



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

**Μελέτη, κατασκευή και προσομοίωση της λειτουργίας μικρής
ανεμογεννήτριας αξονικής ροής**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κοτσαμπόπουλος Χ. Παναγιώτης

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάρτιος 2010



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

**Μελέτη, κατασκευή και προσομοίωση της λειτουργίας μικρής
ανεμογεννήτριας αξονικής ροής**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κοτσαμπόπουλος Χ. Παναγιώτης

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 12^η Μαρτίου 2010.

.....
Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σταύρος Σ. Παπαθανασίου
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Πάυλος Γεωργιλάκης
Λέκτορας Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάρτιος 2010

.....
Κοτσαμπόπουλος Χ. Παναγιώτης
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Κοτσαμπόπουλος Χ. Παναγιώτης, 2010
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, η κατασκευή και η προσομοίωση της λειτουργίας μίας μικρής ανεμογεννήτριας που διαθέτει γεννήτρια αξονικής ροής μονίμων μαγνητών. Σε αυτό το πλαίσιο μία μικρή ανεμογεννήτρια κατασκευάστηκε από την αρχή με βάση υπάρχοντα σχέδια.

Αρχικά αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά, οι χρήσεις και οι προοπτικές των μικρών ανεμογεννητριών. Εξηγούνται συνοπτικά βασικές αρχές της αεροδυναμικής και γίνεται σύντομη περιγραφή του τρόπου κατασκευής των πτερυγίων και των συστημάτων προσανατολισμού και προστασίας.

Στη συνέχεια, περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά των γεννητριών αξονικής ροής μονίμων μαγνητών, οι κύριες τοπολογίες καθώς και οι βασικές σχέσεις που διέπουν τη λειτουργία τους. Πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση σε εφαρμογές γεννητριών αξονικής ροής σε ανεμογεννήτριες. Παρουσιάζεται ο τρόπος διαστασιολόγησης της γεννήτριας, γίνεται προσομοίωση του μαγνητικού πεδίου της στο πρόγραμμα FEMM και υπολογίζεται η αναπτυσσόμενη ΗΕΔ καθώς και οι επιδόσεις της με χρήση του προγράμματος Matlab.

Εν συνεχεία, περιγράφεται ο τρόπος κατασκευής της γεννήτριας και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων τα οποία συγκρίνονται με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Έπειτα, εξετάζεται το ζήτημα της σύνδεσης της ανεμογεννήτριας. Γίνεται μία αναφορά στα μικροδίκτυα των οποίων η ανεμογεννήτρια μπορεί να αποτελέσει κομμάτι και εξετάζονται διαφορετικοί τρόποι σύνδεσης μίας μικρής ανεμογεννήτριας. Περιγράφεται η λειτουργία μεταβλητών στροφών κατά τη σύνδεση στον AC ζυγό του δικτύου ή μικροδικτύου και εξηγείται η λειτουργία του MPPT. Εξετάζεται η λειτουργία της ανεμογεννήτριας κατά τη σύνδεση σε ζυγό DC απευθείας σε συσσωρευτές και συνδεδεμένη με μετατροπέα MPPT.

Εν συνεχεία, προσομοιώνεται η λειτουργία της ανεμογεννήτριας που κατασκευάστηκε για τους δύο διαφορετικούς τρόπους σύνδεσης σε ζυγό DC. Αναπτύσσονται προγράμματα στο Matlab που υπολογίζουν την καμπύλη ισχύος, την χαρακτηριστική μεταβολής των στροφών, την χαρακτηριστική ελέγχου, την απόδοση κ.α. για τους δύο τρόπους. Υπολογίζεται η ετήσια ενεργειακή απόδοση για διαφορετικές μέσες ταχύτητες ανέμου και πραγματοποιούνται συγκρίσεις.

Τέλος, καταθέτονται βελτιωτικές προτάσεις. Όσον αφορά τη σύνδεση σε ζυγό DC διερευνάται η δυνατότητα αύξησης της παραγόμενης ισχύος με τη σύνδεση μίας αυτεπαγωγής κατάλληλης τιμής. Χαράσσεται η καμπύλη ισχύος, υπολογίζεται η ετήσια ενεργειακή απόδοση και παρουσιάζεται σημαντική αύξηση σε σχέση με την απευθείας σύνδεση. Όσον αφορά τη γεννήτρια, πραγματοποιείται νέα σχεδίαση με βελτιωμένη διαμόρφωση του τυλίγματος για σύνδεση σε ζυγό AC και λειτουργία σε χαμηλούς ανέμους.

Λέξεις κλειδιά:

μικρές ανεμογεννήτριες, μηχανές αξονικής ροής, μικροδίκτυα, σύνδεση σε συσσωρευτές, DC σύνδεση, MPPT

Abstract

The subject of this study is the design, construction and simulation of a small wind turbine with an axial flux permanent magnet generator. In this framework a small wind turbine was fully constructed based on existing plans.

Initially, the basic characteristics, uses and prospects of small wind turbines are mentioned. Basic principles of aerodynamics are briefly explained followed by the description of the way of constructing the rotor blades, the yaw and the protection system.

The characteristics, the main topologies and basic equations of axial flux permanent magnet machines are described. A review of the literature is undertaken on axial flux generators used on wind turbine applications. The design method of the generator is presented, a simulation of the magnetic field is performed using the FEMM program and the induced EMF is estimated as well as the performance of the generator with the use of the Matlab program.

The construction of the generator is described and the results of experimental measurements on the generator are being compared with the outcome of the simulation.

Subsequently, the different ways of connecting the small wind turbine are examined. Reference is made to microgrids, as the wind turbine can be part of them, and different ways of connecting a small wind turbine are discussed. The variable speed operation when connected to an AC bus of the utility grid or a microgrid is described and the MPPT function is explained. The operation of the wind turbine when connected to a DC bus either directly to a battery bank or with an MPPT converter is being examined.

The operation of the wind turbine that was constructed is simulated for the two different ways of connection to a DC bus. The power curve and other characteristic curves for both ways are being calculated by the development of programs on Matlab. The annual energy yield is estimated for different mean windspeeds and comparisons are carried out.

Finally, improvement proposals are being made. As far as the DC coupling is concerned, the possibility of increasing the produced power with the connection of an inductance is investigated. The power curve and the annual energy yield are estimated and show a significant increase compared with the direct battery connection. As far as the generator is concerned, a new design is carried out with an improved stator winding for AC coupling and low wind speeds.

Keywords: small wind turbines, axial flux machines, microgrids, battery charging, DC coupling, MPPT

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον Κώστα Λατούφη για τις υποδείξεις και την καθοδήγηση του κατά τη διάρκεια 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.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	
1.1 Μικρές ανεμογεννήτριες.....	12
1.2 Η ανεμογεννήτρια του Hugh Piggott.....	14
2. ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	
2.1 Βασικά στοιχεία αεροδυναμικής.....	16
2.2 Κατασκευή των πτερυγίων, του συστήματος προσανατολισμού και του συστήματος προστασίας.....	18
3. ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ	
3.1 Σύγχρονες γεννήτριες.....	23
3.2 Σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών αξονικής ροής.....	24
3.2.1 Ιστορία και βασικά χαρακτηριστικά.....	24
3.2.2 Πλεονεκτήματα και εφαρμογές.....	25
3.2.3 Βασικές τοπολογίες.....	27
3.3 Γεννήτριες αξονικής ροής για ανεμογεννήτριες: έρευνα και εμπορικές εφαρμογές.....	28
3.3.1 Μονός δρομέας- Μονός στάτης: πυρήνας σιδήρου στον στάτη με αύλακες.....	28
3.3.2 Διπλός δρομέας-Μονός στάτης: πυρήνας σιδήρου στον στάτη χωρίς αύλακες.....	29
3.3.3 Διπλός Στάτης-Μονός δρομέας (εσωτερικός).....	31
3.3.4 Διπλός Δρομέας-Μονός Στάτης χωρίς πυρήνα σιδήρου.....	32
3.3.5 Σύγκριση ανεμογεννητριών μονίμων μαγνητών αξονικής ροής με ακτινικής ροής.....	34
3.4 Η επιλεγμένη τοπολογία: Ανεμογεννήτρια αξονικής ροής χωρίς σίδηρο στον πυρήνα.....	36
3.5 Θεωρητική ανάλυση γεννητριών αξονικής ροής.....	37
3.5.1 Σχέσεις υπολογισμού της μαγνητικής ροής και ηλεκτρομαγνητικής ροπής για γεννήτριες αξονικής ροής.....	37
3.5.2 Βασικές σχέσεις και χαρακτηριστικά γεννητριών διπλού δρομέα-μονού στάτη χωρίς πυρήνα σιδήρου στον στάτη.....	39
3.5.2.1 Μορφή του τυλίγματος του στάτη και αριθμός των πόλων και των πηνίων.....	40
3.5.2.2 Μορφή της κυματομορφής της πεπλεγμένης ροής.....	43
3.5.2.3 Αντίσταση, αυτεπαγωγή και μάζα χαλκού του τυλίγματος του στάτη.....	44
3.5.2.4 Απώλειες δινορευμάτων στο τύλιγμα του στάτη.....	46
3.5.2.5 Απώλειες περιστροφής.....	46
3.5.2.6 Ισοδύναμο κύκλωμα και απόδοση της γεννήτριας.....	47
3.5.2.7 Ελκτική δύναμη μεταξύ των δύο δίσκων του δρομέα.....	48

4. ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΤΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	
4.1 Μελέτη της γεννήτριας.....	49
4.1.1 Ταχύτητα περιστροφής εκκίνησης και ΗΕΔ.....	49
4.1.2 Αριθμός πόλων και διαστάσεις μαγνητών του δρομέα.....	51
4.1.3 Αριθμός πηνίων, μορφή του τυλίγματος, αξονικό πάχος του στάτη, αριθμός ελιγμάτων ανά φάση του στάτη.....	52
4.1.4 Εξωτερική διάμετρος, διατομή, αντίσταση και αυτεπαγωγή ανά φάση, συνολική μάζα του τυλίγματος του στάτη.....	54
4.1.5 Πάχος των δύο δίσκων του δρομέα.....	58
4.2 Προσομοίωση του μαγνητικού πεδίου και επιδόσεις της γεννήτριας.....	59
4.2.1 Γεωμετρία του προβλήματος.....	60
4.2.2 Υπολογισμός της ΗΕΔ και της ηλεκτρομαγνητικής Ροπής.....	62
4.2.3 Επιδόσεις της γεννήτριας.....	66
5. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ	
5.1 Τρόπος κατασκευής της γεννήτριας.....	69
5.1.1 Κατασκευή του στάτη.....	69
5.1.2 Κατασκευή του δρομέα.....	72
5.1.3 Χαλύβδινη κατασκευή στήριξης.....	73
5.1.4 Συναρμολόγηση της γεννήτριας.....	74
5.2 Πειραματικές μετρήσεις.....	75
5.2.1 Πειραματική διάταξη και μετρούμενα μεγέθη.....	75
5.2.2 Ηλεκτρεγερτική δύναμη της γεννήτριας και DC τάση ανοιχτοκύκλωσης συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής.....	76
5.2.3 Τερματική τάση της γεννήτριας υπό μεταβλητό φορτίο.....	79
5.2.4 Μέτρηση της αντίστασης της γεννήτριας.....	82
5.2.5 Υπολογισμός της απόδοσης της γεννήτριας συνδεδεμένη με ωμικό φορτίο.....	83
6. ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΜΙΚΡΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	
6.1 Μικροδίκτυα.....	86
6.1.1 Γενικές πληροφορίες, εφαρμογές και πλεονεκτήματα.....	86
6.1.2 Τυπικό μικροδίκτυο.....	88
6.2 Τρόποι σύνδεσης μικρών ανεμογεννητριών.....	90
6.2.1 Σύνδεση σε ζυγό AC.....	91
6.2.1.1 Ηλεκτρονικά ισχύος.....	91
6.2.1.2 Λειτουργία μεταβλητών στροφών και μέθοδοι μεγιστοποίησης της αποδιδόμενης ισχύος (MPPT).....	97
6.2.2 Σύνδεση σε ζυγό DC.....	103
6.2.2.1 Σύνδεση απευθείας σε συσσωρευτές.....	106
6.2.2.2 Σύνδεση με σύστημα μεγιστοποίησης της ισχύος (MPPT).....	109
7. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΙΚΡΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗΣ ΣΕ ΖΥΓΟ DC	
7.1 Σύνδεση απευθείας σε συσσωρευτές.....	112
7.2 Σύνδεση με σύστημα μεγιστοποίησης της ισχύος (MPPT).....	124

7.3 Εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης της ανεμογεννήτριας και πραγματοποίηση συγκρίσεων.....	130
8. ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	
8.1 Βελτίωση του DC συστήματος με τη σύνδεση αυτεπαγωγής.....	135
8.1.1 Εφαρμογή στην κατασκευασθείσα ανεμογεννήτρια και σύγκριση των διαφορετικών τρόπων σύνδεσης.....	138
8.2 Σχεδίαση βελτιωμένης γεννήτριας για σύνδεση σε ζυγό AC.....	141
8.2.1 Ταχύτητα περιστροφής εκκίνησης, ΗΕΔ, αριθμός πόλων και πηνίων.....	142
8.2.2 Σχεδίαση του στάτη και του δρομέα.....	144
9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	150
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ: Προγράμματα σε MatLab	
A: Μετακίνηση του δρομέα και υπολογισμός της πεπλεγμένης ροής και της ηλεκτρομαγνητικής ροπής για διάφορα φορτία.....	151
B: Επιδόσεις της γεννήτριας για μεταβλητό ρεύμα και στροφές.....	156
Γ: Χαρακτηριστικές καμπύλες και επιδόσεις της ανεμογεννήτριας για απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές.....	157
Δ: Αεροδυναμική ισχύς της έλικας σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής για διάφορες ταχύτητες ανέμου.....	159
E: Χαρακτηριστικές καμπύλες και επιδόσεις της ανεμογεννήτριας για σύνδεση με λειτουργία MPPT.....	160
Z: Υπολογισμός της ενεργειακής απόδοσης της ανεμογεννήτριας.....	162
Βιβλιογραφία.....	163

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1: Μικρές ανεμογεννήτριες

Η παγκόσμια ανησυχία για τις επιπτώσεις της ανθρωπογενούς κλιματικής αλλαγής έχει οδηγήσει στην ολοένα και μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Άλλοι λόγοι που συνετέλεσαν σε αυτή τη στροφή είναι το γεγονός πως τα αποθέματα των ορυκτών καυσίμων δεν είναι ανεξάντλητα, καθώς και γεωπολιτικά ζητήματα που έχουν να κάνουν με τον έλεγχο των αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων που έχουν κατά καιρούς οδηγήσει σε οικονομικές κρίσεις. Έτσι, αιολικά πάρκα, φωτοβολταϊκά πάρκα και φωτοβολταϊκές οικιακές εγκαταστάσεις, μονάδες βιομάζας, γεωθερμίας, μονάδες εκμετάλλευσης των θαλάσσιων κυμάτων κ.α. αποκτούν όλο και μεγαλύτερο ρόλο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο τα τελευταία χρόνια είναι αξιοσημείωτη. Μεγάλα αιολικά πάρκα εγκαθίστανται σε περιοχές με υψηλές ταχύτητες ανέμου και έχουν την δυνατότητα να παράγουν σημαντικές ποσότητες ενέργειας. Παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια είτε στο κεντρικό δίκτυο είτε σε μεγάλα αυτόνομα συστήματα σε συνδυασμό με άλλες πηγές, όπως γεννήτριες ντίζελ. Παράλληλα, ανεμογεννήτριες μικρής κλίμακας αποκτούν όλο και μεγαλύτερο ενδιαφέρον σε συμπληρωματικό ρόλο με τα μεγάλα αιολικά και οι εγκαταστάσεις τους πληθαίνουν.



Σχήμα 1.1: Η μικρή ανεμογεννήτρια που κατασκευάστηκε τοποθετημένη στο Ε.Μ.Π.

Στην κατηγορία των μικρών ανεμογεννητριών ανήκουν ανεμογεννήτριες ονομαστικής ισχύος μέχρι 70kW. Ανεμογεννήτριες ονομαστικής ισχύος μέχρι 10kW χαρακτηρίζονται ως ιδιαίτερα μικρές ανεμογεννήτριες. Υπάρχουν συνολικά 211 εμπορικά διαθέσιμες ανεμογεννήτριες με διαφοροποιήσεις όσον αφορά τον άξονα περιστροφής της έλικας, το είδος της γεννήτριας, το είδος του συστήματος περιορισμού της ισχύος κ.α. [6]. Με

αντίστοιχο τρόπο που συνέβη και στις μεγάλες ανεμογεννήτριες, ο τύπος έλικας που επικράτησε μετά από πειραματισμούς είναι η έλικα οριζόντιου άξονα περιστροφής με τρία πτερύγια. Σύνθετα πολυεστερικά υλικά χρησιμοποιούνται στις περισσότερες περιπτώσεις για την κατασκευή των πτερυγίων. Το συνηθέστερο σύστημα αεροδυναμικού περιορισμού της ισχύος είναι το σύστημα furling ενώ υπάρχουν αρκετές ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούν έλεγχο pitch και λιγότερες έλεγχο stall. Όσον αφορά την κατεύθυνση του ανέμου σε σχέση με την άτρακτο, στις περισσότερες μικρές ανεμογεννήτριες ο άνεμος προσπίπτει πρώτα στην έλικα και μετά στην άτρακτο (upwind), ενώ υπάρχουν και κάποιες εμπορικά επιτυχημένες στις οποίες ο άνεμος προσπίπτει πρώτα στην άτρακτο και μετά στην έλικα (downwind). Η μεγάλη πλειοψηφία των μικρών ανεμογεννητριών διαθέτει γεννήτρια μονίμων μαγνητών ενώ ένα μικρό ποσοστό διαθέτει γεννήτρια επαγωγής.

