτριας καθώς και η DC τάση ανοιχτοκύκλωσης όταν συνδέεται ανορθωτής στην έξοδο.

Αρχικά θα μετρηθεί η ΗΕΔ της γεννήτριας στρέφοντάς την ανοιχτοκυκλωμένη. Οι μετρήσεις φαίνονται στον Πίνακα 9.1:

n (RPM)	Efab (V)	Efac (V)	Efbc (V)	Efavg πολική (V)	Efavg φασική (V)
51.33	8.56	8.67	8.74	8.66	4.99
100	16.8	16.9	17.2	16.97	9.8
149.7	25.4	25.4	25.2	25.33	14.62
200.8	33.5	33.8	34.6	33.97	19.61
250	41.7	42.2	43.6	42.5	24.53
300.3	50.5	50.8	51.8	51.03	28.88
349.7	58.6	59	60.3	59.3	34.24
400	67.4	67.6	69	68	39.25
449.6	75.5	75.7	77.4	76.2	43.99
500.5	83.9	84.1	85.9	84.63	48.86
550.7	94.8	91.7	92.3	92.93	53.65
601.7	101	101	103	101.67	58.7

Πίνακας 9.1: Η πολική και φασική ΗΕΔ της γεννήτριας.

Η σχέση της ΗΕΔ με τις στροφές όπως μετρήθηκε και όπως προσομοιώθηκε φαίνεται στο σχήμα 9.2. Οι μικρές αποκλίσεις της τάσης μεταξύ των διαφόρων φάσεων οφείλονται σε ασυμμετρία στην κατασκευή του τυλίγματος (κάποια πηνία έχουν περισσότερες σπείρες κλπ).

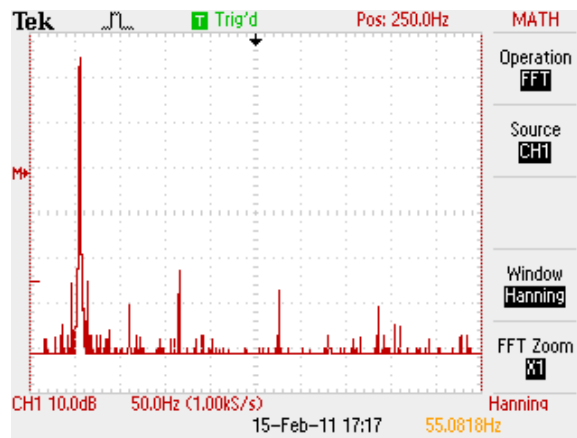
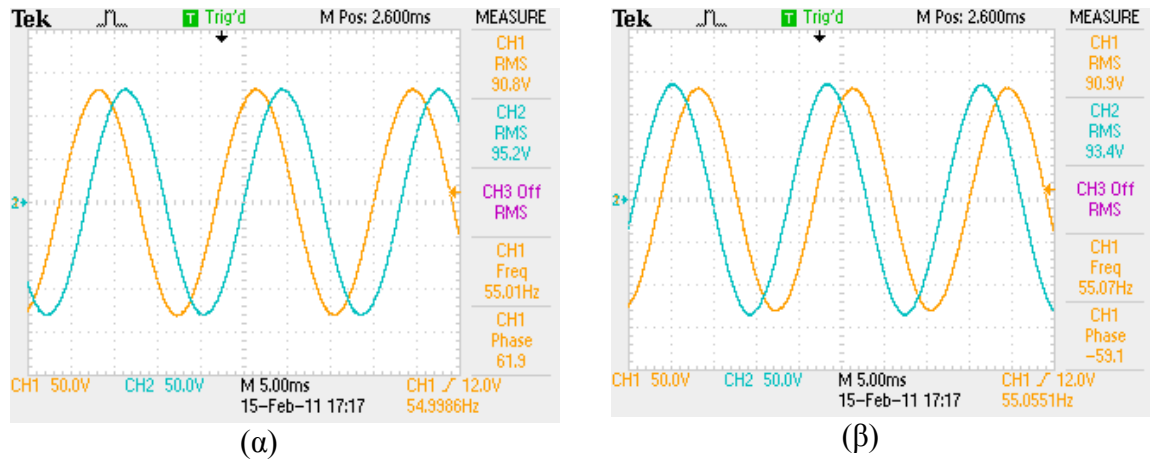


Σχήμα 9.2: Η φασική ΗΕΔ με την ταχύτητα περιστροφής όπως μετρήθηκε στο εργαστήριο και όπως υπολογίστηκε στην προσομοίωση.

Η απόκλιση της προσομοίωσης από την πραγματικότητα είναι γύρω στο 6 %, σφάλμα που συσσωρεύεται στα επόμενα μεγέθη. Η πραγματική ΗΕΔ έχει εξίσωση:

$$E_f = 0.0976 \cdot n + 0.0058$$

Η γεννήτρια αφήνεται να λειτουργήσει στα ονομαστικά της ανοιχτοκυκλωμένη και λαμβάνονται τα στιγμιότυπα των τριών πολικών τάσεων που φαίνονται στο σχήμα 9.3. Στα παρακάτω παλμογραφήματα παρατηρούμε ότι οι φάσεις έχουν διαφορά περίπου 60° μεταξύ τους, κάτι που είναι αναμενόμενο για τις πολικές τάσεις ενός τριφασικού συστήματος. Επίσης, φαίνεται ένα καθαρό ημίτονο που επιβεβαιώνεται και από τις λίγες αρμονικές της ανάλυσης Fourier.



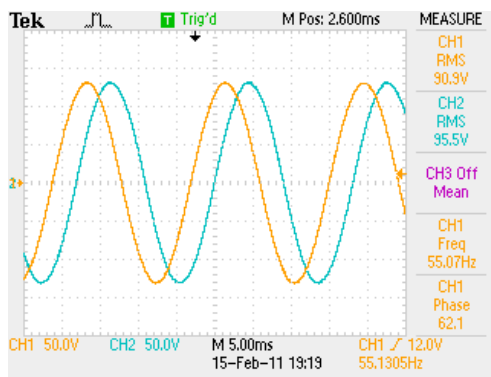
Σχήμα 9.3: Η πολική τάση της γεννήτριας: (α) οι τάσεις E_{fab} και E_{fac} (β) οι τάσεις E_{fba} και E_{fbc} (γ) η ανάλυση Fourier της τάσης μεταξύ των φάσεων A και B.

Στη συνέχεια στη διάταξη προστίθεται ανορθωτής και μετράται και πάλι η ΗΕΔ (πολική) στον παλμογράφο καθώς επίσης και η έξοδος του ανορθωτή με πολύμετρο. Οι μετρήσεις φαίνονται στον Πίνακα 9.2:

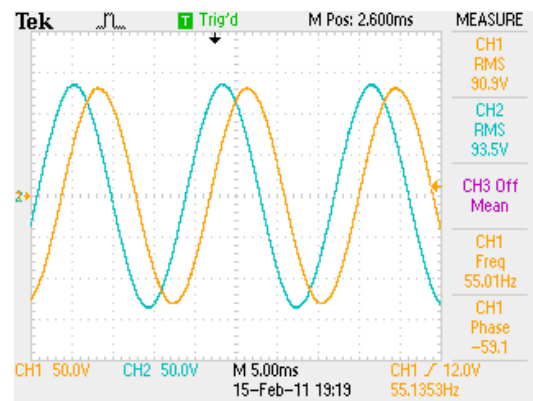
n (RPM)	Efab (V)	Efac (V)	Efbc (V)	Efavg πολική (V)	Efavg φασική (V)	Vdc measured (V)	Vdc calculated (V)
50.97	8.5	8.61	8.66	8.59	4.96	11.70	11.60
102.6	17.3	17.5	17.6	17.47	10.08	22.68	23.58
149.9	25.1	25.2	25.7	25.33	14.63	35.10	34.20
200.8	33.6	33.7	34.5	33.93	19.59	45.36	45.81
250.8	41.7	42	42.8	42.17	24.34	57.11	56.93
300.1	50.4	50.7	51.8	50.97	29.43	68.18	68.81
352.1	58.9	61.8	58.4	59.70	34.47	79.65	80.60
400.6	67.47	67.7	69	68.06	39.29	91.26	91.88
450.5	76.5	73.6	79.6	76.57	44.21	102.87	103.37
500	84	84.6	86.2	84.93	49.04	113.54	114.66
550.1	90.9	95.5	93.5	93.30	53.87	125.15	125.96

Πίνακας 9.2: Πολικές τάσεις και DC τάση ανοιχτοκύκλωσης για διάφορες ταχύτητες περιστροφής.

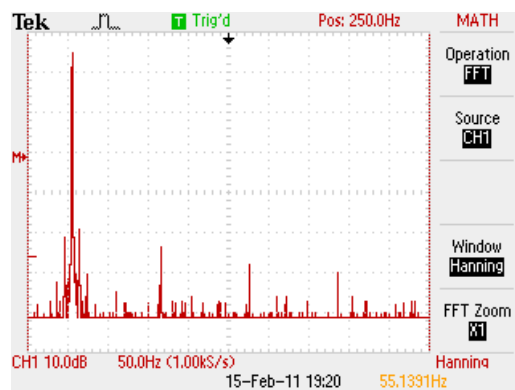
Για λειτουργία με ανορθωτή στις ονομαστικές στροφές λαμβάνονται τα παρακάτω παλμογραφήματα της ΗΕΔ καθώς και η αντίστοιχη ανάλυση Fourier:



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 9.4: Η πολική ΗΕΔ της γεννήτριας υπό ανορθωτή: (α) οι τάσεις Efab και Efac (β) οι τάσεις Efba και Efbc (γ) η ανάλυση Fourier της τάσης μεταξύ των φάσεων Α και Β.

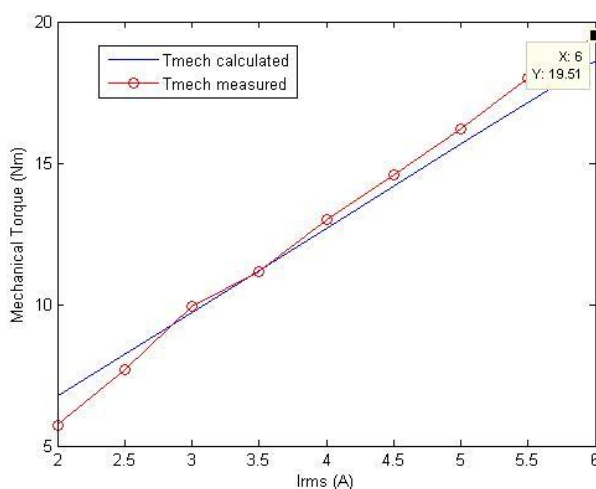
Παρατηρούμε από τα παραπάνω ότι η σύνδεση ανορθωτή δεν επηρεάζει την κυματομορφή της ΗΕΔ της γεννήτριας. Η DC τάση ανοιχτοκύκλωσης μετράται σχεδόν ίση με αυτή που προκύπτει από τη θεωρία των ανορθωτών.

9.2: Μέτρηση της μηχανικής ροπής, της τερματικής τάσης και της απόδοσης υπό ωμικό τριφασικό φορτίο.

Η γεννήτρια συνδέεται σε τριφασικό, καθαρά ωμικό φορτίο. Οι στροφές θα παραμείνουν σταθερές στην ονομαστική τους τιμή (550) και θα μεταβάλλεται το φορτίο ώστε να μεταβάλλεται το ρεύμα. Για κάθε ρεύμα μέχρι και λίγο πάνω από το ονομαστικό θα λαμβάνεται μέτρηση της μηχανικής ροπής που ασκεί ο κινητήρας στη γεννήτρια μέσω του ροπομέτρου. Επειδή το συγκεκριμένο ροτόμετρο μετράει γενικά μεγάλες ροπές, σφάλματα θα υπεισέρχονται σε μετρήσεις πολύ χαμηλών ροπών (για χαμηλά δηλαδή ρεύματα). Οι μετρήσεις για τη ροπή φαίνονται στον Πίνακα 9.3, ενώ η καμπύλη ροπής-ρεύματος όπως αυτή προκύπτει από τις μετρήσεις και από την προσομοίωση φαίνεται στο σχήμα 9.5.

I _{rms} (A)	T _{mech} (Nm)
2	5.74
2.5	7.68
3	9.92
3.5	11.18
4	13.02
4.5	14.59
5	16.19
5.5	18.02
6	19.51

Πίνακας 9.3: Η μηχανική ροπή για διαφορετικά φορτία.



Σχήμα 9.5: Η σχέση της ροπής με το ρεύμα όπως αυτή μετρήθηκε στο εργαστήριο και όπως προέκυψε από την προσομοίωση.

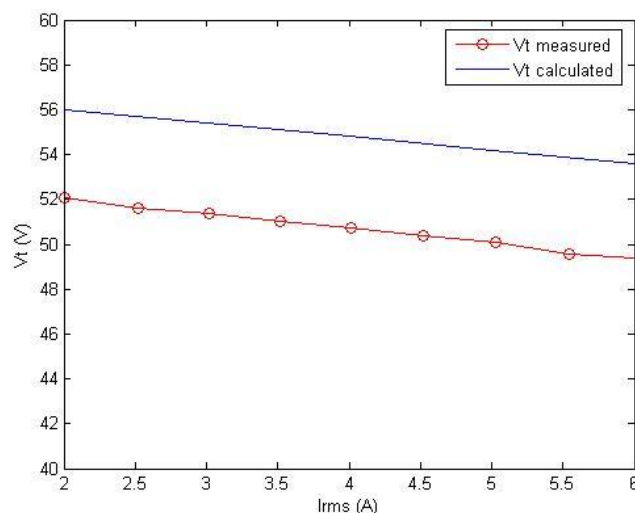
Το σφάλμα που παρουσιάζεται στη ροπή είναι ίσο με 4.5% περίπου ενώ η εξίσωση που προκύπτει από τις εργαστηριακές μετρήσεις είναι η ακόλουθη:

$$T_{mech} = 3.4 \cdot I_{rms} - 0.73$$

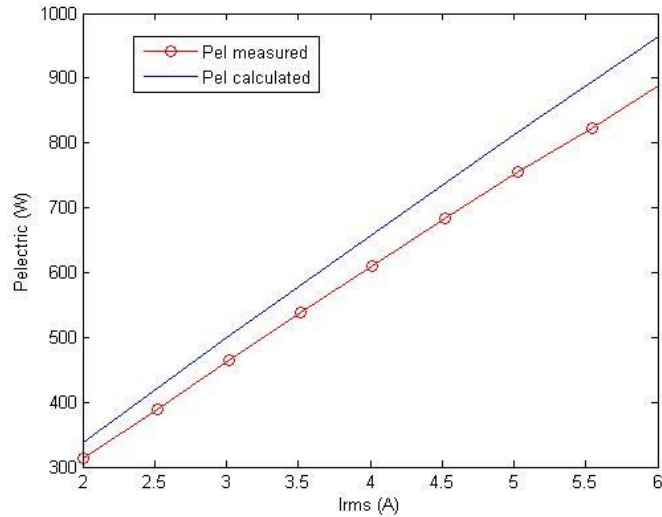
Στο ίδιο πείραμα μετράται ταυτόχρονα η τερματική τάση της γεννήτριας με τη βοήθεια του παλμογράφου για ονομαστικές στροφές. Οι μετρήσεις φαίνονται στον Πίνακα 9.4 όπου ταυτόχρονα υπολογίζεται και η ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο της γεννήτριας. Στη συνέχεια γίνεται η γραφική παράσταση της τερματικής τάσης σε σχέση με το ρεύμα (σχήμα 9.6) και της ηλεκτρικής ισχύος σε σχέση με το ρεύμα (σχήμα 9.7) όπου φαίνονται και οι αναμενόμενες από την προσομοίωση τιμές.

I _{rms} (A)	V _{ab} (V)	V _{ac} (V)	V _{bc} (V)	V _t avg πολική (V)	V _t avg φασική (V)	P _{electric} (W)
2.00	88.9	89.9	91.8	90.20	52.08	312.46
2.52	88.0	89.1	90.9	89.33	51.58	389.92
3.02	87.6	88.7	90.5	88.93	51.35	465.19
3.52	87.0	88.3	89.9	88.40	51.04	538.96
4.01	86.4	87.7	89.5	87.87	50.73	610.28
4.52	85.7	87.3	88.8	87.27	50.38	683.20
5.03	85.1	86.7	88.3	86.70	50.06	755.35
5.54	84.3	85.9	87.4	85.87	49.58	823.94
6.03	83.8	85.5	87.2	85.50	49.36	892.98

Πίνακας 9.4: Η τερματική τάση, το ρεύμα και η ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας

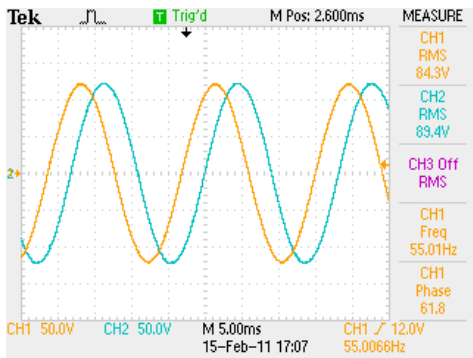


Σχήμα 9.6: Η τερματική τάση της γεννήτριας (φασική) σε σχέση με το ρεύμα (εργαστηριακή και προσομοίωση).

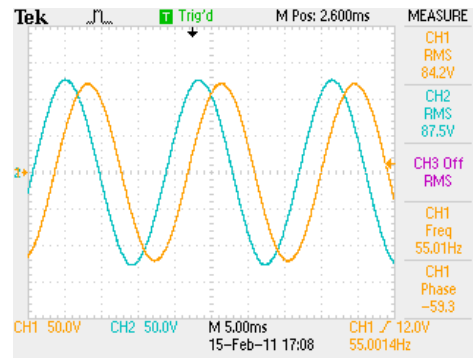


Σχήμα 9.7: Η ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο της γεννήτριας σε σχέση με το ρεύμα (εργαστηριακή και προσομοίωση).