Υπάρχουν πολλές παράμετροι που χαρακτηρίζουν μια μικρή ανεμογεννήτρια. Το σημαντικότερο είναι η καμπύλη ισχύος η οποία καθορίζει την παραγόμενη ενέργεια σε ένα χρονικό διάστημα ανάλογα με το αιολικό δυναμικό της περιοχής που βρίσκεται η εγκατάσταση. Οι μικρές ανεμογεννήτριες τοποθετούνται γενικά σε περιοχές με χαμηλότερη ετήσια μέση ταχύτητα ανέμου από ότι τα αιολικά πάρκα οπότε η λειτουργία τους σε χαμηλότερους ανέμους είναι μία σημαντική παράμετρος. Άλλα χαρακτηριστικά που έχουν μεγαλύτερη ή μικρότερη σημασία ανάλογα με την εφαρμογή είναι οι απαιτήσεις για συντήρηση, ο παραγόμενος θόρυβος, η αξιοπιστία, η δυσκολία στην αποκατάσταση βλάβης κ.α.

Οι μικρές ανεμογεννήτριες μπορούν είτε να αποτελέσουν κομμάτι μίας αυτόνομης εγκατάστασης είτε να συνδεθούν στο ηλεκτρικό δίκτυο χαμηλής τάσης. Σε αυτόνομα συστήματα συνδέονται σε αρκετές περιπτώσεις μαζί με φωτοβολταϊκά, εφόσον συχνά όταν δεν υπάρχει αρκετή ηλιοφάνεια υπάρχει αρκετός άνεμος και αντίστροφα. Αυτόνομες εγκαταστάσεις συναντώνται σε περιοχές όπου δεν υπάρχει σύνδεση με το κεντρικό δίκτυο και που η σύνδεση με αυτό συνήθως είναι δύσκολη και οικονομικά ασύμφορη. Έτσι, μικρές ανεμογεννήτριες για αυτόνομη λειτουργία εγκαθίστανται γενικά σε δύσβατες περιοχές, σε ιστιοπλοϊκά, και σε περιπτώσεις άλλων δυσκολιών σύνδεσης με το κεντρικό δίκτυο.

Σήμερα δύο δισεκατομμύρια άνθρωποι, δηλαδή το ένα τρίτο του παγκόσμιου πληθυσμού, δεν έχει πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι μικρές ανεμογεννήτριες χάρη στο χαμηλό τους κόστος μπορούν να ηλεκτροδοτήσουν ιατρικές κλινικές, σχολεία, ακόμα και ολόκληρες κοινότητες και να συμβάλλουν στην άνοδο του βιοτικού επιπέδου των κατοίκων αναπτυσσόμενων χωρών. Άλλες εφαρμογές που μπορούν να έχουν σε αγροτικό επίπεδο είναι η σύνδεση τους με αντλίες νερού για ύδρευση και άρδευση και η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε κέντρα φόρτισης συσσωρευτών.

Όσον αφορά τη σύνδεση στο δίκτυο χαμηλής τάσης, το πλήθος των εγκαταστάσεων εξαρτάται από το θεσμικό πλαίσιο της κάθε χώρας. Η σύνδεση στο δίκτυο μικρών ανεμογεννητριών γίνεται κυρίως στην ύπαιθρο ή σπανιότερα σε στέγες κτιρίων πόλεων και είναι αντίστοιχη με τη σύνδεση φωτοβολταϊκών στο δίκτυο με το πλεονέκτημα του αρκετά χαμηλότερου κόστους. Σε χώρες όπου δίνονται κίνητρα για την εγκατάσταση

μικρών ανεμογεννητριών, όπως επιδότηση της πώλησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο, συναντάται μεγαλύτερος αριθμός εγκαταστάσεων. Επίσης, και σε χώρες που δεν υπάρχει ευνοϊκό θεσμικό πλαίσιο όπως στη Γερμανία υπάρχουν μερικές χιλιάδες εγκαταστάσεις, που γίνονται αποκλειστικά λόγω οικολογικής ευαισθησίας. Στην Ελλάδα το θεσμικό πλαίσιο μέχρι σήμερα είναι αποθαρρυντικό για αυτό και οι διασυνδεδεμένες εγκαταστάσεις είναι εξαιρετικά σπάνιες.

1.2: Η ανεμογεννήτρια του Hugh Piggott

Στην παρούσα εργασία κατασκευάζεται η ανεμογεννήτρια που έχει σχεδιαστεί από τον Hugh Piggott (www.scoraigwind.com). Τα λεπτομερή σχέδια της κατασκευής βρίσκονται στο [1]. Η ανεμογεννήτρια τοποθετήθηκε στην οροφή των παλιών κτιρίων ηλεκτρολόγων του Ε.Μ.Π και συνδέθηκε με το μικροδίκτυο του εργαστηρίου Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας. Το βασικό σχέδιο της ανεμογεννήτριας σε μεγαλύτερο ή μικρότερο μέγεθος έχει κατασκευαστεί σε πολλές χώρες της Ευρώπης, στην Λατινική Αμερική, στην Αφρική, έχει αποτελέσει τη βάση εμπορικού προϊόντος και έχει κατασκευαστεί σε σχολεία και πανεπιστημιακό ίδρυμα (www.uni-kassel.de/agrar).

Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της ανεμογεννήτριας είναι η δυνατότητα ιδιοκατασκευής της, χρησιμοποιώντας υλικά όπως ξύλο, χάλυβα, χαλκό, απλά εργαλεία και χωρίς να χρειάζεται ιδιαίτερη προηγούμενη κατασκευαστική εμπειρία. Παράλληλα, αποτελεί μία ανεμογεννήτρια με υψηλή απόδοση λόγω της απουσίας πυρήνα στον στάτη, μηδενική ροπή ευθυγράμμισης που τις επιτρέπει να εκκινεί σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου και μπορεί να συναγωνιστεί γεννήτριες του εμπορίου. Επιπλέον, μια σημαντική δυνατότητα είναι η χρήση της για εκπαιδευτικούς σκοπούς, εφόσον φοιτητές ή μαθητές μπορούν να κατανοήσουν σε βάθος μέσα από την πράξη βασικές έννοιες της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, των ηλεκτρικών μηχανών και της αεροδυναμικής.

Στο πλαίσιο δύο διπλωματικών εργασιών κατασκευάστηκε η ανεμογεννήτρια με διάμετρο φτερών 2,4m που φαίνεται στο Σχήμα 1.1. Ολόκληρη η κατασκευή έγινε από φοιτητές του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Σημαντικό κομμάτι της διαδικασίας ήταν η εκμάθηση της χρήσης πληθώρας εργαλείων από λίμες για ξύλο, μέχρι ηλεκτροσυγκόλληση. Η κατασκευή των πτερύγιων της έλικας, της ουράς και του συστήματος furling παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 2, ενώ η κατασκευή της γεννήτριας, και της χαλύβδινης κατασκευής στήριξης παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 5.

Ερχόμενοι αντιμέτωποι με το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής παρατηρείται μια μεγάλη αντίφαση. Οι αναπτυσσόμενες χώρες που έχουν το μικρότερο μερίδιο ευθύνης για την κλιματική αλλαγή καλούνται να αντιμετωπίσουν πρωταρχικά και με εντονότερο τρόπο τις συνέπειες της. Έτσι, τίθεται το ζήτημα της κλιματικής δικαιοσύνης. Εγκαταστάσεις, ενδιάμεσης-ήπιας τεχνολογίας με την μεταφορά τεχνογνωσίας σε κατοίκους αναπτυσσόμενων χωρών, συλλογική εκμετάλλευση από τα οφέλη της εγκατάστασης, η ανάπτυξη ενός εργαστηρίου ή μίας μικρής βιοτεχνίας, μπορεί να αποτελέσουν παράδειγμα για έναν διαφορετικό τρόπο αντιμετώπισης ζητημάτων που σχετίζονται με την ενέργεια και την κοινωνική οργάνωση. Στο Σχήμα 1.2 φαίνεται μία

φωτογραφία από εγκατάσταση μικρής ανεμογεννήτριας ιδιοκατασκευής σε αγροτική κοινότητα στο Περού.