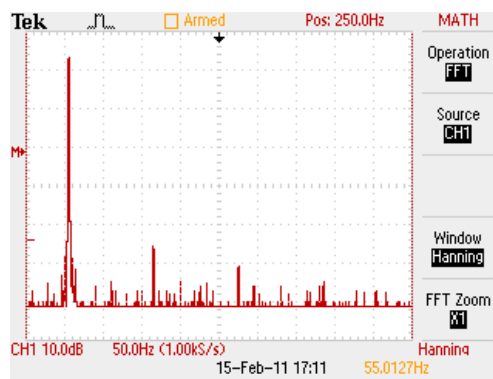
Το σφάλμα για την τερματική τάση είναι ίσο με 8% περίπου ενώ για την ηλεκτρική ισχύ είναι περίπου ίσο με 7.7%. Η γεννήτρια αφήνεται να λειτουργήσει υπό ονομαστικές στροφές και φορτίο οπότε προέκυψαν τα παρακάτω παλμογραφήματα:



(α)

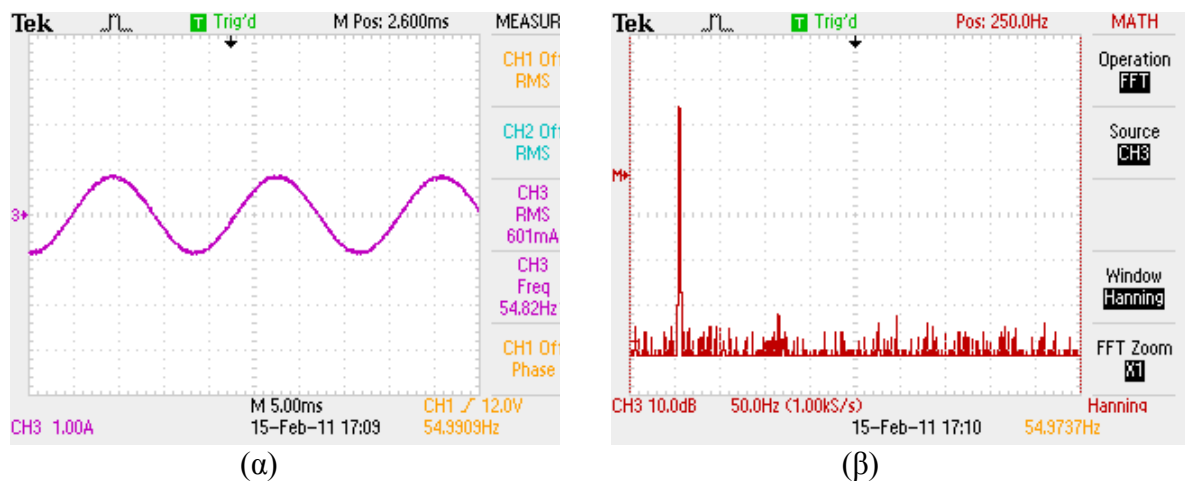


(β)



(γ)

Σχήμα 9.8: Μέτρηση της τερματικής τάσης υπό τριφασικό ωμικό φορτίο: (α) οι τάσεις V_{tab} και V_{tac} . (β) οι τάσεις V_{tba} και V_{tbc} και (γ) η ανάλυση Fourier για την τάση V_{tba} .



Σχήμα 9.9: (α) Το ρεύμα της γεννήτριας υπό ωμικό τριφασικό φορτίο και (β) η ανάλυση Fourier.

Παρατηρούμε ότι για λειτουργία υπό τριφασικό φορτίο η γεννήτρια δεν εμφανίζει αρμονικές τόσο στην τάση όσο και στο ρεύμα της.

Τέλος πρέπει να υπολογιστεί η απόδοση της γεννήτριας για λειτουργία στις 550 RPM. Γνωρίζοντας τη μηχανική ροπή για κάθε ρεύμα αλλά τις στροφές μπορούμε να υπολογίσουμε τη μηχανική ισχύ στην είσοδο της γεννήτριας. Η ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο έχει ήδη υπολογιστεί στον Πίνακα 9.4 ενώ στον Πίνακα 9.5 υπολογίζεται και η απόδοση.

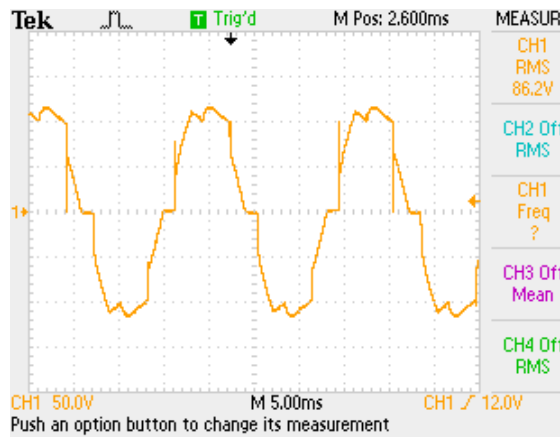
Irms (A)	Vt avg φασική (V)	Pelectric (W)	Tmech (Nm)	Pmech (W)	Efficiency (%)
2.00	52.08	312.46	5.74	330.25	94.61
2.52	51.58	389.92	7.68	442.03	88.21
3.02	51.35	465.19	9.92	571.26	81.43
3.52	51.04	538.96	11.18	643.62	83.74
4.01	50.73	610.28	13.02	749.39	81.44
4.52	50.38	683.20	14.59	840.01	81.33
5.03	50.06	755.35	16.19	932.17	81.03
5.54	49.58	823.94	18.02	1037.24	79.44
6.03	49.36	892.98	19.51	1123.39	79.49

Πίνακας 9.5: Εύρεση της απόδοσης για λειτουργία σε ονομαστικές στροφές.

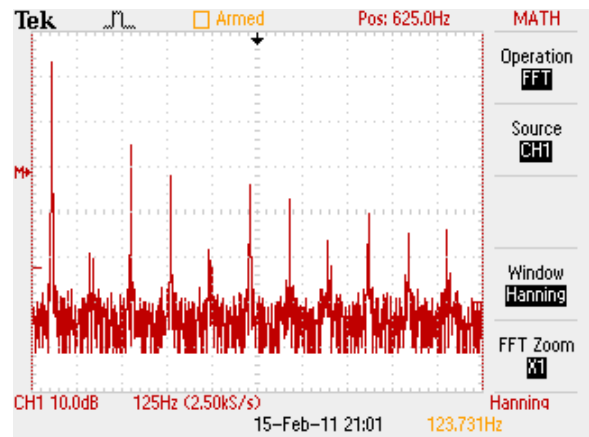
9.3: Μέτρηση της γεννήτριας υπό μονοφασικό φορτίο

Στο σημείο αυτό η γεννήτρια συνδέεται και πάλι με τον ανορθωτή προκειμένου εξετασθεί η λειτουργία της υπό μονοφασικό φορτίο. Στρέφουμε τη γεννήτρια στις ονομαστικές της στροφές και μεταβάλλουμε το φορτίο μέχρι να προκύψει ονομαστικό ρεύμα. Όλες οι τάσεις (AC και DC) καθώς και τα ρεύματα μετρώνται στον παλμογράφο. Οι κυματομορφές της τερματικής τάσης και του ρεύματος είναι

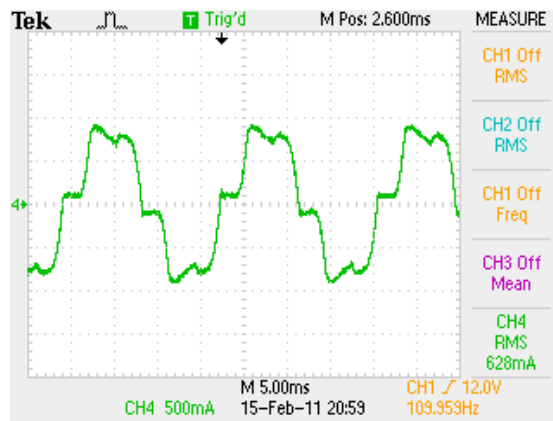
πολύ αλλοιωμένες λόγω του ανορθωτή και φαίνονται στο σχήμα 9.10 μαζί με την ανάλυση Fourier που δείχνει πόσο έχουν αυξηθεί οι αρμονικές.



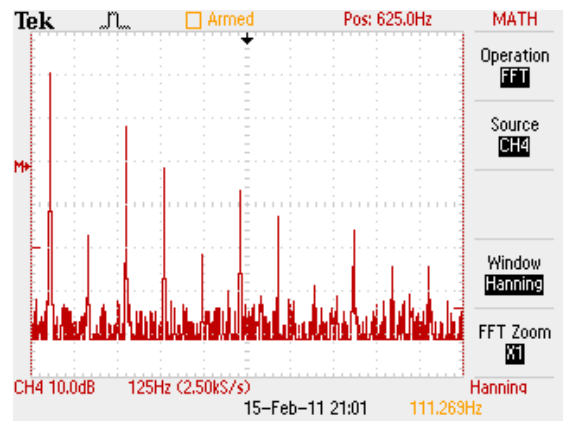
(α)



(β)



(γ)



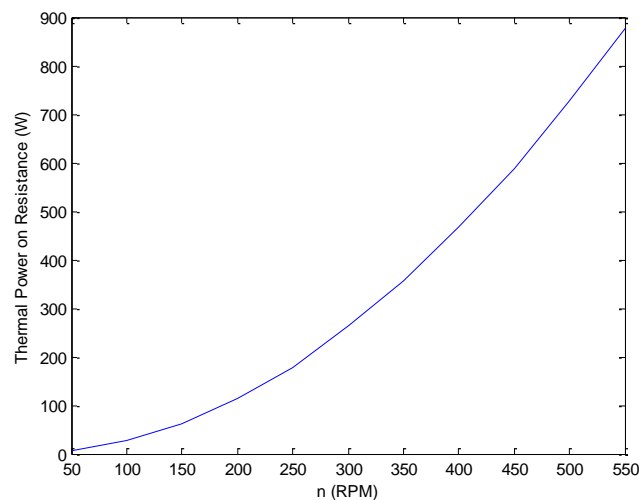
(δ)

Σχήμα 9.10: Σύνδεση ανορθωτή και μονοφασικού φορτίου: (α) Η κυματομορφή της τάσης και (β) οι αρμονικές της (γ) η κυματομορφή του ρεύματος και (δ) οι αρμονικές του.

Στο σημείο αυτό του πειράματος μετράται το φορτίο ίσο με 15.17Ω και εξετάζεται η λειτουργία της γεννήτριας σε περίπτωση που είχε αυτό το φορτίο σταθερά στην έξοδό της (εφαρμογή θέρμανσης). Έτσι σταδιακά μειώνονται οι στροφές και μετρώνται οι τάσεις αλλά και τα ρεύματα τόσο στην AC όσο και στην DC πλευρά. Η γεννήτρια παρουσίασε θόρυβο από τις 320 στροφές περίπου και μετά. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 9.6, ενώ ταυτόχρονα υπολογίζεται η ισχύς της γεννήτριας σε σχέση με τις στροφές της η γραφική παράσταση της οποίας φαίνεται στο σχήμα 9.11.

n (RPM)	V _{tab} (V)	V _{tac} (V)	V _{tbc} (V)	V _{t avg} (V)	I _{ac} (A)	V _{dc} (V)	I _{dc} (A)	P _{ac} (W)	P _{dc} (W)
50	7.84	7.92	8.15	7.97	0.35	9.70	0.63	4.83	6.11
100	15.5	15.6	15.9	15.67	0.93	19.9	1.37	25.24	27.26
150	23.0	23.8	23.3	23.37	1.53	29.5	2.11	61.92	62.25
200	30.9	31.2	31.8	31.30	2.18	40.1	2.87	118.18	115.09
250	38.5	39.5	38.6	38.87	2.75	49.7	3.60	185.13	178.92
300	46.2	46.3	47.3	46.60	3.40	59.7	4.41	274.43	263.28
350	55.8	54.6	56.0	55.47	4.03	69.5	5.13	387.17	356.54
400	61.4	63.1	61.8	62.10	4.57	79.1	5.89	491.55	465.90
450	70.2	66.7	71.9	69.60	5.07	89.2	6.59	611.19	587.83
500	76.6	76.8	78.4	77.27	5.70	98.9	7.35	762.83	726.92
550	87.1	81.5	81.6	83.40	6.13	109	8.04	885.50	876.36

Πίνακας 9.6: Η τάση, το ρεύμα και η ισχύς της γεννήτριας σε σχέση με τις στροφές για σταθερό ωμικό φορτίο 15.17 Ω.



Σχήμα 9.11: Η ισχύς της γεννήτριας σε σχέση με τις στροφές για σταθερό ωμικό φορτίο.

Στη συνέχεια υπολογίζεται με χρήση της σχέσης μηχανική ροπή-ρεύμα η ισχύς στην είσοδο της γεννήτριας προκειμένου να βρεθεί η απόδοσή της για τη συγκεκριμένη λειτουργία. Οι μετρήσεις φαίνονται στον Πίνακα 9.7.

Iac (A)	Pdc (W)	Tmech (Nm)	Pmech (W)	Efficiency (%)
2.18	118.18	6.68	139.9	84.45
2.75	185.13	8.62	225.7	82.04
3.40	274.43	10.83	340.2	80.66
4.03	387.17	12.97	475.4	81.43
4.57	491.55	14.81	620.3	79.25
5.07	611.19	16.51	777.9	78.57
5.70	762.83	18.65	976.5	78.12
6.13	885.50	20.11	1158.4	76.44

Πίνακας 9.7: Η απόδοση της γεννήτριας για σταθερό μονοφασικό ωμικό φορτίο στην έξοδο.

9.4: Μέτρηση της αντίστασης του τυλίγματος

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να μετρηθεί η αντίσταση του τυλίγματος της γεννήτριας όταν αυτή είναι ζεστή. Αποσυνδέουμε εντελώς τη γεννήτρια και με ένα τροφοδοτικό δίνουμε κάποια ρεύματα σε κάθε φάση και παρατηρούμε την τάση που αναπτύσσει το τροφοδοτικό. Στη συνέχεια με το νόμο του Ohm υπολογίζεται για κάθε φάση η αντίσταση. Οι μετρήσεις φαίνονται στον Πίνακα 9.8. Ο μέσος όρος της αντίστασης είναι ίσος με 1.2 Ω. Η τιμή που περιμέναμε από τη θεωρία ήταν 1.17 Ω.

Φάσεις A-B		
I (A)	V _{A-B} (V)	R _{A-B} (Ω)
1.6	1.30	1.23
2.4	2.01	1.19
3.6	3.02	1.19
4.9	4.04	1.21
Φάσεις B-C		
I (A)	V _{B-C} (V)	R _{A-B} (Ω)
1.2	1.01	1.19
2.4	2.01	1.19
3.6	3.00	1.20
4.8	4.01	1.20
Φάσεις A-C		
I (A)	V _{A-C} (V)	R _{A-B} (Ω)
1.2	1.00	1.20
2.4	2.00	1.20
3.6	3.00	1.20
4.8	4.01	1.20
R _{AVG} (Ω)	1.20	

Πίνακας 9.8: Μέτρηση της αντίστασης κάθε φάσης του τυλίγματος.

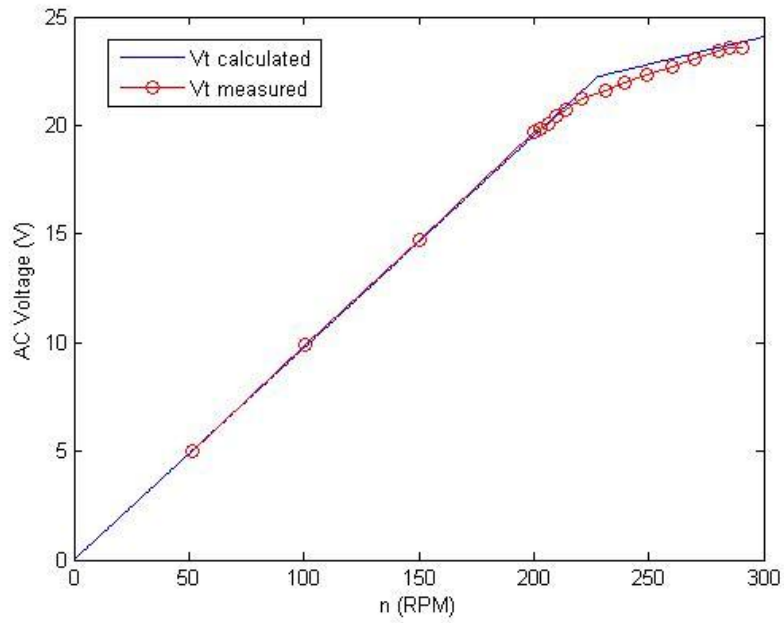
9.5: Μέτρηση της λειτουργίας της γεννήτριας συνδεδεμένης σε συσσωρευτές

Στην έξοδο του ανορθωτή συνδέονται 4 συσσωρευτές τάσης 12 V συνθέτοντας ένα σύστημα τάσης 48 V. Οι στροφές μεταβάλλονται σταδιακά μέχρι να παρατηρηθεί ότι το σύστημα δίνει ενέργεια στις μπαταρίες και στη συνέχεια αυξάνονται έως ότου να μετρηθεί το ονομαστικό ρεύμα της γεννήτριας. Οι μετρήσεις φαίνονται στον Πίνακα 9.9:

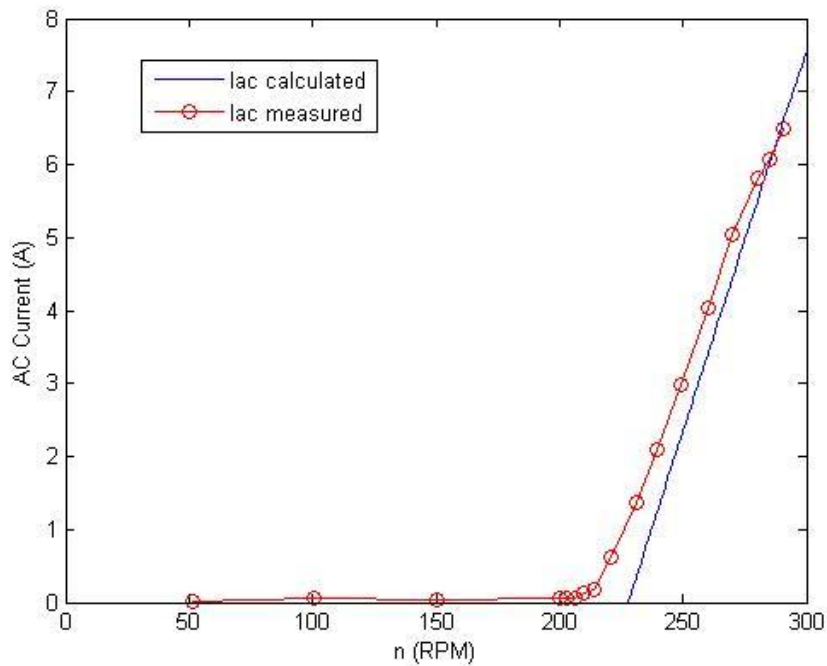
n (RPM)	V _{tab} (V)	V _{tac} (V)	V _{tbc} (V)	V _{tavg} (V)	I _{ac} (A)	V _{dc} (V)	I _{dc} (V)	P _{dc} (W)
51.3	8.5	8.63	8.83	8.65	0.01	48.1	0.06	2.89
100.3	17.0	17.1	17.4	17.17	0.05	48.1	0.06	2.89
150.0	25.3	25.8	25.3	25.47	0.04	48.1	0.06	2.89
200.0	33.7	33.9	34.6	34.07	0.05	48.1	0.06	2.89
203.0	33.9	34.0	35.1	34.33	0.05	48.1	0.08	3.85
206.0	34.3	34.3	35.8	34.80	0.05	48.1	0.15	7.22
210.0	34.9	34.7	36.7	35.43	0.13	48.1	0.35	16.84
214.0	35.4	35.1	37.3	35.93	0.18	48.1	0.48	23.09
221.0	35.6	36.3	38.4	36.77	0.61	48.2	1.08	52.06
231.0	36.7	36.7	39.0	37.47	1.37	48.4	2.13	103.09
239.5	37.4	37.4	39.2	38.00	2.10	48.7	3.08	149.00
249.0	38.3	38.5	39.2	38.67	2.98	49.0	4.28	209.72
260.0	39.3	39.0	39.8	39.37	4.04	49.5	5.70	282.15
270.0	39.7	40.7	39.3	39.90	5.03	49.9	6.80	339.32
280.0	40.0	41.2	40.6	8.65	5.81	50.2	7.96	399.59
285.0	40.2	41.4	40.7	17.17	6.07	50.4	8.57	431.93
291.0	40.5	41.7	40.3	25.47	6.49	50.5	9.01	455.01

Πίνακας 9.9: Τα ρεύματα, οι τάσεις και οι ισχύεις του συστήματος για απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές.