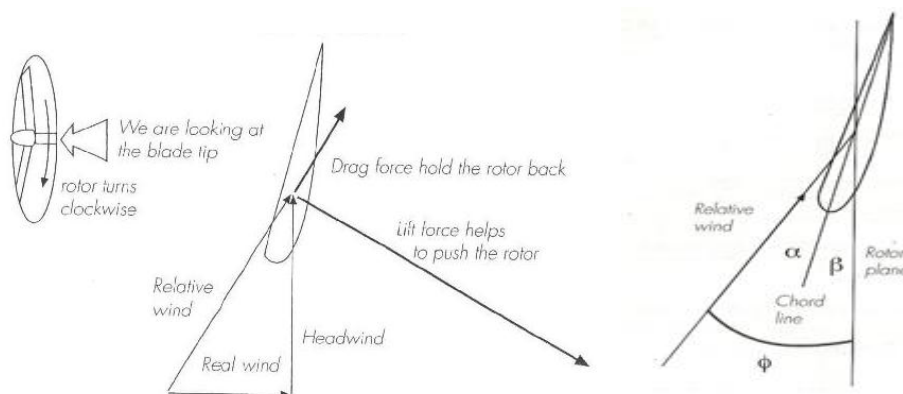
Σχήμα 1.2: Στιγμιότυπο από την εγκατάσταση μικρής ανεμογεννήτριας σε αγροτική κοινότητα στο Περού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

2.1: Βασικά στοιχεία αεροδυναμικής

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μία αναφορά σε βασικά στοιχεία αεροδυναμικής για την κατανόηση του σχεδιασμού της έλικας και περιγράφεται συνοπτικά ο τρόπος κατασκευής των πτερυγίων, του συστήματος προσανατολισμού και του αεροδυναμικού συστήματος προστασίας furling. Η έλικα αποτελείται από τρία πτερύγια, έχει οριζόντιο άξονα περιστροφής και είναι κατασκευασμένη από σουηδικό πεύκο. Η κατασκευή της έλικας από ξύλο έχει δοκιμαστεί και σε μεγάλες ανεμογεννήτριες [3], αλλά χρησιμοποιείται αρκετά σπάνια εξαιτίας προβλημάτων αποσύνθεσης, των απαιτήσεων συντήρησης, καθώς και της δυσκολίας μαζικής παραγωγής. Τα βασικά πλεονεκτήματα του ξύλου είναι πως είναι ελαφρύ, εύκολο στην επεξεργασία, έχει καλή αντοχή και το σημαντικότερο δεν παρουσιάζει προβλήματα κόπωσης [2]. Έτσι, ενδείκνυται για μικρές κατασκευές που πραγματοποιούνται χωρίς καλούπια.

Οι μελέτες πάνω στην αεροδυναμική των πτερυγίων των ανεμογεννητριών βασίστηκαν πάνω σε μελέτες αεροδυναμικής για αεροσκάφη. Οι αεροτομές που χρησιμοποιούνται στα πτερύγια ανεμογεννητριών συχνά είναι οι ίδιες που χρησιμοποιούνται σε αεροσκάφη. Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται η αεροτομή του άκρου ενός πτερυγίου που στρέφεται δεξιόστροφα. Η ακμή της αεροτομής στην οποία προσπίπτει ο άνεμος ονομάζεται ακμή πρόσπτωσης (leading edge) και η άλλη ακμή ονομάζεται ακμή διαφυγής (trailing edge). Η ευθεία γραμμή που ενώνει την ακμή διαφυγής με το μέσο της ακμής πρόσπτωσης ονομάζεται χορδή της αεροτομής. Θεωρώντας το άκρο του πτερυγίου ακίνητο «φαίνονται» δύο ταχύτητες του ανέμου: η πραγματική ταχύτητα ανέμου και η ταχύτητα του ανέμου που προκαλείται από την περιστροφή του πτερυγίου και ισούται με τη μεταφορική ταχύτητα του άκρου του πτερυγίου $\omega \cdot R$ (Headwind στο Σχήμα 2.1). Η συνισταμένη ταχύτητα ανέμου όπως φαίνεται από την ακίνητο άκρο ενός πτερυγίου είναι η σχετική ταχύτητα ανέμου u_r . Έτσι, ασκούνται στο άκρο του πτερυγίου δύο δυνάμεις. Η μία είναι η δύναμη τριβής του αέρα (drag force) που έχει την κατεύθυνση της σχετικής ταχύτητας και η άλλη είναι η δύναμη άνωσης (lift force). Η δύναμη άνωσης είναι αυτή που επιτρέπει στην άκρη του πτερυγίου να κινείται με μεγαλύτερη μεταφορική ταχύτητα από την ταχύτητα του ανέμου.

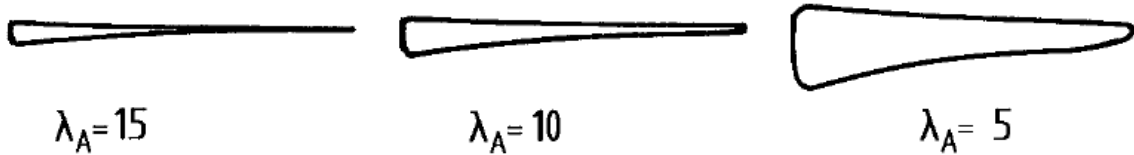


Σχήμα 2.1: Αεροτομή πτερυγίου ανεμογεννήτριας, οι ασκούμενες αεροδυναμικές δυνάμεις και οι χαρακτηριστικές γωνίες.

Η δύναμη άνωσης είναι υπεύθυνη για την περιστροφική κίνηση των πτερυγίων, ενώ η δύναμη τριβής αντιτίθεται στην κίνηση. Για να επιτευχθεί υψηλός αεροδυναμικός συντελεστής του δρομέα χρειάζεται ο λόγος της τριβής προς την άνωση να είναι ο ελάχιστος. Ο λόγος αυτός εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης α (attack) που ορίζεται ως η γωνία μεταξύ της σχετικής ταχύτητας του ανέμου και της χορδής της αεροτομής και φαίνεται στο Σχήμα 2.1. Η βέλτιστη γωνία πρόσπτωσης μετά από μελέτες σε αεροσήραγγες είναι περίπου 4° . Γενικά όσο αυξάνεται η γωνία α αυξάνεται η άνωση μέχρι μία οριακή τιμή από την οποία το πτερύγιο περνάει στην κατάσταση stall. Στο ίδιο σχήμα παριστάνεται η γωνία βήματος β (pitch) μεταξύ της χορδής της αεροτομής και του επίπεδου περιστροφής. Σημειώνουμε πως η γωνία α εξαρτάται από την πραγματική ταχύτητα του ανέμου, ενώ η γωνία β είναι κατασκευαστικό χαρακτηριστικό του πτερυγίου. Τέλος, ορίζεται η γωνία ροής (flow) ϕ που είναι η γωνία μεταξύ της σχετικής ταχύτητας του ανέμου και του επίπεδου περιστροφής και ισούται με το άθροισμα των γωνιών α και β .

Επειδή η μεταφορική ταχύτητα $\omega \cdot r$ δεν είναι σταθερή σε όλο το μήκος του πτερυγίου αλλά μειώνεται όσο κινούμαστε προς το εσωτερικό του, για να παραμένει σταθερή η γωνία $\alpha = 4^\circ$ θα πρέπει η γωνία β να μεταβάλλεται. Έτσι, κοντά στον άξονα περιστροφής όπου η μεταφορική ταχύτητα είναι μικρή η γωνία β πρέπει να είναι μεγάλη, ενώ όσο κινούμαστε προς το άκρο που η μεταφορική ταχύτητα αυξάνεται, η γωνία β μειώνεται.

Το πλάτος χορδής της αεροτομής μεταβάλλεται σε σχέση με την απόσταση από τον άξονα και μειώνεται όσο πλησιάζουμε στο άκρο του πτερυγίου. Σύμφωνα με το [3] η θεωρητική σχέση που εκφράζει τη μεταβολή τους είναι υπερβολική. Για δεδομένο αριθμό φτερών όσο μεγαλώνει ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου της σχεδίασης, μειώνεται το πλάτος της χορδής όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Συνήθεις τιμές του βέλτιστου λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου για μικρές ανεμογεννήτριες είναι 6 ή 7.



Σχήμα 2.2: Μεταβολή του πλάτους χορδής αεροτομής σε σχέση με την απόσταση από τον άξονα, για διαφορετικούς λόγους ταχύτητας ακροπτερυγίου.