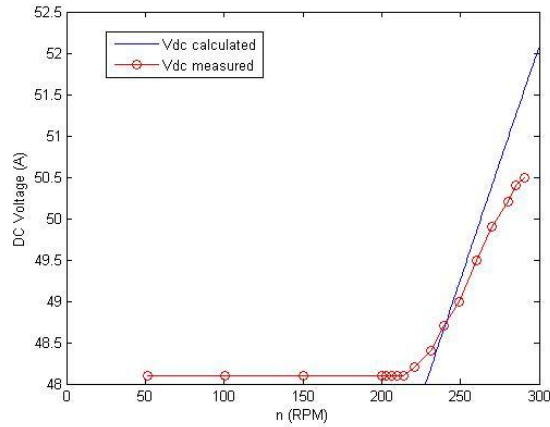
Με βάση τα δεδομένα του παραπάνω πίνακα σχεδιάζονται οι καμπύλες της τάσης, του ρεύματος και της ισχύος σε σχέση με τις στροφές και συγκρίνονται με αυτές της προσομοίωσης.



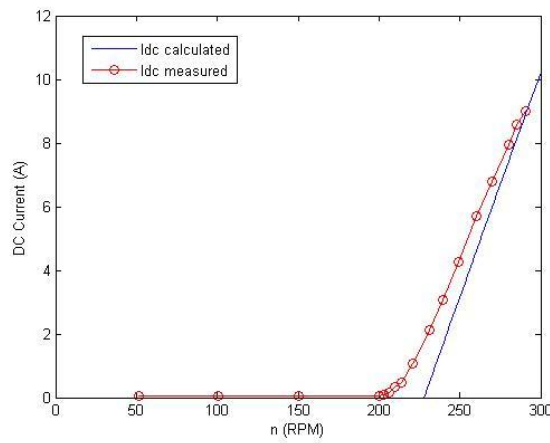
Σχήμα 9.12: Η AC τάση πριν τον ανορθωτή για διάφορες στροφές, όπως μετρήθηκε στο εργαστήριο και όπως υπολογίστηκε στην προσομοίωση.



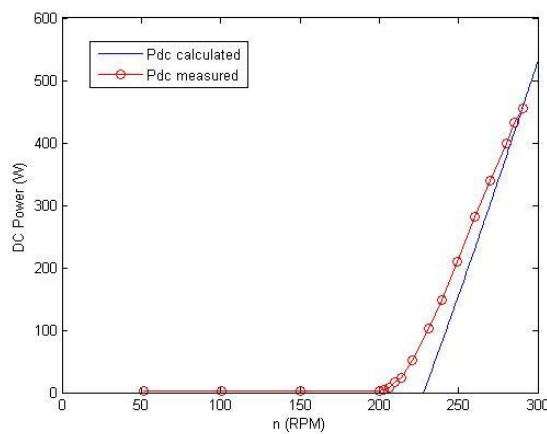
Σχήμα 9.13: Το AC ρεύμα της γεννήτριας όπως μετρήθηκε στο εργαστήριο και όπως υπολογίστηκε στην προσομοίωση.



Σχήμα 9.14: Η σχέση της DC τάσης στους συσσωρευτές με τις στροφές όπως μετρήθηκε στο εργαστήριο και όπως προέκυψε στην προσομοίωση.

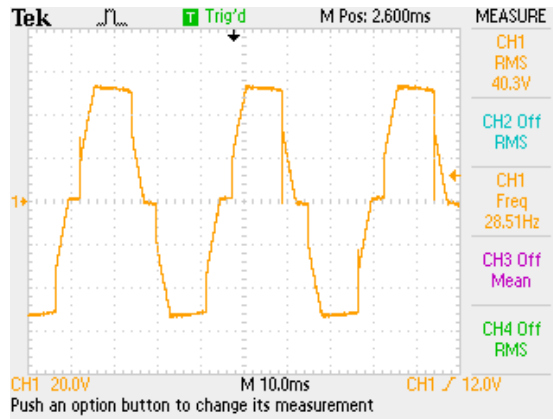


Σχήμα 9.15: Η σχέση του DC ρεύματος με τις στροφές όπως μετρήθηκε στο εργαστήριο και όπως προέκυψε στην προσομοίωση.

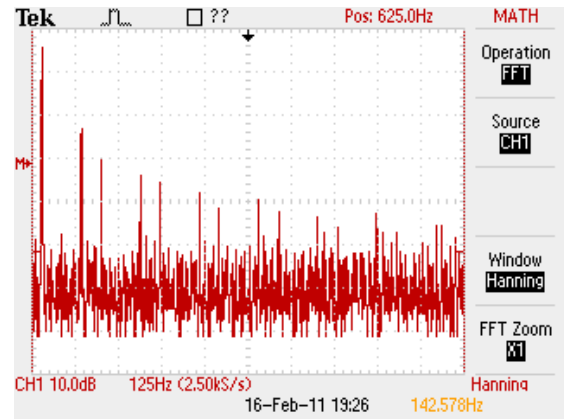


Σχήμα 9.16: Η σχέση τις DC ισχύος που εισέρχεται στους συσσωρευτές με τις στροφές όπως μετρήθηκε στο εργαστήριο και όπως προέκυψε στην προσομοίωση.

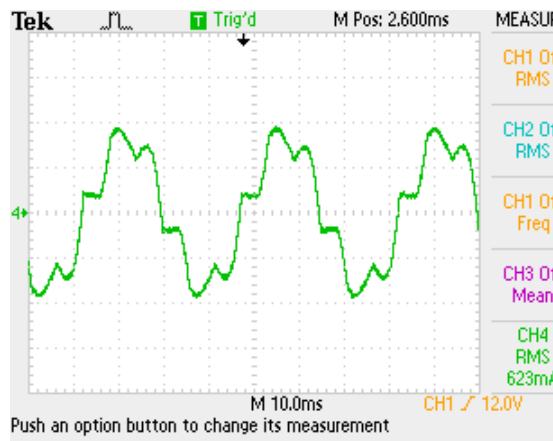
Στη συνέχεια παρατίθενται κάποια στιγμιότυπα από τη λειτουργία της γεννήτριας σε απευθείας σύνδεση με συσσωρευτές για τις 285 RPM και τις 214 RPM.



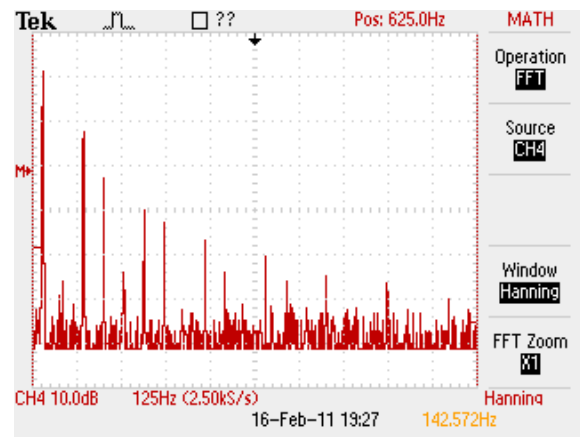
(α)



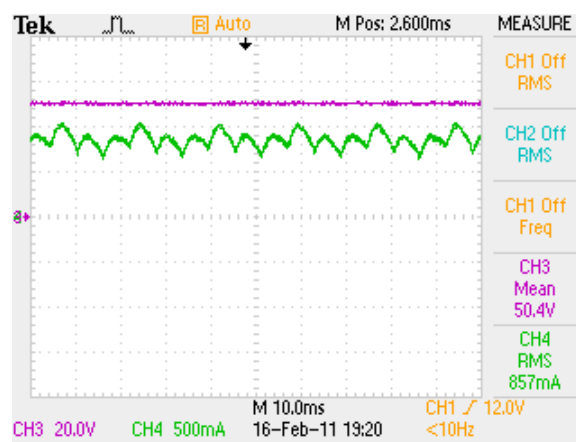
(β)



(γ)



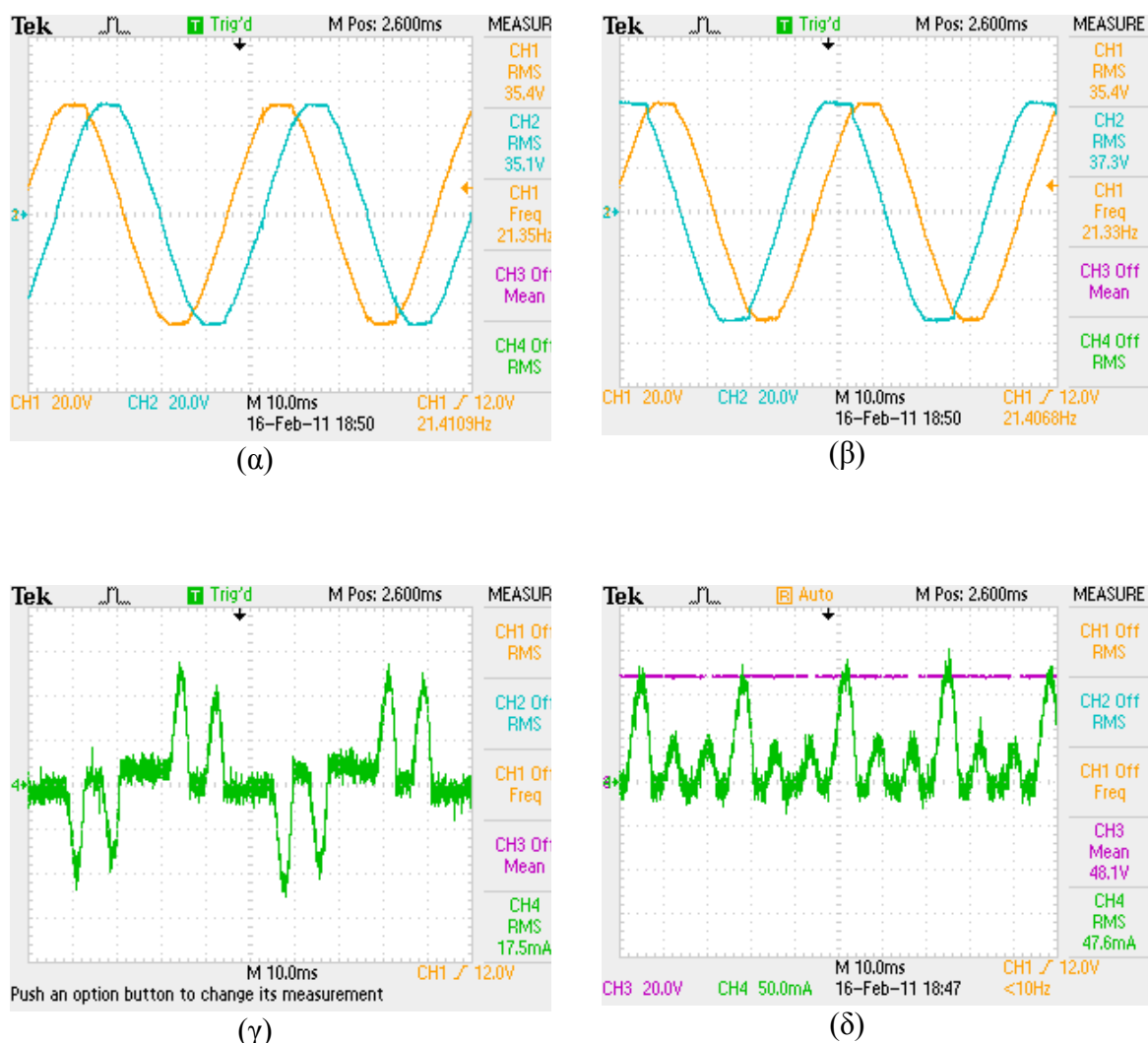
(δ)



(ε)

Σχήμα 9.17: Απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές 285 RPM: (α) Η τάση V_{tab} στα άκρα της γεννήτριας και (β) οι αρμονικές της (γ) το ρεύμα της γεννήτριας και (δ) οι αρμονικές του και τέλος (ε) η DC τάση και το DC ρεύμα του συστήματος.

Τη στιγμή που το σύστημα αρχίζει να δίνει ενέργεια στους συσσωρευτές (214 RPM) τα παραπάνω μεγέθη έχουν ως εξής:



Σχήμα 9.18: Απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές, 214 RPM: (α) Οι τάσεις V_{tab} και V_{tac} στα άκρα της γεννήτριας και (β) οι τάσεις V_{tba} και V_{tbc} (γ) το ρεύμα της γεννήτριας και (δ) η DC τάση και το DC ρεύμα του συστήματος.

Πρέπει να αναφέρουμε στο σημείο αυτό ότι όλες οι φάσεις της γεννήτριας δεν αρχίζουν να παρέχουν ισχύ την ίδια στιγμή λόγω της ασυμμετρίας του τυλίγματος. Έτσι, οι στροφές στις οποίες η γεννήτρια ξεκινά να δίνει ενέργεια στους συσσωρευτές δεν είναι συγκεκριμένες αλλά κυμαίνονται από 210-220 RPM. Το σημείο αυτό εξαρτάται πολύ και από την τάση των διόδων. Το σύστημα αναμένουμε να αρχίζει να άγει όταν η τάση στην είσοδο του ανορθωτή γίνει ίση με 48 V αλλά θα άγει πλήρως όταν ξεπεράσει και την τάση των 6 διόδων φτάνοντας στα 52 V περίπου.

Σημειώνουμε τέλος ότι έντονος θόρυβος που μπορεί να οφείλεται και στο συντονισμό του ρουλεμάν εμφανίστηκε στις 260 RPM.

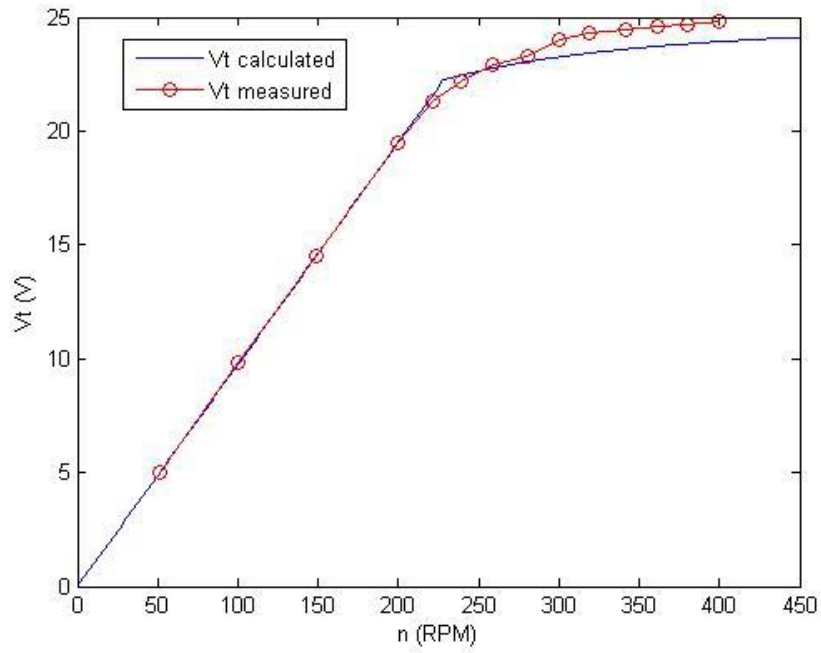
9.6: Μέτρηση της γεννήτριας με σύνδεση αυτεπαγωγής

Στη συνέχεια σε κάθε φάση της γεννήτριας συνδέεται μια αυτεπαγωγή 12.3 mH προκειμένου να βελτιωθεί η ενεργειακή απόδοση του συστήματος. Επιπλέον, σύμφωνα με το [17], αναμένουμε και βελτίωση της κυματομορφής του ρεύματος. Ακολουθείται η ίδια διαδικασία που ακολουθήθηκε για την απευθείας σύνδεση με συσσωρευτές και όλες οι μετρήσεις θα λαμβάνονται και πάλι με τον παλμογράφο. Η μέτρηση για τις στροφές (μέσω της συχνότητας) γίνεται με ψηφιακό πολύμετρο όταν η ανάγνωση από τον παλμογράφο δεν είναι εφικτή. Οι μετρήσεις φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

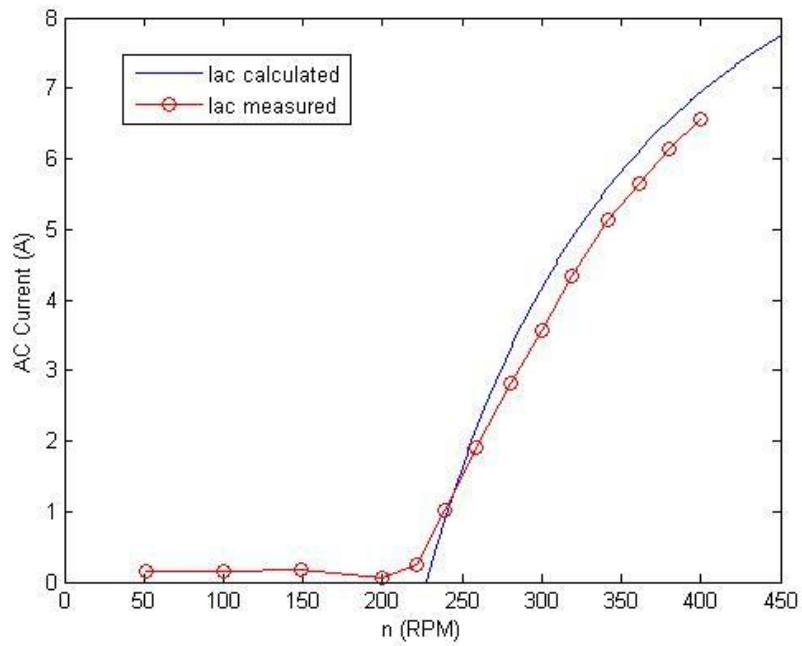
n (RPM)	V _{tab} (V)	V _{tac} (V)	V _{tbc} (V)	V _{tavg} (V)	I _{ac} (A)	V _{dc} (V)	I _{dc} (V)	P _{dc} (W)
51.0	8.60	8.62	8.84	8.69	0.15	48	0.16	7.68
100.0	16.9	17.0	17.3	17.07	0.16	48	0.17	8.16
149.0	25.0	25.4	25.0	25.13	0.17	48	0.17	8.16
200.0	33.5	33.6	34.3	33.80	0.05	48.1	0.06	2.89
221,6	36.1	36.2	38.6	36.97	0.25	48.1	0.44	21.16
239,5	38.0	37.6	39.5	38.37	1.02	48.2	1.47	70.85
259.0	39.6	39.5	39.9	39.67	1.90	48.6	2.71	131.71
280,5	40.7	39.7	40.5	40.30	2.81	48.8	3.97	193.74
300,5	41.5	41.4	41.9	41.60	3.56	49.3	5.04	248.47
319.0	41.6	42.5	42.1	42.07	4.34	49.6	6.07	301.07
341,6	41.5	43.4	42.2	42.37	5.13	50.0	7.14	357.00
361.0	41.4	42.2	44.2	42.60	5.66	50.3	7.93	398.88
380.0	42.1	43.7	42.5	42.77	6.14	50.4	8.55	430.92
400.0	42.9	42.7	43.2	42.93	6.55	50.5	9.21	465.11

Πίνακας 9.10: Οι τάσεις, τα ρεύματα και οι ισχείς μεταβάλλοντας τις στροφές για σύστημα αυτεπαγωγής-συσσωρευτών.

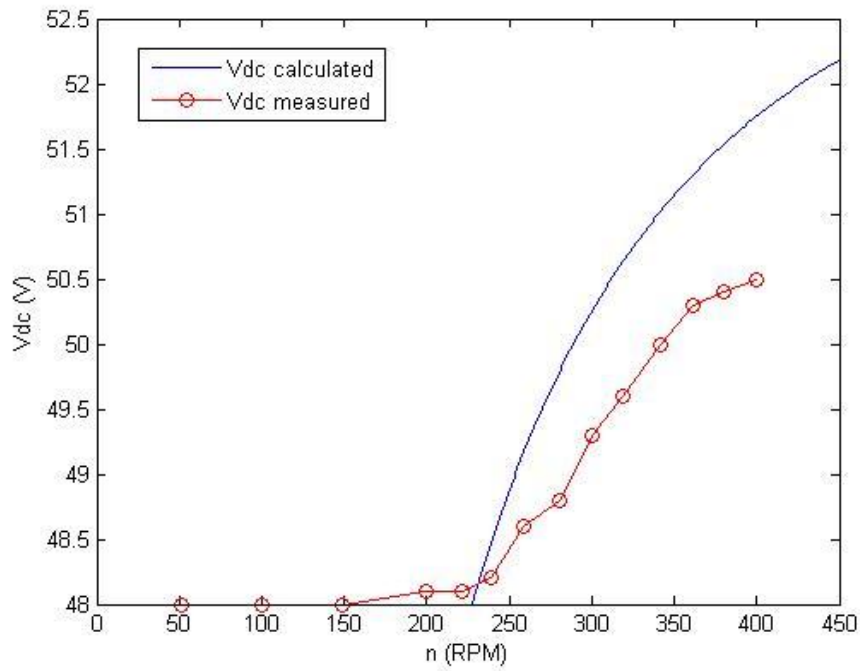
Με βάση τα δεδομένα του παραπάνω πίνακα σχεδιάζονται οι καμπύλες της τάσης, του ρεύματος και της ισχύος σε σχέση με τις στροφές και συγκρίνονται με αυτές της προσομοίωσης.



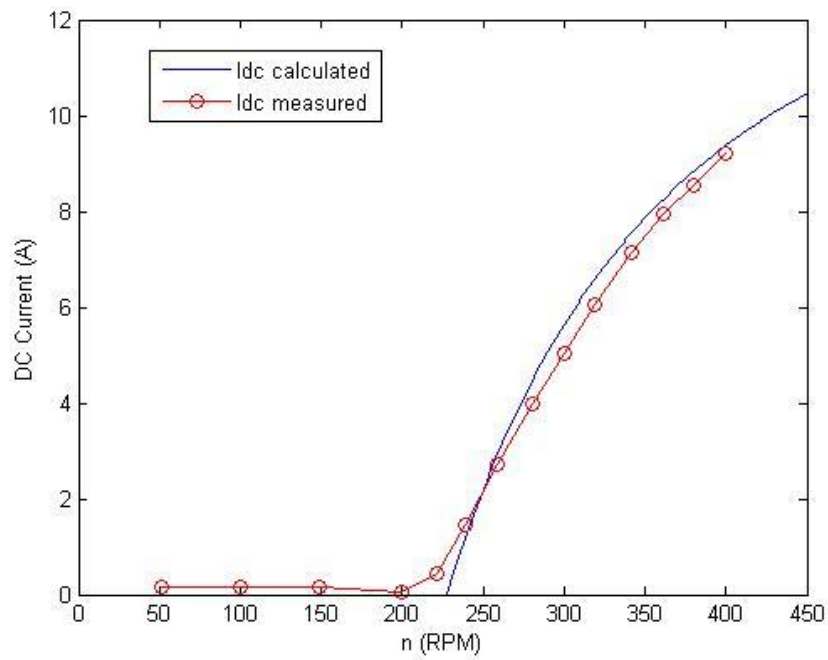
Σχήμα 9.19: Η AC τάση πριν τον ανορθωτή για διάφορες στροφές, όπως μετρήθηκε στο εργαστήριο και όπως υπολογίστηκε στην προσομοίωση.



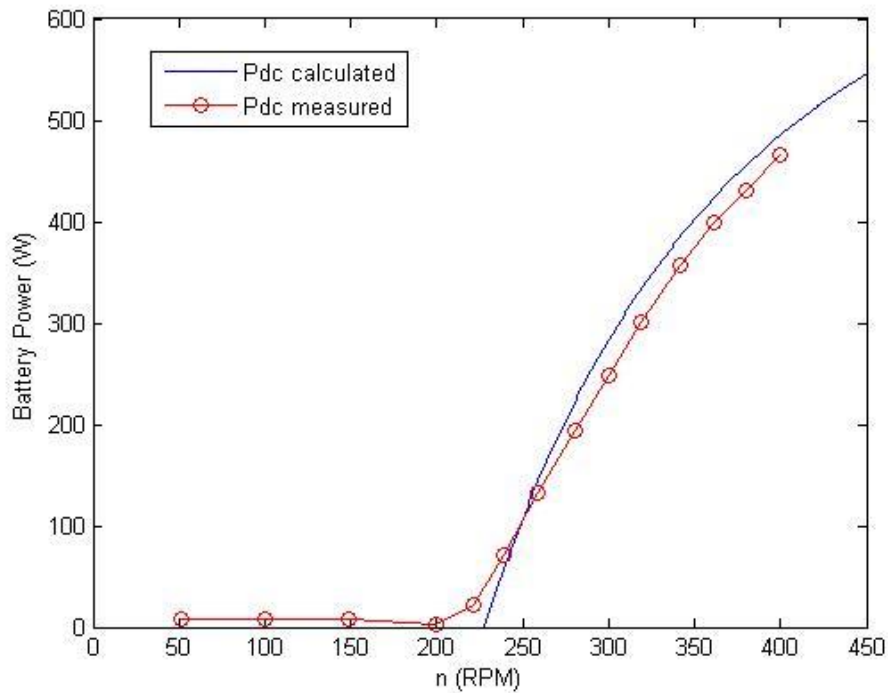
Σχήμα 9.20: Το AC ρεύμα της γεννήτριας όπως μετρήθηκε στο εργαστήριο και όπως υπολογίστηκε στην προσομοίωση.



Σχήμα 9.21: Η σχέση της DC τάσης στους συσσωρευτές με τις στροφές όπως μετρήθηκε στο εργαστήριο και όπως προέκυψε στην προσομοίωση.

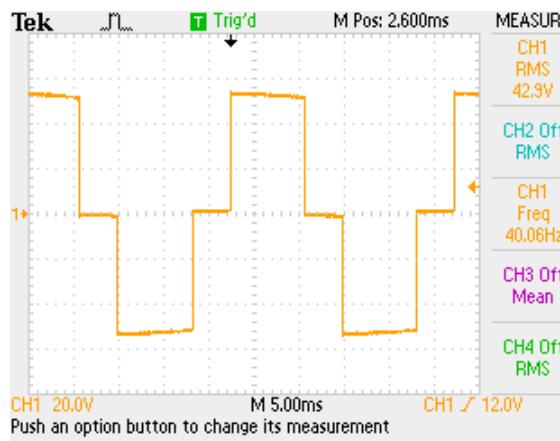


Σχήμα 9.22: Η σχέση του DC ρεύματος με τις στροφές όπως μετρήθηκε στο εργαστήριο και όπως προέκυψε στην προσομοίωση.

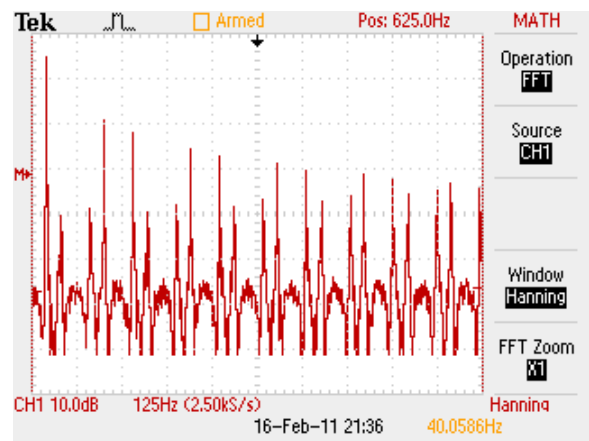


Σχήμα 9.23: Η σχέση της DC ισχύος που εισέρχεται στους συσσωρευτές με τις στροφές όπως μετρήθηκε στο εργαστήριο και όπως προέκυψε στην προσομοίωση.

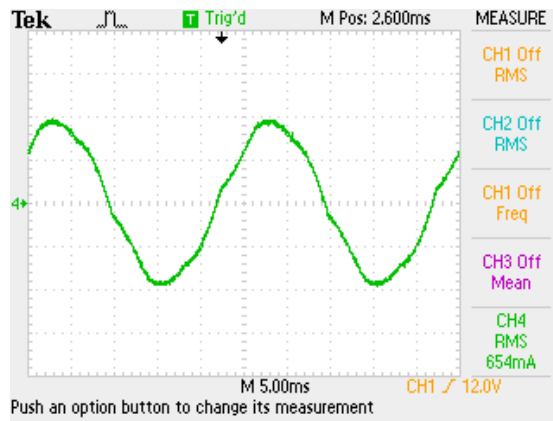
Στη συνέχεια παρατίθενται κάποια στιγμιότυπα από τη λειτουργία της γεννήτριας σε σύνδεση αυτεπαγωγή-συσσωρευτές, για τις 400 RPM και τις 220 RPM.



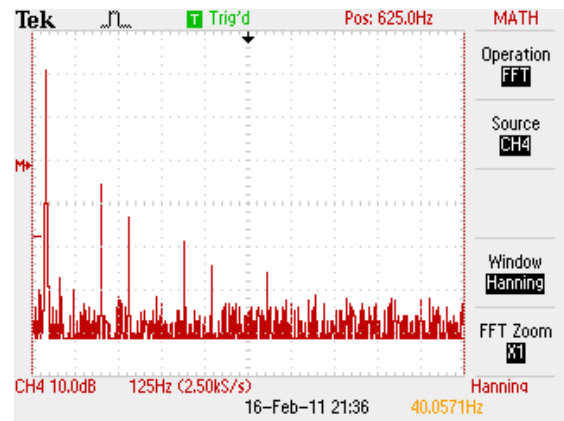
(α)



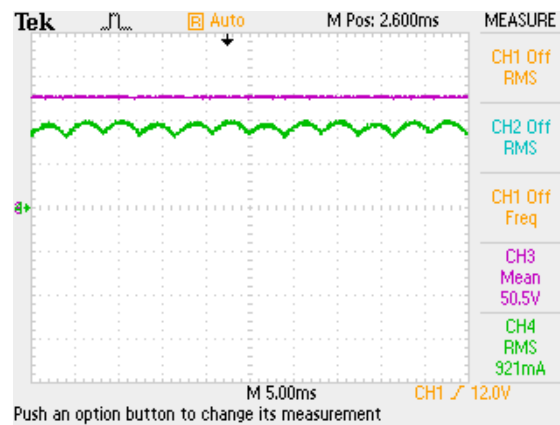
(β)



(γ)

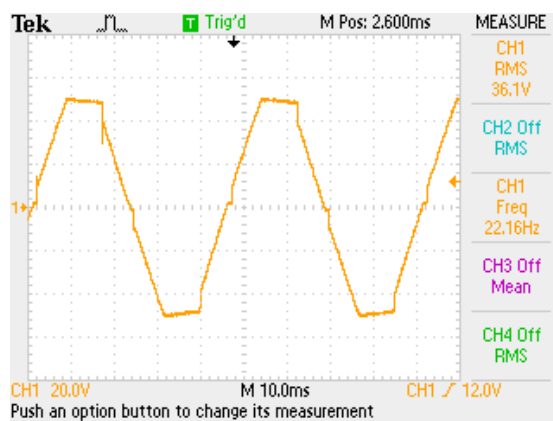


(δ)

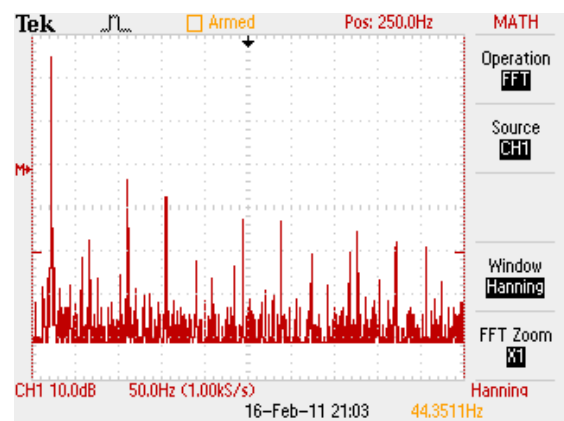


(ε)

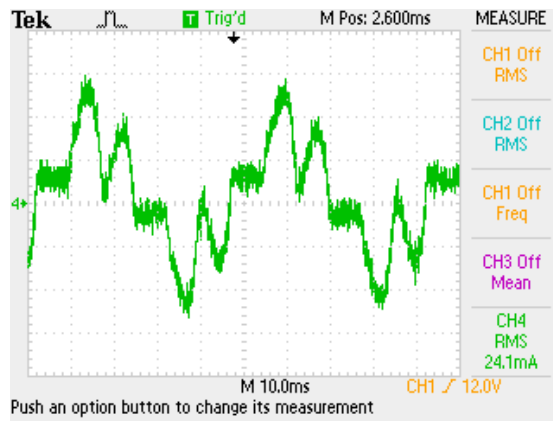
Σχήμα 9.24: Σύνδεση της γεννήτριας σε συσσωρευτές μέσω αυτεπαγωγής στις 400 RPM: (α) Η θερματική τάση της γεννήτριας και (β) οι αρμονικές της (γ) το ρεύμα γραμμής και (δ) οι αρμονικές του και (ε) το DC ρεύμα και η DC τάση του συστήματος.



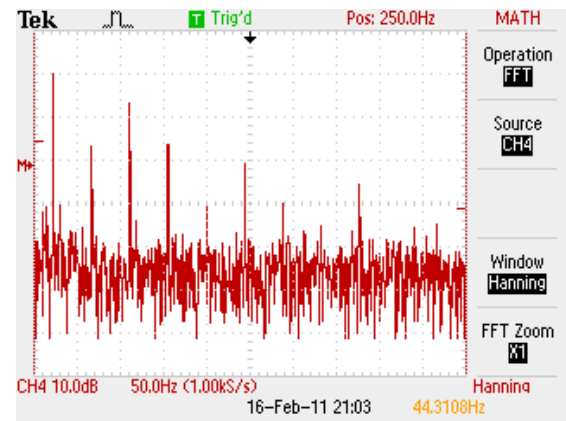
(α)



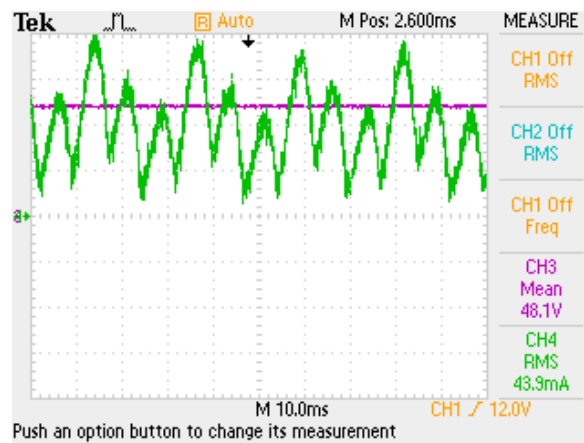
(β)



(γ)



(δ)



(ε)

Σχήμα 9.25: Σύνδεση της γεννήτριας σε συσσωρευτές μέσω αυτεπαγωγής στις 220 RPM: (α) Η τερματική τάση της γεννήτριας και (β) οι αρμονικές της (γ) το ρεύμα γραμμής και (δ) οι αρμονικές του και (ε) το DC ρεύμα και η DC τάση του συστήματος.

Παρατηρούμε από τα παραπάνω σχήματα ότι όσο αυξάνονται οι στροφές τόσο βελτιώνεται η κυματομορφή του ρεύματος κάτι που μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα μειωμένο θόρυβο.