Στη συνέχεια θα αναφερθούμε συνοπτικά στον τρόπο σχεδίασης της έλικας που κατασκευάστηκε. Το μήκος των πτερυγίων, δηλαδή η ακτίνα της έλικας, υπολογίζεται από την επιθυμητή ονομαστική ισχύ στην ονομαστική ταχύτητα ανέμου. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή η ονομαστική ταχύτητα ανέμου είναι $V_w = 10 \text{ m/sec}$, η πυκνότητα του ανέμου $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$, ο αεροδυναμικός συντελεστής c_p θεωρείται 0,35, ο βέλτιστος λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου $\lambda = 7$ και η αεροδυναμική ισχύς στην ονομαστική ταχύτητα ανέμου 950W για ονομαστική ηλεκτρική ισχύ 850W και απόδοση της γεννήτριας 90%. Έτσι, από τη σχέση:

$$P_{air} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_w^3 \quad (2.1)$$

προκύπτει η ακτίνα της έλικας $R = 1,2 \text{ m}$

Έπειτα, το κάθε πτερύγιο χωρίζεται σε 6 ισαπέχοντες σταθμούς στον καθένα από τους οποίους υπολογίζεται η γωνία β και το πλάτος της χορδής c από τους εξής τύπους: [2]

$$b = \arctan\left(\frac{D}{3r \cdot \lambda_{opt}}\right) \cdot 57,3 - a \quad (2.2)$$

$$c = \frac{1,4 \cdot D^2 \cdot \cos\left(\frac{b}{57,3}\right)^2}{r \cdot \lambda_{opt}^2 \cdot 3 \cdot CI} \quad (2.3)$$

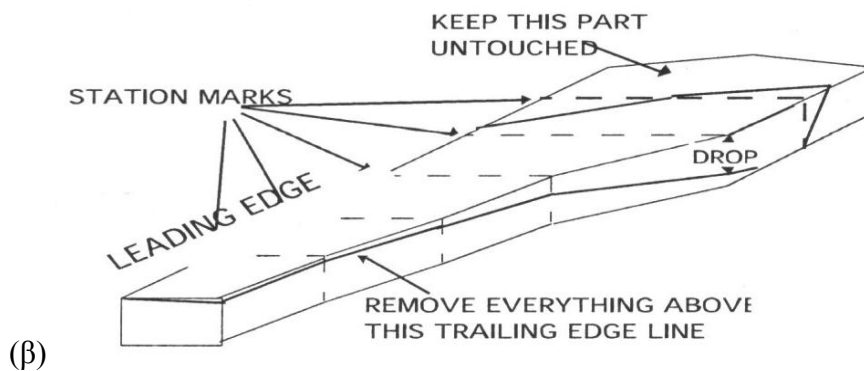
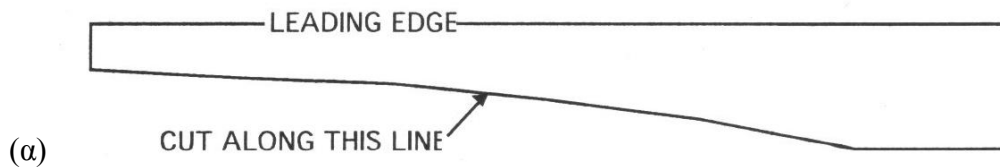
όπου $D = 2R$ η διάμετρος της έλικας, r η απόσταση από τον άξονα περιστροφής και CI ο συντελεστής άνωσης που υποθέτεται 0,8.

Έχοντας επιλέξει την αεροτομή που θα χρησιμοποιηθεί καθώς και το πάχος των πτερυγίων μπορεί να ξεκινήσει η κατασκευή των πτερυγίων.

2.2: Κατασκευή των πτερυγίων, του συστήματος προσανατολισμού και του συστήματος προστασίας

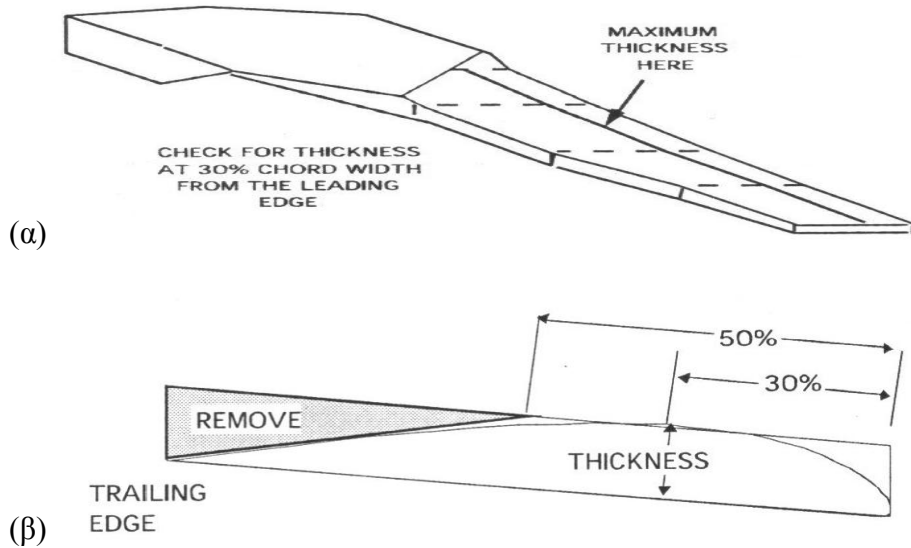
Τα πτερύγια κατασκευάζονται από ξύλα σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου χρησιμοποιώντας τα εξής εργαλεία ξυλουργικής: λίμα, ράσπα, παστράγγουλο, πριόνι, ξύστρα, πλάνη, σκαρπέλο.

Το κάθε πτερύγιο χωρίζεται σε 6 ισαπέχοντες σταθμούς. Στο πρώτο βήμα αφαιρείται σημαντικό μέρος του ξύλου ώστε να αποκτηθούν οι επιθυμητές τιμές για το πλάτος χορδής σε κάθε σταθμό (Σχήμα 2.3α). Στο δεύτερο βήμα αφαιρείται ξύλο από την εμπρόσθια πλευρά του πτερυγίου (Σχήμα 2.3β) και αποκτώνται οι επιθυμητές τιμές για την γωνία βήματος.



Σχήμα 2.3: Διαμόρφωση του επιθυμητού πλάτους χορδής(α) και της επιθυμητής γωνίας βήματος (β).

Στο τρίτο βήμα αφαιρείται ξύλο από το πίσω μέρος του πτερυγίου ώστε να εξασφαλιστεί το σωστό πάχος για όλο το μήκος του πτερυγίου (Σχήμα 2.4α). Σημειώνουμε πως το πάχος είναι σταθερό σε όλο το μήκος του πτερυγίου. Στο τέταρτο βήμα αφαιρείται ξύλο από το πίσω μέρος του πτερυγίου ώστε να δημιουργηθεί η επιθυμητή αεροτομή (Σχήμα 2.4β). Φωτογραφίες από την κατασκευή της ανεμογεννήτριας φαίνονται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.4: Διαμόρφωση του επιθυμητού πάχους(α) και της αεροτομής των πτερυγίων(β).

Στη συνέχεια διαμορφώνεται σε σχήμα τριγώνου η πλευρά του πτερυγίου που θα προσαρμοστεί στον άξονα ώστε να είναι εφικτή η σύνδεση με τα άλλα δύο πτερύγια στην πλήμνη. Κόβονται δύο ξύλινοι δίσκοι που αποτελούν την πλήμνη ανάμεσα στους οποίους θα τοποθετηθεί η έλικα για να συγκρατείται. Γίνονται οι κατάλληλες τρύπες στα πτερύγια και στους δίσκους της πλήμνης για να μπορούν να προσαρμοστούν στον άξονα περιστροφής της γεννήτριας. Τρία επιπλέον κομμάτια ξύλου προστίθενται κοντά στη βάση των πτερυγίων ώστε να αυξηθεί η γωνία βήματος σε κοντινή απόσταση από τον άξονα.



Σχήμα 2.5: Χρήση εργαλείων ξυλουργικής για την κατασκευή των πτερυγίων.

Μετά το πέρας της κατασκευής πιθανές ατέλειες καλύπτονται με την έγχυση πολυεστερικής ρητίνης. Για την προστασία των ξύλων από τις εξωτερικές συνθήκες τα πτερύγια εμποτίζονται με μυκητοκτόνο αστάρι και βερνίκι (Σχήμα 2.6) .

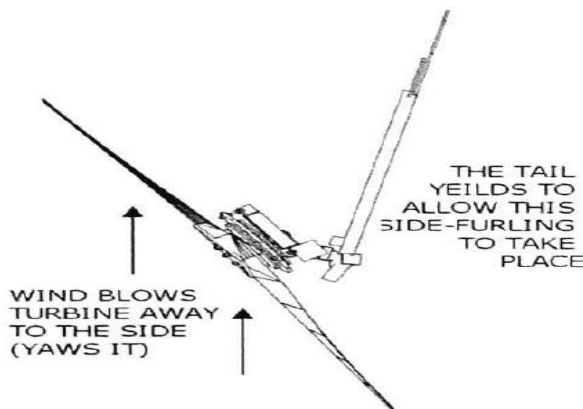


Σχήμα 2.6: Εμποτισμός των πτερυγίων με βερνίκι.