10. Συμπεράσματα και Προτάσεις

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται ένας απολογισμός όσων αναφέρθηκαν σε όλα αυτά τα κεφάλαια προκειμένου να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα αλλά και προτάσεις για τη βελτίωση της εργασίας.

10.1: Συμπεράσματα

Οι γεννήτριες αξονικής ροής μονίμων μαγνητών μπορούν να χρησιμοποιηθούν με επιτυχία σε εφαρμογές ανεμογεννητριών μικρής κλίμακας. Το χαμηλό τους κόστος αλλά και η ευκολία κατασκευής τους τις καθιστά κατάλληλες για εφαρμογές στον αναπτυσσόμενο κόσμο.

10.1.1: Η γεννήτρια 3 kW

Η γεννήτρια αυτή σχεδιάστηκε με βάση τις εξισώσεις του κεφαλαίου 3 και βελτιστοποιήθηκε για να έχει χαμηλό κόστος στο κεφάλαιο 5. Στο ίδιο κεφάλαιο προσομοιώθηκε η λειτουργία της.

Όσον αφορά την κατασκευή αποδείχθηκε δύσκολη με πολλά απρόοπτα. Κύριο ελάττωμα η μεγάλη εξωτερική ακτίνα των δίσκων που είχε ως αποτέλεσμα τη μεταβλητότητα του διακένου. Απρόοπτα εμφανίστηκαν κατά την κατασκευή του τυλίγματος όπου ο συντελεστής πλήρωσης των πηνίων αλλά και το αξονικό τους πάχος απείχαν πολύ από τα ζητούμενα. Όλα τα παραπάνω είχαν ως αποτέλεσμα την κατασκευή μιας γεννήτριας 2700 W τελικά και όχι 3000 W.

Αυτό όμως δε σημαίνει ότι η διαστασιολόγηση ή η προσομοίωση είναι λάθος. Το γεγονός ότι τα λάθη που οδήγησαν σε μειωμένη ισχύ ήταν κατασκευαστικά το υποδεικνύει αυτό. Προκειμένου να επαληθευθεί όμως η προσομοίωση σχεδιάζεται και πάλι στο πρόγραμμα FEMM η ακριβής διάταξη η οποία και προσομοιώνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια αυτή τη φορά. Μπορούμε λοιπόν να συμπεράνουμε ότι το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση είναι αρκετά σωστό. Επιδέχεται όμως βελτιώσεις.

10.1.2. Η γεννήτρια 850 W

Η γεννήτρια αυτή είχε ήδη κατασκευαστεί. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής η γεννήτρια μετρήθηκε και πάλι και τα αποτελέσματα προσέγγισαν ακόμα περισσότερο αυτά της προσομοίωσης, με ένα συνολικό σφάλμα της τάξης του 7.7% όσον αφορά την ισχύ στη σύνδεση τριφασικού ωμικού φορτίου.

Επιπλέον μελετήθηκε η απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές. Η προσομοίωση προέβλεψε με σχετικά καλή ακρίβεια τα πειραματικά αποτελέσματα. Τα μεγαλύτερα σφάλματα στην ανάλυση έχουν να κάνουν με την εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας η οποίας δε μετρήθηκε σωστά καθώς μεταβάλλεται με το βαθμό φόρτισης και είναι δύσκολος ο προσδιορισμός της. Το βασικό συμπέρασμα πάντως είναι ότι με την απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές μειώνεται έντονα η ενεργειακή απόδοση του συστήματος.

Για την επίλυση του προβλήματος αυτού προστέθηκαν εν σειρά αυτεπαγωγές. Η νέα αυτή σύνδεση μετρήθηκε και προσομοιώθηκε και οι αποκλίσεις ήταν και πάλι σχετικά μικρές, κυρίως οφειλόμενες στην αντίσταση της μπαταρίας. Το συμπέρασμα είναι ότι η πρόσθεση αυτεπαγωγής επιτρέπει την περαιτέρω ανάπτυξη τάσης που στην απευθείας σύνδεση περιορίζεται από τους συσσωρευτές. Έτσι η ενεργειακή απόδοση αυξάνεται. Πρέπει όμως πριν επιλεγεί η αυτεπαγωγή να εξετάζονται δύο παράγοντες. Το ρεύμα και ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου πρέπει πάντα να παρακολουθούνται ώστε να διασφαλίζεται η ασφαλής λειτουργία της γεννήτριας. Έτσι, όσον αφορά την εύρεση της βέλτιστης αυτεπαγωγής πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι δύο αυτοί περιορισμοί. Γεγονός είναι πάντως ότι η ενεργειακή απόδοση του συστήματος βελτιώνεται.

10.2: Προτάσεις

Στην παρούσα εργασία ασχολούμαστε με τη διαστασιολόγηση μιας γεννήτριας 3 kW. Για την κατασκευή της χρησιμοποιούνται μαγνήτες νεοδυμίου βαθμού 40 με αποτέλεσμα η κατασκευή να φτάνει στα όρια της και να υπάρχουν προβλήματα στη ρύθμιση του διακένου. Ένας πιο ισχυρός μαγνήτης θα περιόριζε τον όγκο της ακτίνας, με αποτέλεσμα οι δίσκοι του δρομέα να μην είναι στραβοί και το διάκενο να είναι σωστό. Επιπλέον, πέραν του ψηλότερου κόστους, η κατασκευή θα ήταν πιο εύκολη. Είναι λοιπόν επιτακτική η ανάγκη διερεύνησης όλων των βαθμών που μπορεί να έχει ένας μαγνήτης νεοδυμίου.

Επίσης θα πρέπει να διερευνηθούν τα όρια μιας κατασκευής σαν και αυτή, όσον αφορά την ισχύ της γεννήτριας. Έτσι καλό θα ήταν να μελετηθούν μεγαλύτερες ισχύεις, όπως τα 5 kW, λαμβάνοντας υπόψη ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί πιο δυνατός μαγνήτης.

Ο μαγνήτης, όπως είδαμε, αποτελεί το πιο κρίσιμο υλικό της κατασκευής. Βελτιστοποιώντας τις διαστάσεις του μαγνήτη για συγκεκριμένη ισχύ θα προκύψει σίγουρα μια πολύ αποδοτική διάταξη αλλά θα έχει δύο βασικά μειονεκτήματα: α) η παραγγελία και κατασκευή μαγνητών που δεν υπάρχουν στο εμπόριο θα επιβαρύνει πολύ το κόστος και β) οι νέοι αυτοί μαγνήτες είναι πιθανό να μην μπορούν να χρησιμοποιηθούν αλλού. Έτσι, εκμηδενίζεται η πιθανότητα να μειωθεί το κόστος λόγω π.χ. μεγάλης ζήτησης του νέου μαγνήτη, αφού οι εφαρμογές του θα είναι πολύ περιορισμένες. Στόχος λοιπόν είναι η εύρεση ενός νέου, “καθολικού” μαγνήτη ο οποίος θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξίσου αποδοτικά για ένα εύρος ισχύος μέχρι π.χ. και τα 5 kW. Ένας τέτοιος μαγνήτης θα είναι μεν ακριβός, όταν θα κατασκευαστεί για πρώτη φορά, αλλά θα μπορεί να γίνει αρκετά εμπορικός ώστε το κόστος του να πέσει μέσα σε κάποια χρόνια επηρεάζοντας αντίστοιχα και το κόστος των γεννητριών.

Μια άλλη λύση στο πρόβλημα του κόστους που δημιουργούν οι μαγνήτες, και πάνω στην ιδέα της εκμετάλλευσης των εμπορικών μαγνητών, είναι η παρακάτω: Η μελέτη βελτιστοποίησης διαστάσεων μαγνήτη. Στόχος της θα είναι η δημιουργία λογισμικού το οποίο θα δέχεται ως εισόδους τις διαστάσεις και το βαθμό του μαγνήτη που θα χρησιμοποιηθεί, όπως επίσης και την ονομαστική ισχύ της γεννήτριας που είναι επιθυμητό να κατασκευαστεί και θα δίνει ως έξοδο τις διαστάσεις και τις προβλεπόμενες επιδόσεις της. Έτσι ο επίδοξος κατασκευαστής θα πρέπει απλά να

επιλέξει από μια λίστα μαγνητών του εμπορίου και να συγκρίνει τις διατάξεις. Αυτό φυσικά θα μπορούσε να γίνεται επίσης από το ίδιο λογισμικό, ώστε να δέχεται στην είσοδο διάφορους μαγνήτες του εμπορίου καθώς και την επιθυμητή ισχύ και να δίνει στην έξοδο τη βέλτιστη διάταξη.

Όσον αφορά τη βελτιστοποίηση όπως έγινε στην εργασία αυτή θα μπορούσε να βελτιωθεί μεταβάλλοντας ταυτόχρονα εκτός των άλλων και μεγέθη όπως το πάχος του μαγνήτη, το βαθμός του μαγνήτη, τη συχνότητα λειτουργίας και μελετώντας και άλλα κριτήρια όπως η πυκνότητα ισχύος, που μελετάται πολύ συχνά όταν η ισχύς δεν έχει προαποφασιστεί. Η μεταβολή λοιπόν της ονομαστικής ισχύος προκειμένου να βρεθεί η διάταξη με τη μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος ή με το ελάχιστο κόστος προς ισχύ θα είχε μεγάλο πρακτικό ενδιαφέρον και θα έδινε λύση στο ερώτημα της μίας ανεμογεννήτριας των 3 kW έναντι τριών του 1 kW.

Επιπλέον βελτιώσεις στη βελτιστοποίηση έχουν να κάνουν με τους περιορισμούς και τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται. Όσον αφορά τους περιορισμούς, πρέπει να ληφθεί υπόψη οποιοσδήποτε περιορισμός έχει να κάνει με τα χρησιμοποιούμενα στην κατασκευή εργαλεία (όπως π.χ. η ακτίνα επιτραπέζιου δράπανου). Επίσης, όταν χρησιμοποιείται ο ορθογώνιος μαγνήτης υπάρχει ένας ακόμα περιορισμός ως προς τις διαστάσεις. Αυτός είναι ότι οι μαγνήτες μπορούν οριακά να εφάπτονται στην εσωτερική ακτίνα. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι:

$$2\pi R_{in} \geq poles \cdot w_m \rightarrow 2\pi R_{in} \geq poles \cdot \frac{a_i 2\pi R_{avg}}{poles} \rightarrow k_d \geq \frac{a_i}{2 - a_i}$$

Όσον αφορά τα κριτήρια θα μπορούσε να εξεταστεί αυτό της απόδοσης και του κόστους προς απόδοση. Για να γίνει κάτι τέτοιο, πρέπει το λογισμικό της προσομοίωσης να είναι αρκετά γρήγορο και εύχρηστο.

Επιπλέον, ένα ζήτημα που πρέπει να μελετηθεί εκτενώς είναι αυτό του πάχους του σιδήρου. Έτσι, μια αντίστοιχη μηχανολογική μελέτη θα έπρεπε να γίνει για το σίδηρο έτσι ώστε να μειωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο το πάχος του σιδήρου που χρησιμοποιείται προκειμένου να προκύψει μια γεννήτρια πιο ελαφριά αλλά και πιο εύκολη στην κατασκευή.

Τέλος, και όσον αφορά τον τρόπο σύνδεσης των γεννητριών, περισσότερη μελέτη απαιτείται για την κατανόηση της συμπεριφοράς του συστήματος όταν συνδέεται αυτεπαγωγή.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

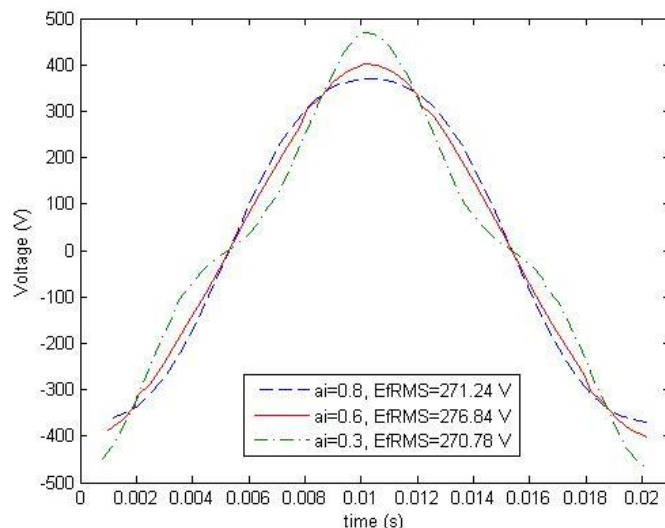
Η επίδραση της γεωμετρίας της γεννήτριας στην κυματομορφή της ΗΕΔ.

Ένα σημαντικό ζήτημα που τίθεται κατά τη σχεδίαση μιας γεννήτριας είναι η κυματομορφή της ΗΕΔ. Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά μπορούν να επηρεάσουν την κυματομορφή προσθέτοντας πολύ συχνά αρκετές αρμονικές. Στο σημείο αυτό θα μελετηθεί η επίδραση του λόγου του πλάτους του μαγνήτη προς το πλάτος του πολικού βήματος στην κυματομορφή της ΗΕΔ και θα μελετηθούν τρόποι βελτίωσής της.

Είναι γνωστό από τη βιβλιογραφία [5] ότι προκειμένου να πετύχουμε ημιτονοειδή ΗΕΔ θα πρέπει ο λόγος πλάτους μαγνήτη προς πλάτος πολικού βήματος a_i να ισούται περίπου με $2/\pi=0.64$. Αλλά πρακτικά πολύ συχνά εμφανίζονται γεννήτριες με μικρότερο a_i [32] χωρίς ιδιαίτερο πρόβλημα στη λειτουργία τους όσον αφορά τις εφαρμογές χαμηλού κόστους. Είναι λοιπόν σημαντικό να ξέρουμε αν τελικά ο λόγος αυτός επιδρά ή όχι στην κυματομορφή αλλά και τις συνέπειες μιας πιθανής παραμόρφωσης της ΗΕΔ.

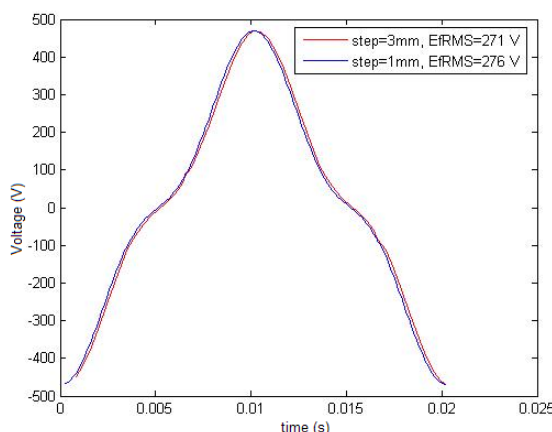
Με τη βοήθεια των προγραμμάτων FEMM και Matlab ο δρομέας της γεννήτριας μετακινείται κατά ένα συγκεκριμένο βήμα και σε κάθε μετακίνηση μετράται η πεπλεγμένη ροή σε κάθε φάση. Έτσι προκύπτουν εύκολα οι κυματομορφές της πεπλεγμένης ροής σε σχέση με το χρόνο, τη θέση και τη γωνία. Στη συνέχεια, και με τη μέθοδο των διαφορών για τον υπολογισμό της παραγώγου, μπορεί να βρεθεί η κυματομορφή της ΗΕΔ και να υπολογιστεί η RMS τιμή της. Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι κατά τη διαστασιολόγηση της γεννήτριας η κυματομορφή της ΗΕΔ θεωρείται ημιτονοειδής ανεξαρτήτως των χαρακτηριστικών της για να διευκολυνθεί η ανάλυση.

Αρχικά το βήμα τίθεται στα 3mm (περιστροφή κατά 0.7°) και το a_i ίσο 0.6 κοντά στο βιβλιογραφικό βέλτιστο. Η ΗΕΔ όπως προκύπτει από την προσομοίωση φαίνεται στο σχήμα Α.1. Στη συνέχεια το a_i τίθεται ίσο με 0.3 και η προσομοίωση επαναλαμβάνεται. Η κυματομορφές συγκρίνονται και εύκολα προκύπτει ότι για $a_i=0.6$ η κυματομορφή είναι πολύ πιο ημιτονοειδής απ'οτι για $a_i=0.3$. Επιπλέον υπολογίζεται και η RMS τιμή της τάσης. Στη δεύτερη περίπτωση η τιμή αυτή είναι χαμηλότερη απ'οτι στην πρώτη ακριβώς επειδή η κυματομορφή δεν είναι ημιτονοειδής όπως αρχικά είχε θεωρηθεί. Το ίδιο ισχύει και για $a_i=0.8$. Σημαντικά σφάλματα λοιπόν μπορεί να προκύψουν ακόμα και όσον αφορά τον υπολογισμό της ΗΕΔ στη γεννήτρια αν δε γνωρίζει κανείς την κυματομορφή της τελευταίας.

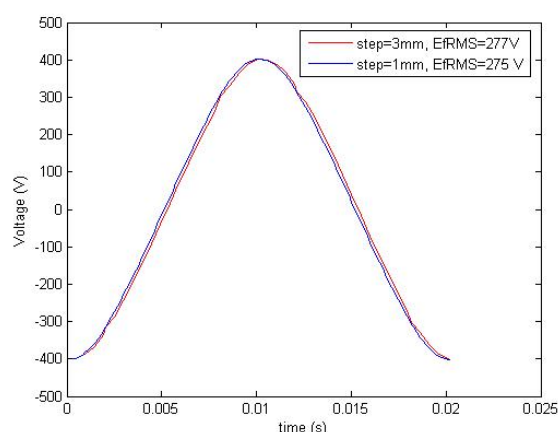


Σχήμα Α.1: Η κυματομορφή της ΗΕΔ για διάφορες τιμές του a_i .

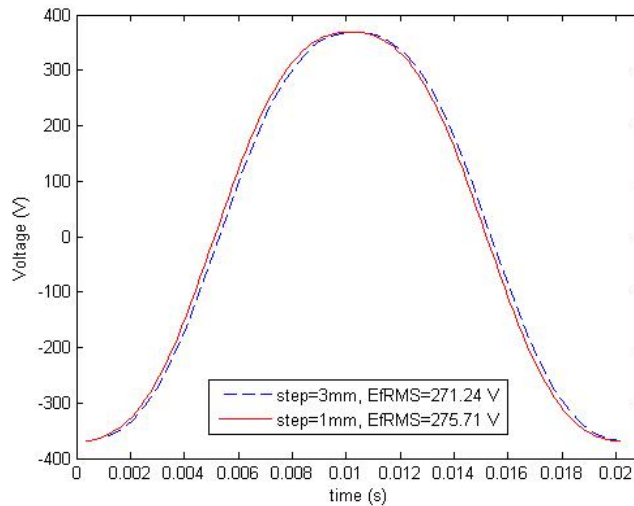
Ένα σημείο που μελετάται είναι επίσης το βήμα μετακίνησης του δρομέα στην προσομοίωση και κατά πόσο αυτό μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα. Έτσι, η προσομοίωση γίνεται και πάλι με βήμα 1 mm (περιστροφή κατά 0.23°) και τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα Α.2. Παρατηρούμε ότι και για τις τρεις τιμές μικραίνοντας το βήμα η κυματομορφή δεν αλλάζει αισθητά, αλλάζει όμως αρκετά η ενεργός τιμή της ΗΕΔ. Μάλιστα, στην πρώτη περίπτωση ($a_i=0.6$), όπου η κυματομορφή είναι σχεδόν ημιτονοειδής οι δύο τιμές έχουν απόκλιση της τάξης του 0.7%, ενώ στη δεύτερη περίπτωση ($a_i=0.3$) η απόκλιση αυξάνεται στο 1.8%. Συγκρίνοντας επιπλέον τις ενεργές τιμές που υπολογίστηκαν για τα διαφορετικά a_i παρατηρούμε ότι για μικρότερο βήμα η ΗΕΔ έχει την ίδια τιμή για κάθε a_i ενώ διαφέρει όταν το βήμα είναι μεγάλο. Η διαφορά της τάξης των 5 V (περίπου 2%) είναι αρκετά μικρή και το βήμα θα μπορούσε να διατηρηθεί στο 1mm προκειμένου ο χρόνος εκτέλεσης της προσομοίωσης να παραμείνει μικρός.



(α)



(β)

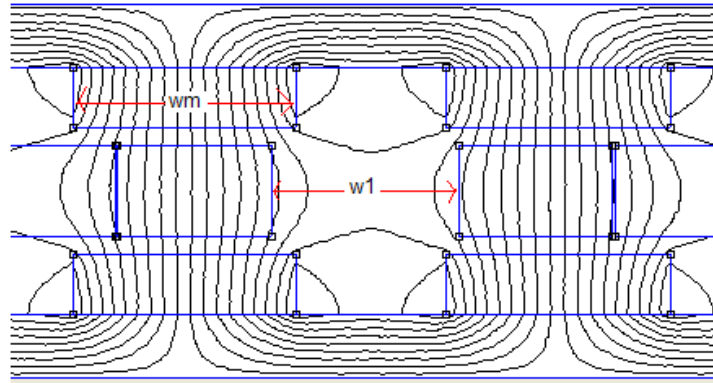


(γ)

Σχήμα Α.2: Η κυματομορφή της ΗΕΔ για δύο διαφορετικά βήματα και για a_i ίσο με (α) 0.3, (β) 0.6 και (γ) 0.8.

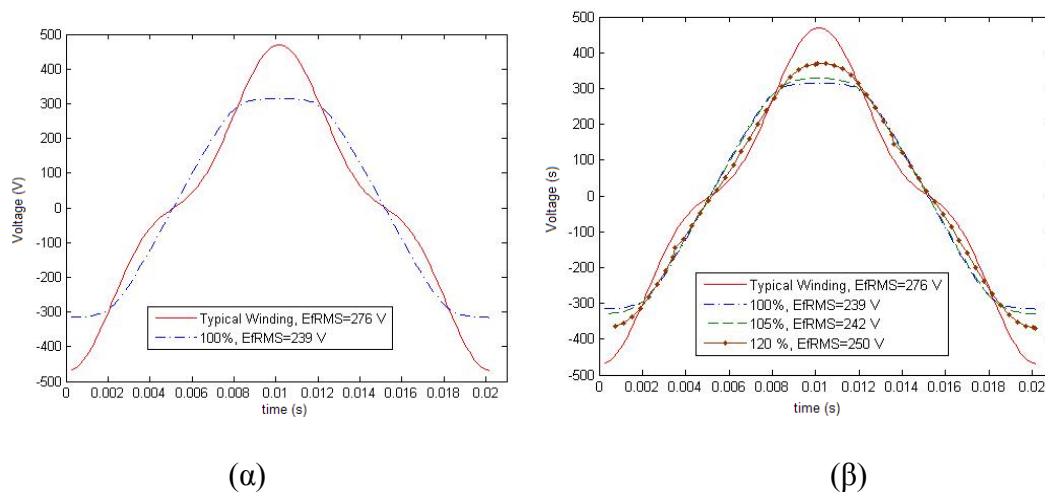
Στο [32] ο σχεδιασμός του πηνίου γίνεται ώστε το εσωτερικό του να ταιριάζει απόλυτα με το σχήμα του μαγνήτη. Κάτι τέτοιο όμως δεν κρίνεται απαραίτητο από τη θεωρητική ανάλυση της γεννήτριας. Θα μπορούσε όμως να είναι ένας τρόπος βελτίωσης της ματομορφής της ΗΕΔ για περιπτώσεις όπου ο λόγος πλάτους μαγνήτη προς πλάτος πολικού βήματος είναι πολύ μικρός. Τέτοιες περιπτώσεις εμφανίζονται συχνά σε εφαρμογές χαμηλού κόστους καθώς με την κατάλληλη σχεδίαση μπορεί να βοηθήσουν στη μείωση του κόστους της γεννήτριας.

Στο σχήμα Α.2(α) φαίνεται η κυματομορφή της ΗΕΔ για $a_i=0.3$ και κλασική διαστασιολόγηση του τυλίγματος. Παρατηρούμε ότι εσωτερική διάσταση του πηνίου είναι αρκετά μεγαλύτερη από τον μαγνήτη. Αποτέλεσμα είναι η μεταβολή της μαγνητικής ροής να είναι πολύ μικρή έως και μηδενική για κάποια χρονικά διαστήματα με άμεση συνέπεια τον μηδενισμό της τάσης και την παραμόρφωση της κυματομορφής της ΗΕΔ. Η ιδέα είναι ότι ταιριάζοντας το σχήμα του πηνίου στο σχήμα του μαγνήτη αυτό δε θα μπορεί πλέον να συμβεί και έτσι η κυματομορφή θα βελτιωθεί. Πιο συγκεκριμένα εξετάζεται η σχέση της διάστασης w_1 του πηνίου με τη διάσταση w_m του μαγνήτη όπως αυτές φαίνονται στο σχήμα Α.3 ως ένα ποσοστό η μία της άλλης. Έτσι με την ένδειξη 100 % εννοούμε ότι οι δύο διαστάσεις είναι ίδιες, ενώ με την ένδειξη 120 % εννοούμε ότι $w_1=1.2*w_m$.



Σχήμα Α.3: Η γεωμετρία της γεννήτριας.

Στο σχήμα Α.4 φαίνεται η μεταβολή της κυματομορφής αλλάζοντας το σχήμα του πηνίου κρατώντας όμως σταθερές όλες τις υπόλοιπες διαστάσεις της γεννήτριας. Αφενός λοιπόν η κυματομορφή μεταβάλλεται, προσεγγίζοντας στο 120 % αρκετά καλά το ημίτονο, αφετέρου η ενεργός τιμή της ΗΕΔ μειώνεται, πράγμα λογικό αφού μειώνεται η επιφάνεια του πηνίου. Διαφορετικά, αν ζητούσαμε να παραμείνει σταθερή η ισχύς θα παρατηρούσαμε αύξηση του της εξωτερικής ακτίνας της γεννήτριας, και άρα του όγκου, του βάρους και του κόστους της, και όλα αυτά προκειμένου να βελτιωθεί η κυματομορφή της ΗΕΔ.



Σχήμα Α.4: (α) Η μεταβολή της κυματομορφής της ΗΕΔ για μικρό a_i καθώς το τύλιγμα αλλάζει ώστε να ταιριάζει ακριβώς στο σχήμα του μαγνήτη και (β) σύγκριση των κυματομορφών για διάφορες αλλαγές στο τύλιγμα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Προγράμματα σε Matlab

B.1 Διαστασιολόγηση της γεννήτριας με χρήση ορθογώνιων μαγνητών

```
Phl=3000; % Η ονομαστική ισχύς της γεννήτριας
fnom=50;
efficiency=0.9;
Pair=Phl/efficiency;
cp=0.35;
lamda=7;
airdens=1.2;
Vwcutin=3;
Vwnom=10;
EfcutinWB=200; % Το κάτω όριο του εύρους του αντιστροφέα

% EfnomWB=500; % Το πάνω όριο του εύρους του αντιστροφέα (για έλεγχο)
Efcutin=EfcutinWB/(sqrt(3)*1.35); % Η ΗΕΔ που πρέπει να αναπτύξει η γεννήτρια για
να μπει στο σύστημα
% Efnom=EfnomWB/(sqrt(3)*1.35); % Η ΗΕΔ της γεννήτριας στα ονομαστικά αν τα
όρια λειτουργίας δίνονται από τον αντιστροφέα (δε χρησιμοποιείται)

Rturb=sqrt(2*Pair/(airdens*cp*pi*Vwnom^3));
ncutin=60*Vwcutin*lamda/(2*pi*Rturb);

% nnom=Efnom/Efcutin*ncutin; % Οι ονομαστικές στροφές όταν τα όρια τάσης
επιβάλλονται από τον σντιστροφέα.

nnom=lamda*Vwnom*60/(2*pi*Rturb); % Οι ονομαστικές στροφές
Efnom=Efcutin*(nnom/ncutin); % Η ονομαστική ΗΕΔ
poles=120*fnom/nnom; % Υπολογισμός του αριθμού πόλων και πηνίων
if mod(poles,4)>=2
    poles=(floor(poles/4)+1)*4;
else
    poles=floor(poles/4)*4;
end
Q=0.5*3*poles/2;
q=Q/3; % Τα πηνία ανά φάση
Phlmax=1.1*Phl; % Η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς υπολογίζεται 10% μεγαλύτερη από
την ονομαστική
PHMmax=Phlmax/efficiency;
Td=60*PHMmax/(2*pi*nnom); % Η μέγιστη ροπή με βάση την προηγούμενη ισχύ

% Μαγνητες
Br=1.26; % Τα χαρακτηριστικά του μαγνήτη που θα χρησιμοποιηθεί
Hc=915;
Hd=Hc/2;
BHmax=314;
```

Bmg=0.62; % Το πεδίο λίγο πάνω από την επιφάνεια του μαγνήτη πρέπει να είναι λίγο μικρότερο από το σημείο βέλτιστης λειτουργίας (Br/2).
 Bmax=0.6; % Το B στη μέση της μηχανής και στη μέση του μαγνήτη

ai=0.659; % Το πλάτος μαγνήτη προς πλάτος πολικού βήματος. Bavg=ai*Bmax;
 mrrec=Br/(4*pi*10^(-7)*Hc*1000);
 hm=10; % Το αξονικό πάχος του μαγνήτη
 g=3; % Το φυσικό διάκενο (αέρας)

% Εύρεση του πάχους στάτη μέσω του μαγνητικού κυκλώματος για διάφορα πάχη μαγνητών

if hm==10

tw=(2/Bmax)*[(Br*hm/mrrec)-Bmg*(g+hm/mrrec)]+0.5;

end

if hm==12

tw=(2/Bmax)*[(Br*hm/mrrec)-Bmg*(g+hm/mrrec)]+0.25;

end

% Πηνια (για την ανάλυση βλέπε Kamper κλπ)

kD=1;

kd=0.869; % Ο λόγος εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα

thitam=pi*poles/Q;

thitare=kd/(1+kd)*thitam;

kp=2*sin((thitam-thitare)/2)*sin(thitare/2)/thitare;

kwc=kp*kD*sqrt(thitare*q/poles);

deltac=(2/poles)*(1+kd)/(1-kd)*(thitam-0.6*thitare);

kec=(2+deltac)^(-0.5);

kr=sqrt(((1+kd)^3)*(1-kd));

% Υπολογισμός της πρώτης αρμονικής της πυκνότητας μαγνητικής ροής στη μέση της γεννήτριας (να μελετηθεί ιδιαίτερα η μεταβολή με το kd)

if (hm==10) & (fnom==40)

Bp=-0.00473+1.21747*ai-0.13874*ai^2-0.47273*ai^3+0.11932*ai^4;

end

if (hm==10) & (fnom==50)

Bp=0.01692+1.11841*ai-0.03027*ai^2-0.58283*ai^3+0.17424*ai^4;

end

if (hm==12) & (fnom==40)

Bp=0.00385+1.2171*ai-0.2727*ai^2-0.34492*ai^3+0.09084*ai^4;

end

if (hm==12) & (fnom==50)

Bp=0.00821+1.17685*ai-0.24073*ai^2-0.3777*ai^3+0.11024*ai^4;

end

Jmax=6; % Η μέγιστη πυκνότητα ρεύματος στο τύλιγμα

kf=0.55; % Ο συντελεστής πλήρωσης των πηνίων

Temp=(1-kd)+(thitam+0.6*thitare)*(1+kd)/poles;

Temp2=sqrt(4.5*q*(kd+1)*sin(thitare/poles)*Temp);


```

Rout=(((Td/1000)/(kwc*kec*kr*Jmax*tw*kf*Bp*Temp2))^(1/3))*1000; %
Υπολογισμός εξωτερικής και εσωτερικής ακτίνας της γεννήτριας.
Rin=kd*Rout;
tmpangle=(2*pi/poles)*ai;
Ia=Rout*cos(tmpangle/2)-Rin; % Το ενεργό μήκος της γεννήτριας
Ravg=(Rout+Rin)/2; % Η μέση ακτίνα στην οποία γίνεται κυρίως η ανάλυση
Iec=2*(Rout+Rin)*(thitam-0.6*thitare)/poles; % Τα άκρα τυλίγματος
Iavg=2*Ia+Iec; % Το μέσο μήκος των πηνίων

```

```

% Υπολογισμός του αριθμού των σπειρών από την εξίσωση για την ΗΕΔ
kw=0.95; % Συντελεστής τυλίγματος δεδομένος για το τύλιγμα αυτό
we=2*pi*ncutin*poles/120; % Η ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα
Nc=Efcutin*poles/(2*sqrt(2)*we*Bp*q*kw*(Ravg/1000)*(Ia/1000));
Nc=ceil(Nc); % Ο αριθμός των σπειρών μετά από στρογγυλοποίηση προς τα πάνω
Nphase=Nc*q; % Οι σπείρες ανά φάση

```

```

%Για πάχος πηνίου
Ia=Phl/(3*Efnom*efficiency); % ονομαστικό ρεύμα
Iamax=1.1*Phl/(3*Efnom*efficiency); % μέγιστο ρεύμα
% wc=Nc*Iamax/(Jmax*kf*tw); % Η σχέση αυτή εφαρμόζεται μια φορά για να
βρεθεί το εμβαδόν διατομής του χαλκού που θα χρησιμοποιηθεί. Επιλέγεται η
κοντινότερη διατομή και επαναλαμβάνουμε αντίστροφα.
% sc=kf*q*tw*wc/Nphase; % Εμβαδόν διατομής
% dc=sqrt(4*sc/pi); % Διάμετρος καλωδίου

```

```

dc=0.95; % Η κοντινότερη διάμετρος χαλκού
sc=dc^2*pi/4;
wc=sc*Nphase/(kf*q*tw); % Το πάχος πλευράς πηνίου
Jmax=Nc*Iamax/(wc*kf*tw); % Εξετάζουμε αν είμαστε κοντά στην αρχική εκτίμηση
για τη μέγιστη πυκνότητα ρεύματος

```

```

% Εύρεση της αντίστασης ενός πηνίου
p20=1.68*10^(-8);
tc=80;
pt=p20*(1+0.0039*(tc-20));
Rc=pt*Nc*Iavg*10^(-3)/(sc*10^(-6));

```

```

% Εύρεση πλάτους του ορθογώνιου μαγνήτη (για το FEMM)
wm=ai*2*pi*Ravg/poles;
wmout=wm;
wmin=wm;

```

```

% wmout=ai*2*pi*Rout/poles; % Οι διατάσεις για τραπεζοειδή μαγνήτη
% wmin=ai*2*pi*Rin/poles;

```

```

%Πραγματικό πλάτος μαγνητη (για παραγγελία)
magangle1=2*pi/poles;
anglereal=wm/Ravg;
wmreal=2*Ravg*sin(anglereal/2);

```

```

% Απόσταση μεταξύ μαγνητών
w3=(2*pi*Ravg-2*poles*wm)/poles;
w3out=(2*pi*Rout-2*poles*wmout)/poles;
w3in=(2*pi*Rin-2*poles*wmin)/poles;

% Διαστάσεις πηνίων (για το FEMM)
w2=0.5; % Απόσταση μεταξύ δύο πηνίων (σχεδόν εφάπτονται)
w1=(2*pi*Ravg-2*Q*wc-Q*w2)/Q; % Η τρύπα του πηνίου
w1out=(2*pi*Rout-2*Q*wc-Q*w2)/Q;
w1in=(2*pi*Rin-2*Q*wc-Q*w2)/Q;

% Κατασκευαστικές διαστάσεις πηνίου
coilanglein=2*pi*w1in/(Q*(w1in+2*wc+w2));
w1inr=2*Rin*sin(coilanglein/2);
coilangleout=2*pi*w1out/(Q*(w1out+2*wc+w2));
w1outr=2*Rout*sin(coilangleout/2);

% Επεξεργασία των διαστάσεων ώστε να γίνονται δεκτές από το FEMM
wc=floor(wc*100)/100;
wm=floor(wm*100)/100;
wmout=floor(wmout*100)/100;
wmin=floor(wmin*100)/100;
w3=floor(w3*100)/100;
w3out=floor(w3out*100)/100;
w3in=floor(w3in*100)/100;
w1=floor(w1*100)/100;
w1out=floor(w1out*100)/100;
w1in=floor(w1in*100)/100;
tw=floor(tw*100)/100;
la=floor(la*100)/100;

% Υπολογισμός της αυτεπαγωγής του τυλίγματος
Kn=(1+0.9*lavg/(2*pi*tw)+0.32*2*pi*wc/lavg+0.84*wc/tw)^(-1);
Ls=[q*((lavg/1000)^2)*(Nc^2)*(10^(-7))]/(tw/1000)]*Kn;

tp=2*pi*Ravg/poles; % Το πολικό βήμα

% Όγκος, βάρος και κόστος μαγνητών
pmag=7.5; % g/cm3 % Πυκνότητα μαγνητικού υλικού (NdFeB N40)
% Smag=pi*((Rout^2)-(Rin^2))*ai/poles; % Επιφάνεια μαγνήτη
Smag=wm*la;
% Vmag=pi*((Rout^2)-(Rin^2))*hm*ai/poles; % Όγκος μαγνήτη σε mm3
% Vmag=magangledegrees*pi*(Rout^2-Rin^2)*hm/360;
Vmag=wm*la*hm;
Mmag=pmag*Vmag*10^(-3); % Βάρος μαγνήτη σε g
Magcost=(3.3+1.8*10^(-4)*Vmag)*2*poles+shippingcost; % Το κόστος των
εμπορικών μαγνητών
% Magcost=5.3*2*poles; % Η τελική τιμή τους