Το σύστημα yaw, δηλαδή το σύστημα που επιτρέπει στην ανεμογεννήτρια να ακολουθεί την κύρια κατεύθυνση του ανέμου, αποτελείται από το πτερύγιο κατεύθυνσης που βρίσκεται στο πίσω μέρος της (Σχήμα 1.1). Κίνηση ως προς τον ιστό στήριξης επιτυγχάνεται με την κίνηση του μεγαλύτερου σωλήνα της χαλύβδινης κατασκευής στήριξης σε σχέση με τον ιστό. Η ουρά αποτελείται από έναν χαλύβδινο σωλήνα και ένα

ξύλινο κόντρα πλακέ εμβαδού: $\frac{D^2}{40}$

Σε ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής ενεργοποιείται το αεροδυναμικό σύστημα περιορισμού της ισχύος furling. Στην περίπτωση αυτή η έλικα στρίβει εκτός της κύριας κατεύθυνσης του ανέμου, δηλαδή η γωνία yaw αυξάνεται, με αποτέλεσμα να μειώνεται ο αεροδυναμικός συντελεστής του δρομέα [3]. Για να γίνει αυτό εφικτό ο σωλήνας της ουράς συνδέεται υπό κατάλληλη γωνία με την χαλύβδινη κατασκευή στήριξης και επιτρέπεται η σχετική κίνηση τους με την σχετική κίνηση δύο σωλήνων. (Σχήμα 2.7).



Σχήμα 2.7: Λειτουργία του συστήματος furling σε υψηλές ταχύτητες ανέμου

Έχοντας κατασκευάσει παράλληλα τη γεννήτρια, την χαλύβδινη κατασκευή και την ουρά τα πτερύγια τοποθετούνται στον άξονα της γεννήτριας ανάμεσα στους δύο ξύλινους δίσκους που αποτελούν την πλήμνη. Γίνεται ευθυγράμμιση και ζύγιασμα της ανεμογεννήτριας τοποθετώντας λεπτά φύλλα από μολύβι ώστε να περιορίζονται οι ταλαντώσεις κατά τη λειτουργία της. Έτσι, η ανεμογεννήτρια είναι έτοιμη να ανυψωθεί και να στηριχθεί με συρματόσχοινα στον τόπο εγκατάστασης της (Σχήμα 2.8).



Σχήμα 2.8: Ανύψωση της ανεμογεννήτριας που κατασκευάστηκε στην πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ

3.1: Σύγχρονες γεννήτριες

Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ο βασικός τύπος γεννητριών που χρησιμοποιούνται είναι οι σύγχρονες γεννήτριες. Σύγχρονες γεννήτριες συναντώνται στις μεγάλες θερμοηλεκτρικές μονάδες, σε υδροηλεκτρικά έργα, σε σταθμούς ντίζελ κτλ..

Όσον αφορά τις μεγάλες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται γεννήτριες επαγωγής και σύγχρονες γεννήτριες. Οι γεννήτριες επαγωγής μπορούν να συνδεθούν είτε απευθείας στο δίκτυο σε λειτουργία σταθερών στροφών, εφόσον μικρή αλλαγή στις στροφές μπορεί να επιτευχθεί με μεταβολή της ολίσθησης, είτε σε λειτουργία μεταβλητών στροφών, ενώ οι σύγχρονες γεννήτριες συνδέονται γενικά με ηλεκτρονικά ισχύος σε λειτουργία μεταβλητών στροφών.

Οι σύγχρονες γεννήτριες μπορούν είτε να έχουν ηλεκτρική διέγερση είτε το πεδίο της διέγερσης τους να δημιουργείται από μόνιμους μαγνήτες. Οι γεννήτριες με ηλεκτρική διέγερση έχουν το πλεονέκτημα πως μπορούν να ελέγξουν τον συντελεστή ισχύος τους μέσω του ρεύματος διέγερσης. Από την άλλη οι γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη πλεονεκτούν στο ότι έχουν καλύτερη απόδοση εφόσον δεν παρουσιάζουν απώλειες χαλκού στο δρομέα. Επίσης, δεν χρειάζονται ψήκτρες στο δρομέα για την εγκατάσταση του ρεύματος διέγερσης άρα χρειάζονται λιγότερη συντήρηση και η κατασκευή τους είναι απλούστερη. Μειονεκτήματα τους είναι το μεγαλύτερο κόστος λόγω του αυξημένου κόστους των μόνιμων μαγνητών και η μη δυνατότητα ελέγχου του συντελεστή ισχύος.

Ένα ζήτημα που έχει ιδιαίτερη σημασία στις ανεμογεννήτριες είναι ο τρόπος σύνδεσης της έλικας με τη γεννήτρια. Η έλικα στρέφεται με αργές ταχύτητες, ενώ οι γεννήτριες γενικά στρέφονται με πολύ υψηλότερες. Έτσι, οι περισσότερες μεγάλες ανεμογεννήτριες διαθέτουν κιβώτιο ταχυτήτων μεταξύ της έλικας και της γεννήτριας το οποίο πολλαπλασιάζει τις στροφές της έλικας. Με αυτόν τον τρόπο όμως δημιουργούνται επιπλέον απώλειες στο κιβώτιο ταχυτήτων, απαιτείται επιπλέον συντήρηση, αυξάνει το μέγεθος και το βάρος του συστήματος και παρουσιάζεται μεγαλύτερη πολυπλοκότητα κατά την κατασκευή.

Απευθείας σύνδεση της έλικας με την γεννήτρια μπορεί να επιτευχθεί μόνο αν η γεννήτρια διαθέτει έναν μεγάλο αριθμό πόλων. Αυτό είναι εφικτό σε σύγχρονες γεννήτριες μόνιμων μαγνητών και τέτοια συστήματα εφαρμόζονται πλέον σε μεγάλες ανεμογεννήτριες [3] και συχνότερα σε μικρές ανεμογεννήτριες.

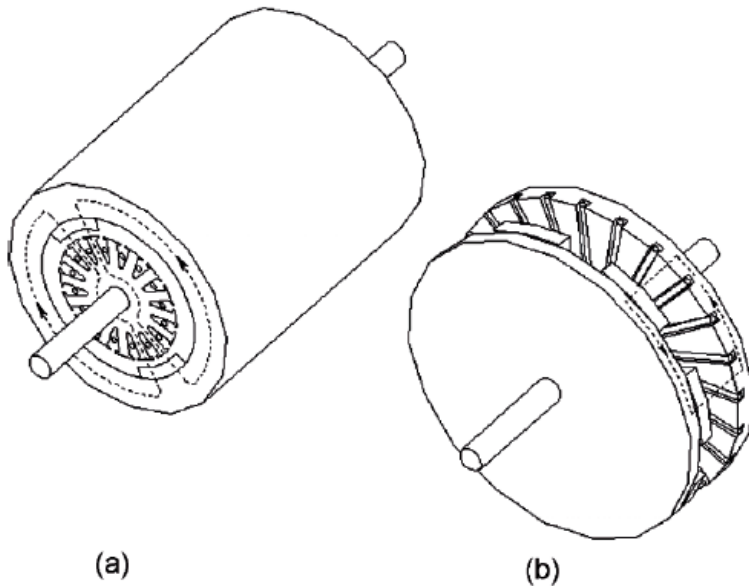
Όσον αφορά τις μικρές ανεμογεννήτριες συνήθως χρησιμοποιούνται σύγχρονες γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη. Βασικό πλεονέκτημα των σύγχρονων γεννητριών σε σχέση με τις γεννήτριες επαγωγής είναι πως δεν χρειάζεται να απορροφούν άεργο ισχύ από το δίκτυο οπότε ενδείκνυνται για αυτόνομες εφαρμογές. Σχετικά μεγάλος αριθμός πόλων

εγκαθίσταται στο δρομέα ώστε να μην απαιτείται η χρήση κιβωτίου ταχυτήτων. Η σύνδεση χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων διευκολύνεται από το γεγονός πως η έλικα περιστρέφεται με πιο μεγάλες ταχύτητες, λόγω της μικρότερης διαμέτρου της, οπότε δεν απαιτείται ιδιαίτερα μεγάλος αριθμός πόλων. Επίσης, το γεγονός πως οι τιμές των μονίμων μαγνητών και ειδικότερα των μαγνητών NdFeB μειώνονται περιορίζει το μειονέκτημα του υψηλότερου κόστους των γεννητριών με μόνιμους μαγνήτες.

3.2: Σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών αξονικής ροής

3.2.1: Ιστορία και βασικά χαρακτηριστικά

Ο ευρέως χρησιμοποιούμενος τύπος σύγχρονων μηχανών μονίμων μαγνητών είναι ο λεγόμενος ακτινικής ροής (Radial Flux Permanent Magnet machine). Στις μηχανές μονίμων μαγνητών ακτινικής ροής η μαγνητική ροή έχει την ακτινική διεύθυνση και το σχήμα τους είναι κυλινδρικό. Ένα άλλο είδος μηχανών μονίμων μαγνητών αποκτά όλο και περισσότερες εφαρμογές. Πρόκειται για τις μηχανές μονίμων μαγνητών αξονικής ροής (Axial Flux Permanent Magnet machines) στις οποίες η μαγνητική ροή έχει την διεύθυνση του άξονα περιστροφής και δισκοειδές σχήμα (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1: Μηχανή μονίμων μαγνητών ακτινικής ροής (α) και αξονικής ροής (β).

Για την ιστορία, η πρώτη μηχανή αξονικής ροής που έχει καταγραφεί είναι ο δίσκος του Faraday (1831). Ο δισκοειδής τύπος κατασκευής ηλεκτρικών μηχανών υπάρχει και στο “patents” του Tesla (1889). Οι βασικοί λόγοι για τους οποίους οι μηχανές αξονικής ροής δεν διαδόθηκαν ήταν η δυνατή αξονική μαγνητική ελκτική δύναμη μεταξύ του στάτη και

του δρομέα, η δυσκολία στη συναρμολόγηση της μηχανής και στη διατήρηση της ομοιομορφίας του διακένου.

Γενικότερα για τις μηχανές μόνιμων μαγνητών, αν και ήταν γνωστές από τις αρχές του 1830, η κακή ποιότητα των σκληρών μαγνητικών υλικών αποθάρρυνε τη χρήση τους. Η ανακάλυψη του Alnico το 1931, του barium ferite το 1950, και ειδικότερα του υλικού νεοδύμιο-σίδηρος-βόριο (NdFeB) το 1983, έκαναν εφικτή την επανεμφάνιση των μηχανών με διέγερση μόνιμων μαγνητών.

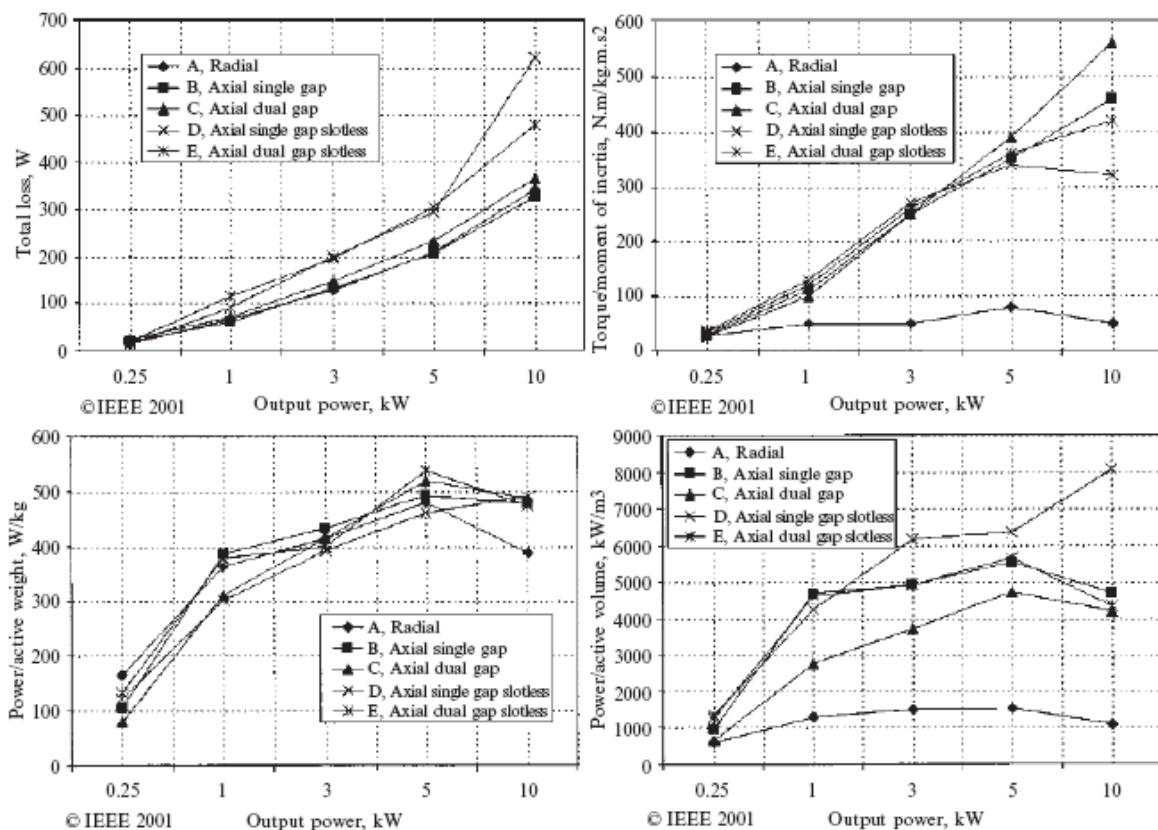
Η διαθεσιμότητα των μαγνητικών υλικών μεγάλης ενέργειας και ειδικότερα των μαγνητών NdFeB, καθώς και η ελάττωση της τιμής τους, είναι οι κύριες αιτίες της ανάπτυξης των μηχανών μόνιμων μαγνητών και έφεραν ξανά στο προσκήνιο τις μηχανές αξονικής ροής. Με τη διαθεσιμότητα φτηνότερων μόνιμων μαγνητών οι μηχανές αξονικής ροής μπορεί να παίξουν ένα σημαντικό ρόλο στο κοντινό μέλλον [4].

3.2.2: Πλεονεκτήματα και εφαρμογές

Η μηχανή μόνιμων μαγνητών αξονικής ροής είναι μια ελκυστική εναλλακτική στη μηχανή ακτινικής ροής μόνιμων μαγνητών και πλέον προτιμάται σε αρκετές εφαρμογές. Τα βασικά πλεονεκτήματά της είναι τα εξής [4]:

- η δυνατότητα σχεδίασης της ώστε να έχει υψηλότερη πυκνότητα ισχύος (ισχύς εξόδου ανά μονάδα μάζας ή όγκου) περιορίζοντας το υλικό του πυρήνα. Έτσι, έχει πιο συμπαγή κατασκευή.
- ο λόγος της διαμέτρου του πυρήνα προς το αξονικό μήκος είναι μεγαλύτερος. Όταν μεγαλώνει η διάμετρος του πυρήνα μπορεί να εγκατασταθεί μεγαλύτερος αριθμός πόλων, κάνοντας τις μηχανές αξονικής ροής κατάλληλες για εφαρμογές υψηλής συχνότητας ή χαμηλής ταχύτητας.
- η εσωτερική διάμετρος του πυρήνα είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερη από τη διάμετρο του άξονα περιστροφής και έτσι μπορεί να επιτευχθεί καλύτερος αερισμός και ψύξη.

Στο Σχήμα 3.2 συγκρίνονται οι επιδόσεις μιας συμβατικής μηχανής ακτινικής ροής με τέσσερις διαφορετικές τοπολογίες μηχανών αξονικής ροής σε πέντε διαφορετικά επίπεδα ισχύος. Παρατηρούμε πως η μηχανή αξονικής ροής έχει μικρότερο όγκο και λιγότερη μάζα για δεδομένη ισχύ από ότι η μηχανή ακτινικής ροής.



Σχήμα 3.2: Σύγκριση των επιδόσεων μηχανών μονίμων μαγνητών ακτινικής ροής με αξονικής ροής διαφορετικών τοπολογιών.