```

%Κόστος Χαλκού

pcu=8.94; % Η πυκνότητα του χαλκού

mcu=3*Nphase*lanv*sc*pcu*(10⁻⁶); % Η μάζα του χαλκού σε kg

copperprice=10; % Η τιμή του χαλκού ανα Kg

coppercost=1.23*copperprice*mcu;

%Κόστος Σιδήρου

ironprice=1; % E/kg

pFe=7.87; % g/cm³

hr=2+3.62319*10⁻⁴*Smag*poles;

%IronVolume=2*hr*pi*(Rout²-Rin²)*10⁻³; % cm³

roph=Rout*(10⁻³)*0.5*(0.62²)*Smag*10⁻⁶*poles/(4*pi*10⁻⁷); % Η ροπή που καταπονεί του δίσκους

DiscV=3.13036*10⁻⁴+1.18768*10⁻⁶*roph; % Ο όγκος των δίσκων από βιβλιογραφική μελέτη.

hr=DiscV*10⁹/(pi*(Rout²)); % Το πάχος των δίσκων σε mm

%hr=10; % Επιλογή του πάχους για ασφάλεια

IronVolume=2*hr*pi*(Rout²)*10⁻³; % Όγκος σιδήρου

IronMass=IronVolume*pFe*10⁻³; % Μάζα σιδήρου

ironcost=1.23*ironprice*IronMass; % Κόστος σιδήρου

%Κόστος Ρυτίνης

resinprice=13; % E/kg

ResinVolume=pi*(Rout²-Rin²)*tw*10⁻³; % cm³

presin=1.36; % g/cm³

resinmass=presin*ResinVolume*10⁻³; % kg

resincost=1.23*resinmass*resinprice;

% Κόστος ξύλου προσεγγιστικά

woodS=(2*(Rout*10⁻³+0.1))²;

woodcost=3*woodS*16+6*woodS*21;

% Μάζα του άξονα για υπολογισμό απωλειών περιστροφής

AxisMass=pi*7.5²*2*pFe;

%Ολικό κόστος και επιμέρους κόστη και μάζες για συγκρίσεις

totalcost=Magcost+coppercost+ironcost+resincost+woodcost;

totalmass=resinmass+IronMass+mcu+Mmag/1000;

othermass=resinmass+mcu+Mmag/1000;

othercosts=coppercost+ironcost+resincost+woodcost;

Το πρόγραμμα αυτό υλοποιεί τη θεωρία των κεφαλαίων 2 και 3. Δεδομένων των ai και kd βρίσκει τις ακριβείς διαστάσεις της γνήτριας σε μέση, εσωτερική και εξωτερική ακτίνα. Επιπλέον βρίσκει το συνολικό κόστος και το βάρος.

B.2 Μετακίνηση του δρομέα σε περιβάλλον Matlab-FEMM

```
addpath('c:\progra~1\femm42\mfiles');
klm=1; %1 αν τα πηνία εφάπτονται, 2 αν όχι
msize=1; % Η διάσταση του στοιχείου για το FEMM
basicstep=3; % Το βήμα της μετακίνησης σε mm
starting2; % Θέτει τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος και ορίζει σε ποια ακτίνα
θα γίνει η ανάλυση
drawmagnets % Σχεδιάζει τους μαγνήτες
rotor % Σχεδιάζει όλο το δρομέα
drawphase % Σχεδιάζει το τύλιγμα
d=0;
step=basicstep;
setmagnets % Σετάρονται οι μαγνήτες για να διευκολυνθεί η μετακίνηση και ύστερα
προστίθενται τα υλικά στη βιβλιοθήκη
addmaterialstolib
addboundproptolib
addcircuitsinlib
setcircuits % Σετάρονται τα πηνία
addair % αέρας εκεί που πρέπει
sumsquareA=0; % Αρχικοποίηση για την εύρεση της ΗΕΔ, της αποθήκευσης των
αποστάσεων και των ρευμάτων του στάτη
sumsquareB=0;
sumsquareC=0;
dis=0;
i=0;
dist=0;
Irms=0:1:9;
distancem(1)=0;
mi_saveas('firstattempt.fem');
for j=1:1 % Μετρητής για τις περιόδους
    for hp=1:2 % Μετρητής για τις ημιπεριόδους
        dis=0;
        for i=1:floor((w3/2)/step) %Μετακινω τον μαγνητη ακεραια βηματα
            δεξια
                selectrotor;
                mi_movetranslate(step,0);
                reconstruct;
                d=d+1;
                flnkg;
                mi_selectgroup(50);
                mi_deleteselected;
                dis=dis+step;
                dist=dist+step;
                distancem(d)=dist;
            end
            ypol=w3/2-dis; %Τον κολλαω στο δεξι συνορο
            selectrotor;
            mi_movetranslate(ypol,0);
            step=ypol;
```

```

reconstruct
d=d+1;
dis=dis+step;
dist=dist+step;
distancem(d)=dist;
flnkg;
mi_selectgroup(50);
mi_deleteselected
mi_clearselected
selectrotor %Πρωτη μεταφορα
step=basicstep;
mi_movetranslate(step,0);
d=d+1;
dis=dis+step;
dist=dist+step;
distancem(d)=dist;
reconstruct2
b=a/2+3*wm+4*w3+step/3;
mi_selectlabel(3*wm+4*w3,y+g+hm/2);
mi_copytranslate(-b,0,1);
mi_selectlabel(3*wm+4*w3,-g-hm/2);
mi_copytranslate(-b,0,1);
flnkg;
mi_selectgroup(50);
mi_deleteselected;
used=0;
for i=1:(floor(wm/step)-1) %Μεταφορα του υπολοιπου μαγνητη
    selectrotor
    mi_movetranslate(step,0);
    reconstruct3
    d=d+1;
    flnkg;
    mi_selectgroup(50);
    mi_deleteselected;
    used=used+1;
    dis=dis+step;
    dist=dist+step;
    distancem(d)=dist;
end
ypol2=wm-(used+1)*step; %Κολλαω τα αριστερο ακρο του μαγνητη στο δεξι
συνορο
if ypol2~=0
    selectrotor
    mi_movetranslate(ypol2,0);
    d=d+1;
    dis=dis+ypol2;
    step=ypol2;
    dist=dist+step;
    distancem(d)=dist;
    reconstruct3a;

```

```

        mi_selectlabel(4*wm+4*w3,y+g+hm/2);
        mi_selectlabel(4*wm+4*w3,-g-hm/2);
        mi_deleteselected
        flnkg;
        mi_selectgroup(50);
        mi_deleteselected;
    end
    step=basicstep; %Μεταφερω το αριστερο ακρο του μαγνητη
    selectrotor;
    mi_movetranslate(step,0);
    d=d+1;
    dis=dis+step;
    dist=dist+step;
    distancem(d)=dist;
    reconstruct4a;
    flnkg;
    mi_selectgroup(50);
    mi_deleteselected;
    for i=1:[floor((w3/2)/step)-1]
        selectrotor; %Μεταφορα μεχρι την αρχικη θεση
        mi_movetranslate(step,0);
        reconstruct3asub;
        d=d+1;
        flnkg;
        mi_selectgroup(50);
        mi_deleteselected;
        dis=dis+step;
        dist=dist+step;
        distancem(d)=dist;
    end
    selectrotor;
    step=ypol;
    mi_movetranslate(step,0);
    reconstruct3asub
    d=d+1;
    dis=dis+step;
    dist=dist+step;
    distancem(d)=dist;
    flnkg;
    mi_selectgroup(50);
    mi_deleteselected
    mi_clearselected
    step=basicstep;
    i=0;
end
selectmagnets
mi_deleteselected;
resetmagnets2
%Telmean(j)=mean(Tx);
FluxRmsA=sqrt(sumsquareA/d);

```

```

FluxRmsB=sqrt(sumsquareB/d);
FluxRmsC=sqrt(sumsquareC/d);
FluxRms(j)=(FluxRmsA+FluxRmsB+FluxRmsC)/3;

```

```

Varms=q*FluxRmsA*poles/2*2*pi*speed/60;
Vbrms=q*FluxRmsB*poles/2*2*pi*speed/60;
Vcrms=q*FluxRmsC*poles/2*2*pi*speed/60;
Vrms(j)=(Varms+Vbrms+Vcrms)/3;
if j==1
    Ef=Vrms(j)
end
end
end

```

Εξήγηση του κώδικα:

A) Σχεδίαση της διάταξης

Πρώτα ορίζεται το είδος του προβλήματος και στη συνέχεια πρέπει να σχεδιαστεί η γεννήτρια. Αυτό συμβαίνει διαδοχικά σχεδιάζοντας ένα-ένα τα τμήματα που την αποτελούν (μαγνήτες, δρομέας, τύλιγμα κλπ). Στη συνέχεια τα υλικά τοποθετούνται στη βιβλιοθήκη του FEMM και ορίζεται το υλικό κάθε περιοχής του σχεδίου. Κατά τη διάρκεια της σχεδίασης τα διάφορα segments και οι διάφορες περιοχές ομοδοποιούνται για ευκολία αργότερα στην μετακίνηση. Ταυτόχρονα ορίζονται οι συνοριακές συνθήκες όπου είναι απαραίτητες. Αρχικοποιούνται μεταβλητές που αφορούν της πεπλεγμένη ροή που πρέπει να μετρηθεί, καθώς επίσης και διάφοροι μετρητές (απόστασης κλπ). Αφού έχουν γίνει τα παραπάνω (μέχρι να ξεκινήσει το πρώτο for-loop) είναι πλέον δυνατόν να μετακινηθεί ο δρομέας.

B) Μετακίνηση του δρομέα

Η εργασία αυτή χωρίζεται σε συγκεκριμένες φάσεις. Ο δρομέας έχει ομαδοποιηθεί ώστε να μετακινείται εύκολα. Σε πρώτη φάση μετακινείται ο δρομέας δεξιά μέχρι ο πρώτος μαγνήτης να φτάσει στο δεξί σύνορο. Σε δεύτερη φάση ο δρομέας μετακινείται τόσο όσο χρειάζεται για να κολλήσει ο μαγνήτης ακριβώς στο σύνορο (εδώ το βήμα δεν είναι αυτό χρησιμοποιείται συνολικά-basicstep). Στη συνέχεια γίνεται μια μετακίνηση για την πλευρά του μαγνήτη ενώ έπειτα ξεκινάει ένα ακόμα for-loop για τη μετακίνηση του μαγνήτη μέχρι να φτάσει το αριστερό του λακρί κοντά στο δεξί σύνορο. Εκεί σταματάει το loop και ο δρομέας μετακινείται μέχρι το αριστερό άκρο του μαγνήτη να φτάσει στο δεξί σύνορο. Στη συνέχεια το αριστερό άκρο του μαγνήτη μετακινείται μόνο του και έτσι ολόκληρος ο μαγνήτης έχει πλέον μεταφερθεί. Για να ολοκληρωθεί μια ημιοπερίοδος χρειάζεται ένα ακόμα loop που ολοκληρώνει τη μετακίνηση. Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία αυτή ολοκληρώνεται μια περίοδος. Προκειμένου να μετακινηθεί ο δρομέας και για άλλη περίοδο οι ιδιότητες των μαγνητών ορίζονται ξανά για ευκολία στον κώδικα.

Γ) Μετακίνηση και Μετρήσεις

Η μετακίνηση του δρομέα γίνεται ως εξής: Κάθε φορά επιλέγεται ολόκληρος ο δρομέας και μετακινείται κατά το επιλεγμένο βήμα. Το κομμάτι του δρομέα που βρίσκεται πλέον εκτός των συνόρων διαγράφεται και σχεδιάζεται και πάλι από την

άλλη μεριά. Η διαδικασία αυτή θέλει προσοχή και εκεί γίνονται αρκετά λάθη. Μετά από κάθε μετακίνηση η διάταξη πρέπει να είναι κλειστή και οι συνοριακές συνθήκες σωστές. Αφού ολοκληρωθεί η μετακίνηση τριφασικό ρεύμα τοποθετείται στο τύλιγμα, το πεδίο προσομοιώνεται και μετράται η πεπλεγμένη ροή κάθε πηνίου (και άρα κάθε φάσης καθώς μόνο ένα πηνίο ανά φάση προσομοιώνεται στο FEMM). Τέλος βρίσκεται η RMS τιμή της πεπλεγμένης ροής για να υπολογιστεί η ΗΕΔ.

B.3 Προσομοίωση των επιδόσεων της γεννήτριας

```
%Bp=0.6314; % Η πρώτη αρμονική της πυκνότητας μαγνητικής ροής από Fortran
Fluxoc=FluxRms; % Το πρόγραμμα παίρνει αποτέλεσμα από το expfinal6
%Fluxoc=0.1754; % Αλλιώς τα αποτελέσματα από το πείραμα
%Rc=1.82;
IN=10; % Για το ρεύμα
JN=8; % Για τις στροφές
Irms=[0:0.5:4.5]
for i=1:IN
    % Irms(i)=i-1;
    n(1)=0;
    for j=1:JN
        freqN(j)=n(j)*poles/120;
        Ef(j)=q*Fluxoc*(poles/2)*2*pi*n(j)/60;
        % Ef(j)=0.94*n(j);
        delta(i)=asin(Irms(i)*2*pi*freqN(j)*Ls/Ef(j));
        deltadeg(i)=delta(i)*180/pi;
        if Ef(j)*cos(delta(i))>=Irms(i)*q*Rc
            VtN(i,j)=Ef(j)*cos(delta(i))-Irms(i)*q*Rc;
        else
            VtN(i,j)=0; % Απλά για να μην κολλήσει το πρόγραμμα
        end
        PelN(i,j)=3*VtN(i,j)*Irms(i);
        PcopperN(i)=3*Irms(i)^2*q*Rc;
        % PeddyN(j)=2.982*10^(-6)*n(j)^2*poles^2*Bp^2;
        PeddyN(j)=(pi*la*10^(-3))*((dc*10^(-
3))^(4)*(Bp^2)*((2*pi*n(j)*poles/120)^2)*Q*Nc)/(32*pt);
        PHMN(i,j)=PelN(i,j)+PcopperN(i)+PeddyN(j);
        % ProtN(j)=0.045*n(j);
        ProtN(j)=(0.06*2*(IronMass+Mmag*2*poles*10^(-3)+AxisMass*10^(-
3))/60)*n(j);
        PmechmeanN(i,j)=PHMN(i,j)+ProtN(j);
        THMN(i,j)=PHMN(i,j)*60/(2*pi*n(j));
        TmechmeanN(i,j)=PmechmeanN(i,j)*60/(2*pi*n(j));
        Trot(j)=ProtN(j)*60/(2*pi*n(j));
        effHMN(i,j)=PelN(i,j)/PHMN(i,j)*100;
        efftotalN(i,j)=(PelN(i,j)/PmechmeanN(i,j))*100;
        if j~=JN
            n(j+1)=n(j)+50;
        end
    end
end
end
```

Όλα τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας (τάσεις, ρεύματα, ισχύς, ροπή, απόδοση) προσομοιώνονται με τη βοήθεια του ισοδύναμου κυκλώματος. Χρήση του προγράμματος αυτού μετά τη σχεδίαση και την μετακίνηση (expfinal6) μπορεί να δείξει αν η διαστασιολόγηση που έχει γίνει είναι σωστή.

B.4 Ανάλυση της λειτουργίας της γεννήτριας για σύνδεση με σύστημα MPPT.

```
poles=12;
Rcoil=0.195;
q=3;
Li=1.793/1000;
Bp=0.4;
Fluxoc=0.05518;
aird=1.2;
Rturb=1.2;
A=pi*Rturb^2;
Rphase=q*Rcoil;
lopt=7;
cpmax=0.35;
Vwcutin=3;
Vwnominal=10;
Vwcutout=20;
Rcable=0.35; %0.35
wcutin=lopt*Vwcutin/Rturb;
wnominal=lopt*Vwnominal/Rturb;
ncutin=60*wcutin/(2*pi);
nnominal=60*wnominal/(2*pi);

for i=1:nnominal %Αλλάζω τις στροφές
    n(i)=i;
    vw(i)=2*pi*n(i)*Rturb/(60*lopt);
    if vw(i)<Vwcutin
        Ef(i)=q*Fluxoc*poles/2*2*pi*n(i)/60;
        Vdc(i)=sqrt(3)*1.35*Ef(i);
        Vdcms(i)=3.5*Vdc(i);
        Prot(i)=0.045*n(i);
        Peddy(i)=2.982*10^(-6)*n(i)^2*poles^2*Bp^2;
        Pair(i)=Prot(i)+ Peddy(i);
        Pdc(i)=0;
        n1(i)=n(i);
        vw1(i)=vw(i);
    else
        n2(i)=n(i);
        vw2(i)=vw(i);
        wm(i)=2*pi*n(i)/60;
        we(i)=poles/2*wm(i);
        freq(i)=we(i)/(2*pi);
        Pmech(i)=0.5*aird*cpmax*pi*Rturb^2*vw(i)^3;
        Prot(i)=0.045*n(i);
        Peddy(i)=2.982*10^(-6)*n(i)^2*poles^2*Bp^2;
        Tmech(i)=Pmech(i)/wm(i);
        Trot(i)=Prot(i)/wm(i);
        Tel(i)=Tmech(i)-Trot(i);
        Irms(i)=Tel(i)*0.33-0.076;
        Idc(i)=sqrt(3/2)*Irms(i);
    end
end
```

```

Ef(i)=q*Fluxoc*poles/2*2*pi*n(i)/60;
delta(i)=asin(Irms(i)*we(i)*Li/Ef(i));
deltadeg(i)=360*delta(i)/(2*pi);
if Ef(i)*cos(delta(i))>=Irms(i)*Rphase
    Vt(i)=Ef(i)*cos(delta(i))-Irms(i)*Rphase;
    Vdc(i)=sqrt(3)*1.35*Vt(i);
else
    Vt(i)=0;
    Vdc(i)=0;
end
Vdcms(i)=3.5*Vdc(i);
Pelectric(i)=3*Vt(i)*Irms(i);
Pdc(i)=Vdc(i)*Idc(i);
Pcopper(i)=3*Irms(i)^2*(Rphase+Rcable);
efficiency(i)=Pdc(i)/Pmech(i);
end
end

```

Η ανάλυση του συστήματος για σύνδεση σε MPPT είναι σχετικά απλή καθώς η καμπύλη ισχύος είναι γνωστή από την αρχή. Για να βρεθεί η συμπεριφορά της γεννήτριας ως προς τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της πρέπει πρώτα να βρεθεί το ρεύμα. Το ρεύμα της γεννήτριας έχει άμεση σχέση με τη ροπή (αναλογία) η οποία βρίσκεται από την ανάλυση της γεννήτριας (expfinal6 και efforts) και υπολογίζεται από εκεί. Θα ήταν επιθυμητό να υπάρχει ένας άλλος τρόπος ανάλυσης (πιο σίγουρος) καθώς δεν υπήρχε τρόπος να επαληθευθεί ο συγκεκριμένος στο εργαστήριο. Ο παραπάνω κώδικας χρησιμοποιείται είτε για DC είτε για AC σύνδεση.

B.5 Προσομοίωση της λειτουργίας για απευθείας σύνδεση σε μπαταρία με δυνατότητα σύνδεσης αυτεπαγωγής.

```
Nnom=300; % Οι ονομαστικές στροφές της γεννήτριας. Ενδεικτικά μπορείς να
βάλεις απλά κάποιες στροφές που θα είναι μεγαλύτερες από τις ονομαστικές.
Fluxoc=0.05; % Η πεπλεγμένη ροή της γεννήτριας.
Le=0; % Η τιμή της αυτεπαγωγής που προστίθεται ανά φάση 12.3 αγοράσαμε
Li=(1.793/1000)+Le; %β Η συνολική αυτεπαγωγή (εσωτερική+εξωτερική)
Rphase=0.614; % Αντίσταση φάσης
Rcable=0.06; % Αντίσταση καλωδίου (προσοχή διαφορετικό καλώδιο στο
εργαστήριο-εγκατάσταση)
Lcc=0; % Αυτεπαγωγή καλωδίου
Re=0;%0.246; % Ωμική αντίσταση της αυτεπαγωγής (γενικά μικρή)
Ri=Rphase+Rcable+Re; % Η συνολική αντίσταση μέχρι το φορτίο
Br=0.4; % Η πρώτη αρμονική της πυκνότητας μαγνητικής ροής (από Fortran)
Vbatt=48;
Rbatt=0.4;
Vd=0.7; % Η τάση στις διόδους
Vb=sqrt(2)*(Vbatt+2*Vd)/pi; % Ισοδύναμη AC τάση ανορθωτή-μπαταρίας
Rac=6*Rbatt/pi^2; % AC αντίσταση ανορθωτή-μπαταρίας
aird=1.2;
Radius=1.2;
A=pi*Radius^2;
poles=12;
q=3;
lamdaopt=7;
cpmax=0.35;
vwcutout=20;

% Οι συντελεστές του πολυωνύμου cp(λ)
p1 = -2.2042e-008;
p2 = 1.1712e-006;
p3 = -2.5915e-005;
p4 = 0.00030705;
p5 = -0.0020796;
p6 = 0.0079564;
p7 = -0.016329;
p8 = 0.018201;
p9 = -0.0064757;
p10 = 0.0092843;
p11 = 3.2532e-005;
n(1)=1;
Nstart=1;
for i=Nstart:Nnom
    n(i)=i;
    freq(i)=n(i)*poles/120;
    w(i)=2*pi*n(i)/60;
    we(i)=2*pi*freq(i);
    %Ef(i)=q*Fluxoc*(poles/2)*(2*pi*n(i)/60); % Η ΗΕΔ με τιμές προσομοίωσης
    Ef(i)=0.097597*n(i)+0.0058; % Η ΗΕΔ πειραματικά
```

```

Vdcopen(i)=1.35*sqrt(3)*Ef(i); % Η ανορθωμένη τάση ανοιχτοκύκλωσης
if Ef(i)<Vb; % Vw<Vwcutin
    Iac(i)=0;
    Idc(i)=0;
    Vrec(i)=Ef(i); % Η τάση στην είσοδο του ανορθωτή
    Vdc(i)=Vdcopen(i); % Η τάση στην έξοδο του ανορθωτή (βοηθητική)
    Vdc2(i)=Vbatt; % Η πραγματική τάση στην έξοδο του ανορθωτή
    Vt(i)=Ef(i); % Η τάση στα άκρα της γεννήτριας
    Pelectric(i)=0;
    Pt(i)=0;
    Pdc(i)=0;
    Telectric(i)=0;
    Protation(i)=0.045*n(i);
    Peddy(i)=2.982*10^(-6)*n(i)^2*poles^2*Bp^2;
    Pmech(i)=Protation(i)+Peddy(i);
    Vw(i)=0;
    lamda(i)=0;
else % Vwnom>Vw>Vwcutin
    if Ef(i)==Vb
        ncutin=i;
    end
    D(i)=(2*Vb*(Rac+Ri))^2-4*((Rac+Ri)^2+(we(i)*Li)^2)*(Vb^2-Ef(i)^2);
    Iac(i)=(-2*Vb*(Rac+Ri)+sqrt(D(i)))/(2*((Rac+Ri)^2+(we(i)*Li)^2)); % Το ρεύμα
    που κυκλοφορεί σε μια φάση της γεννήτριας
    delta(i)=atan(Iac(i)*we(i)*Li/(Iac(i)*Rac+Vb+Iac(i)*Ri));
    AA(i)=Ef(i)*cos(delta(i))-Iac(i)*Rphase;
    BB(i)=Ef(i)*sin(delta(i))-we(i)*(Li-Le)*Iac(i);
    Vt(i)=sqrt(AA(i)^2+BB(i)^2); % Η τερματική τάση της γεννήτριας
    aangle(i)=atan(BB(i)/AA(i));
    CC(i)=Vt(i)*cos(aangle(i))-Iac(i)*Re;
    DD(i)=Vt(i)*sin(aangle(i))-Iac(i)*we(i)*Le;
    Ve(i)=sqrt(CC(i)^2+DD(i)^2); % Η τάση μετά την αυτεπαγωγή
    bangle(i)=atan(DD(i)/CC(i));
    EE(i)=Ve(i)*cos(bangle(i))-Iac(i)*Rcable;
    FF(i)=Ve(i)*sin(bangle(i))-Iac(i)*we(i)*Lcc;
    Vr(i)=sqrt(EE(i)^2+FF(i)^2); % Η τάση στην είσοδο του ανορθωτή (ίδια με τη
Vrec)
    cangle(i)=atan(FF(i)/EE(i));
    Pt(i)=3*Vt(i)*Iac(i)*cos(aangle(i));
    Idc(i)=sqrt(2)*Iac(i)*3/pi; % Το ρεύμα μετά τον ανορθωτή
    Vrec(i)=Iac(i)*Rac+Vb; % Η τάση στην είσοδο του ανορθωτή
    Vdc(i)=sqrt(6)*Vrec(i)*3/pi; % Η τάση μετά τον ανορθωτή
    Vdc2(i)=Vbatt+Idc(i)*Rbatt;
    Pdc(i)=Idc(i)*Vdc(i); % Η ισχύς που βγαίνει από τον ανορθωτή
    Pdc2(i)=Idc(i)*Vdc2(i); % Η ισχύς που απορροφούν οι μπαταρίες
    Pelectric(i)=3*Vrec(i)*Iac(i); % Η ισχύς που δίνει η γεννήτρια
    effrect(i)=(Pdc(i)/Pelectric(i))*100; % Η απόδοση του ανορθωτή
    Pcopper(i)=3*Iac(i)^2*(Rphase+Rcable+Re);
    Peddy(i)=2.982*10^(-6)*n(i)^2*poles^2*Bp^2;
    PHM(i)=Pelectric(i)+Peddy(i)+Pcopper(i);

```

```

PHM2(i)=Pt(i)+Peddy(i)+3*Iac(i)^2*(Rphase);
Telectric(i)=PHM(i)/(2*pi*n(i)/60);
Protation(i)=0.045*n(i);
Pd(i)=2*Vd*Idc(i); % Οι απώλειες στον ανορθωτή
Pmech(i)=PHM(i)+Protation(i);
Pmech2(i)=Pdc2(i)+Pd(i)+Pcopper(i)+Peddy(i)+Protation(i);
% Pmech2(i)=PHM2(i)+Protation(i);
Tmech(i)=Pmech(i)/(2*pi*n(i)/60);
efficiency(i)=(Pdc2(i)/Pmech2(i))*100;

flag=0; % 0 για να βρει το πρόγραμμα την καμπύλη ισχύος
if flag==0
    if i<290 % Η τιμή αυτή επιλέγεται από το χρήστη (λίγο μεγαλύτερη από τις
ονομαστικές στροφές)
        vwlim=20;
        const=0.5*pi*aird*Radius^2;
        wd=w(i);
        syms V % Το matlab λύνει πολυώνυμα. ΠΡΟΣΟΧΗ μη ντετερμινιστικός
αλγόριθμος

        s=p1*const*(wd*Radius)^10+p2*const*(wd*Radius)^9*V+p3*const*(wd*Ra
adius)^8*V^2+p4*const*(wd*Radius)^7*V^3+p5*const*(wd*Radius)^6*V^4
+p6*const*(wd*Radius)^5*V^5+p7*const*(wd*Radius)^4*V^6+p8*const*(
wd*Radius)^3*V^7+p9*const*(wd*Radius)^2*V^8+p10*const*(wd*Radius)
^1*V^9+p11*const*V^10-Pmech(i)*V^7;
        solution=solve(s);

        y=solution(1);
        Vw(i)=eval(y)
        lamda(i)=wd*Radius/Vw(i);
        cpr(i)= p1*lamda(i)^10 + p2*lamda(i)^9 +p3*lamda(i)^8 + p4*lamda(i)^7
+p5*lamda(i)^6 + p6*lamda(i)^5 +p7*lamda(i)^4 + p8*lamda(i)^3
+p9*lamda(i)^2 + p10*lamda(i)^1 +p11;
        if Vw(i)>10
            break
        end
    end
end
end
end
end
end

```

Το πρόγραμμα αυτό προσομοιώνει τη σύνδεση γεννήτριας 850 W για σύνδεση απευθείας σε συσσωρευτές και μέσω αυτεπαγωγής (αλλάζοντας συγκεκριμένες μεταβλητές). Επιπλέον βρίσκει την καμπύλη ισχύος (δεδομένης της καμπύλης $cpr(\lambda)$ που δίνεται από τον σχεδιαστή της φτερωτής).

Σημείωση: Η καμπύλη ισχύος βρίσκεται με την επίλυση πολυωνύμων μεγάλου βαθμού. Αυτό το κάνει το matlab με μη ντετερμινιστικό αλγόριθμο. Έτσι πολύ συχνά το πρόγραμμα μπορεί να τερματίσει απότομα τη λειτουργία του. Π.χ. ακόμα και αν

δώσεις εντολή το ίδιο πολυώνυμο να λυθεί 200 φορές, κάποια στιγμή το πρόγραμμα θα τερματίσει απότομα.

Βιβλιογραφία

- [1] Consortium for Sustainable Village-Based Development, http://www.villageearth.org/pages/Appropriate_Technology/ATSourcebook/Introduction.php
- [2] Piggott H. “How to build a wind turbine”, 2005.
- [3] Hau E. “Wind Turbines, fundamentals, technologies, application, economics”, second edition, Springer, 2006.
- [4] Παπαθανασίου Σ., “Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, σημειώσεις παραδόσεων”, Ε.Μ.Π., 2008.
- [5] Gieras J., Wang R., Kamper M. “Axial flux permanent magnet brushless machines”, second edition, Springer, 2008.
- [6] Rovio T., 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.
- [7] Dubois M., Polinder H., Ferreira J., “Axial and radial-flux permanent magnet generators for direct-drive wind turbines”, In P Helm (Ed.), Proceedings (pp. 5-8). Munich: WIP, January 2001.
- [8] Yicheng C., Pragasen P., Azeem K., “PM Wind Generator Comparison of Different Topologies”, Industry Applications Conference, 2004, Vol.3, pp. 1405-1412, October, 2004.
- [9] Aydin M., Huang S., Lipo T.A., “Axial flux permanent magnet machines: A review”, Wisconsin Electric Machines & Power Electronics Consortium, 2004.
- [10] Parviainen A., Pyrhönen J., Kontkanen P., “Axial Flux Permanent Magnet Generator with Concentrated Winding for Small Wind Power Application”, IEEE Int' 1 Conf. on Electric Machines and Drives, pp. 1187-1191.
- [11] Κοτσαμπόπουλος Π., “Μελέτη, κατασκευή και προσομοίωση της λειτουργίας μικρής ανεμογεννήτριας αξονικής ροής”, Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., 2010.
- [12] Huang S., Luo J., Leonardi F., Lipo T.A., “A comparison of power density for axial flux machines based on general purpose sizing equations”
- [13] Rovio T., “A Feasibility Study of Permanent Magnet Generator Topologies for Small-Scale Wind Power Application”, Doctoral thesis, Tampere University of Technology.
- [14] Keppola H., Perälä R., Söderlund L., Vihriälä H., “Preliminary test results of an axial flux toroidal stator wind power generator”, ICEM 2000, Vol.3, August.

- [15] Chalmers B.J., Wu W., Spooner E., “An axial-flux permanent-magnet generator for a gearless wind energy system”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 2, June 1999.
- [16] Muljadi E., “Axial Flux, Modular, Permanent-Magnet Generator with a Toroidal Winding for Wind Turbine Applications”, IEEE Industry Applications Conference St. Louis, MO November 5-8, 1998.
- [17] Rossouw F., “Analysis and Design of Axial Flux Permanent Magnet Wind Generator System for Direct Battery Charging Applications”, thesis MScEng, Stellenbosch University, 2009.
- [18] Kamper M., Wang R., Rossouw F., “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.
- [19] Μανιάς Σ., “Ηλεκτρονικά ισχύος”, Εκδόσεις Συμμεών, 2007.
- [20] Bumby J., Stannard N., Dominy J., McLeod N., “A Permanent Magnet Generator for Small Scale Wind and Water Turbines”, Electrical Machines, 2008. ICEM 2008. 18th International Conference on, Vol., no., pp. 1-6, 6-9 Sept. 2008.
- [21] Bumby J., Stannard N., Martin R., “A Permanent Magnet Generator for Small Scale Wind Turbines”, IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 152, No. 5, pp.1065-1075, September 2005.
- [22] El-Hasan T., Luk P.C., “Magnet Topology Optimization to Reduce Harmonics in High-Speed Axial Flux Generators”, IEE Transactions on magnets, Vol. 39, No. 5, pp. 3340-3342, September 2003.
- [23] Magnussen F., Svechkarenko D., Thelin P., Sadarangani C., “Analysis of a PM machine with Concentrated fractional pitch windings”, in the proceedings of the Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics (NORPIE), Trondheim, Norway, 14-16 June 2004.
- [24] Javadi S., Mirsalim M., “Design and Analysis of 42-V Coreless Axial-Flux Permanent-Magnet Generators for Automotive Applications”, IEEE Transactions on magnetics, Vol. 46, No. 4, pp. 1015-1023, April 2010.
- [25] Greaves M.C., Walker G.R., Walsh B.B., “Design optimisation of Ironless Motors based on Magnet selection” Journal of Electrical & Electronics Engineering, Australia, IEAUST, vol. 21, no. 1, pp. 49-56.
- [26] Widyan M.S., “Design, Optimization, Construction and Test of Rare-Earth Permanent-Magnet Electrical Machines with New Topology for Wind Energy Applications”, Technischen Universitat Berlin, 2006.

- [27] Hosseini S.M., Miraslim A.M., Mirzaei M., “Design, Prototyping, and Analysis of a Low Cost Axial-Flux Coreless Permanent-Magnet Generator”, IEEE transactions on magnetics, Vol. 44, No. 1, pp.75-80, January 2008.
- [28] Garrison F. Price, Todd D. Batzel, Mihai Comanescu and Bruce A. Muller, “Design and testing of a Permanent Magnet Axial Flux Wind Power Generator”, Proceedings of the 2008 IAJC-IJME International Conference.
- [29] Chan T.F., Lai L. L., “An Axial-Flux Permanent-Magnet Synchronous Generator for a Direct-Coupled Wind-Turbine System”, IEEE Transaction on energy conversion, Vol. 22, No. 1, pp. 86-94, March 2007.
- [30] Stannard N., “Generator Design for, and Modelling of, Small-scale Wind Turbines”, Thesis, School of Engineering, Durham University, May 2008.
- [31] Chan T.F., Lai L.L., “Field Computation for an Axial Flux Permanent-Magnet Synchronous Generator”, IEEE Transactions on energy conversion, Vol. 24, No. 1, pp. 1-11, March 2009.
- [32] Piggot H., “A wind turbine recipe book”, 2009.
- [33] Wang R.J., “Design Aspects and Optimisation of an Axial Field Permanent Magnet Machine with an Ironless Stator”, Dissertation, University of Stellenbosch, March 2003.
- [34] Bartmann D., Fink D., “Homebrew Wind Power: Hands-on guide to harnessing the wind”, Buckville Publications, 2009.
- [35] Wang R.J., Kamper J.M., Westhuizen K., Gieras F.J., “Optimal Design of a Coreless Stator Axial Flux Permanent-Magnet Generator”, IEEE Transactions on magnetics, Vol. 41, No. 1, pp. 64, January 2005.
- [36] Sadeghierad M., Darabi A., Lesani H., Monsef H., “Rotor Yoke Thickness of coreless High-Speed Axial-Flux Permanent Magnet Generator”, IEEE Transactions on magnetics, Vol. 45, No. 4, pp. 2032-2037, April 2009.
- [37] Luk P.C., El-Hassan T., “Back iron design for high speed PM axial flux generators”, Magnetics Conference 2003, INTERMAG 2003. IEEE International.
- [38] Sadeghierad M., Darabi A., Lesani H., Monsef H., “Power-to-volume of the High Speed Generators”, World Applied Sciences Journal 7 (3), pp. 393-398, 2009.
- [39] Sadeghierad M., Darabi A., Lesani H., Monsef H., “Air Gap Optimization of High-Speed Axial-Flux PM Generator”, Journal of Applied Sciences 9 (10), pp. 1915-1921, 2009.

[40] Chowdhury S., Chowdhury S.P., Crossley P., “Microgrids and Active Distribution Networkd”, IET Renewable Energy Series 6, Institution of Engineering and Technology, 2009.

[41] Gary Moor, Johan Beukes, “Maximum Power Point Tracking methods for small scale Wind Turbines”.