Τα πλεονεκτήματα των μηχανών αξονικής ροής οδήγησαν σε μία πληθώρα εφαρμογών σε διάφορους τομείς που ξεκινούν από κλάσματα του Watt και φτάνουν σχεδόν μέχρι 1MW. Όσον αφορά εφαρμογές ηλεκτρικής ισχύος χρησιμοποιούνται κυρίως στη διεσπαρμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και σε ηλεκτρικά οχήματα ως:

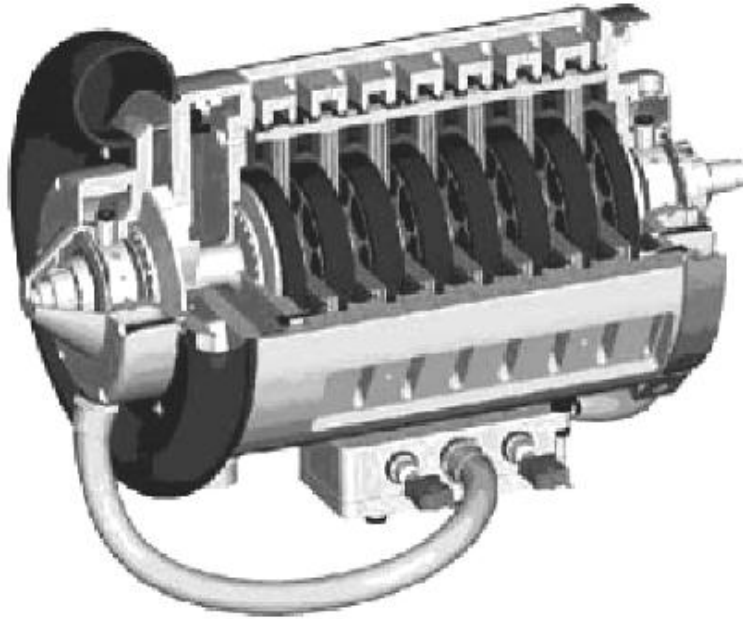
-Γεννήτριες υψηλής ταχύτητας συνδεδεμένες με αεριοστρόβιλο. Μία τοπολογία πολλαπλών δίσκων, χωρίς πυρήνα στον στάτη άρα υψηλής απόδοσης και χαμηλής μάζας με ονομαστική ισχύ 100kW και ταχύτητα περιστροφής 60.000RPM φαίνεται στο Σχήμα 3.3.

-Γεννήτριες χαμηλής ταχύτητας συνδεδεμένες απευθείας με την έλικα ανεμογεννήτριας.

-Κινητήρες για ηλεκτρικά οχήματα. Η μεγάλη διάμετρος του δρομέα που οδηγεί σε υψηλή ροπή αδράνειας, καθώς και η υψηλή πυκνότητα ροπής καθιστούν τις μηχανές αξονικής ροής κατάλληλες για ηλεκτρικά οχήματα.

Επίσης, μηχανές αξονικής ροής χρησιμοποιούνται σε αντλίες, ανεμιστήρες, ηλεκτρικά εργαλεία, βιομηχανικό εξοπλισμό και στη ρομποτική. [4]

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



Σχήμα 3.3: Γεννήτρια αξονικής ροής πολλαπλών δίσκων χωρίς πυρήνα στον στάτη ονομαστικής ισχύος 100kW συνδεδεμένη με αεριοστρόβιλο.

3.2.3: Βασικές τοπολογίες

Υπάρχει ένα μεγάλο εύρος διαφορετικών τοπολογιών μηχανών αξονικής ροής όπου μπορεί να επιλεγθεί ανάλογα με την εφαρμογή.

Οι βασικές κατηγορίες είναι οι εξής:

- Μονός δρομέας-Μονός στάτης
 - Με πυρήνα σιδήρου στον στάτη χωρίς αύλακες
 - Με πυρήνα σιδήρου στον στάτη με αύλακες
 - Χωρίς πυρήνα σιδήρου στον στάτη
- Διπλός δρομέας-Μονός στάτης (στο εσωτερικό)
 - Με πυρήνα σιδήρου στον στάτη χωρίς αύλακες
 - Με πυρήνα σιδήρου στον στάτη με αύλακες
 - Χωρίς πυρήνα σιδήρου στο στάτη και στον δρομέα (Halbach)
- Διπλός στάτης- Μονός δρομέας (στο εσωτερικό)

- Με πυρήνα σιδήρου στον στάτη χωρίς αύλακες
- Με πυρήνα σιδήρου στον στάτη με αύλακες
- Χωρίς πυρήνα σιδήρου στον στάτη
- Πολλαπλών δίσκων

Παραδείγματα και συγκρίσεις μεταξύ των κυριότερων τοπολογιών θα γίνουν για εφαρμογές ανεμογεννητριών στην παράγραφο 3.3.

3.3: Γεννήτριες αξονικής ροής για ανεμογεννήτριες: έρευνα και εμπορικές εφαρμογές

Οι γεννήτριες αξονικής ροής χάρη στη δυνατότητα εύκολης τοποθέτησης μεγάλου αριθμού πόλων, μπορούν να λειτουργήσουν σε χαμηλές ταχύτητες περιστροφής και έτσι είναι κατάλληλες για αιολικά συστήματα χωρίς τη χρήση κιβώτιου ταχυτήτων. Η απουσία του κιβώτιου ταχυτήτων μειώνει το μέγεθος, το βάρος και το θόρυβο του συστήματος αυξάνοντας την συνολική απόδοση και αξιοπιστία του [5]. Παράλληλα, η ανάπτυξη υψηλής ροπής ανά μονάδα μάζας και όγκου, περιορίζει επιπλέον το μέγεθος του συστήματος που αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα για τις αιολικές εφαρμογές. Η σχετικά υψηλή ροπή αδράνειας, επιτρέπει την αποθήκευση ενέργειας στην περιστρεφόμενη μηχανή που κάνει πιο ομαλή την παραγωγή ισχύος κατά τη μεταβατική κατάσταση [5].

Σε παγκόσμια καταγραφή όλων των μικρών ανεμογεννητριών που υπάρχουν στο εμπόριο από 6W μέχρι 50KW [6] από τις 211 ανεμογεννήτριες που καταγράφηκαν οι 7 χρησιμοποιούν γεννήτρια μονίμων μαγνητών αξονικής ροής. Η ισχύς τους κυμαίνεται από 250W μέχρι 15kW και είναι κατάλληλες για αυτόνομες εγκαταστάσεις, για σύνδεση στο δίκτυο ή για εφαρμογές άντλησης και θέρμανσης. Κάποιες από αυτές διαθέτουν στάτη με πυρήνα σιδήρου με ελάσματα, ενώ άλλες διαθέτουν διαμαγνητικό στάτη.

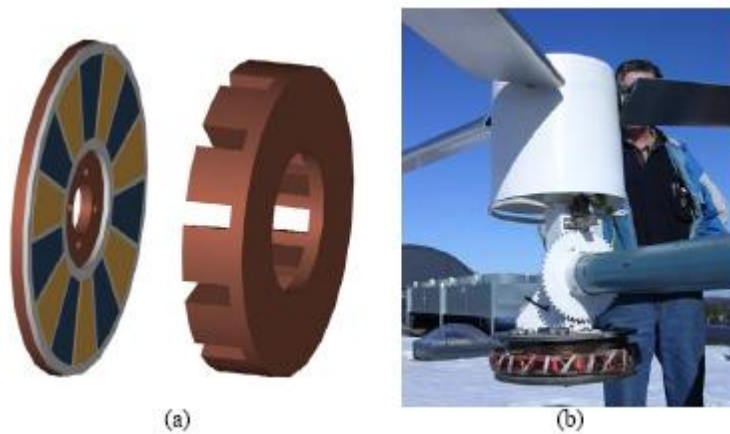
Με βάση τα πλεονεκτήματα των γεννητριών αξονικής ροής έχουν μελετηθεί και κατασκευαστεί σε πανεπιστήμια μια σειρά από διαφορετικές τοπολογίες για εφαρμογές ανεμογεννητριών ανάλογα με τις επιδιώξεις του σχεδιαστή τους. Μετά από μία ανασκόπηση της βιβλιογραφίας παρουσιάζονται ενδεικτικές τοπολογίες:

3.3.1: Μονός δρομέας- Μονός στάτης: πυρήνας σιδήρου στον στάτη με αύλακες

Μία τέτοια διάταξη ισχύος 1.6kW πραγματοποιήθηκε στο [7] και η δομή της φαίνεται στο Σχήμα 3.4.

Αποτελείται από τον δρομέα, ο οποίος είναι ένας χαλύβδινος δίσκος στην περιφέρεια του οποίου είναι εγκαθιστημένοι οι μαγνήτες, και τον στάτη ο οποίος διαθέτει σιδερένιο πυρήνα με αύλακες. Ο κάθε μαγνήτης έχει αντίθετη πολικότητα με τον διπλανό του ώστε να κλείνει το μαγνητικό κύκλωμα περνώντας από τον πυρήνα του στάτη και από τον χαλύβδινο δίσκο του δρομέα. Το τύλιγμα που τοποθετείται στους αύλακες είναι

συγκεντρωμένο, διπλής στρώσης δηλαδή σε κάθε αύλακα είναι τοποθετημένοι αγωγοί από δύο πηνία.



Σχήμα 3.4: Γεννήτρια αξονικής ροής μονού δρομέα-μονού στάτη με αυλακώσεις για εφαρμογή ανεμογεννήτριας.

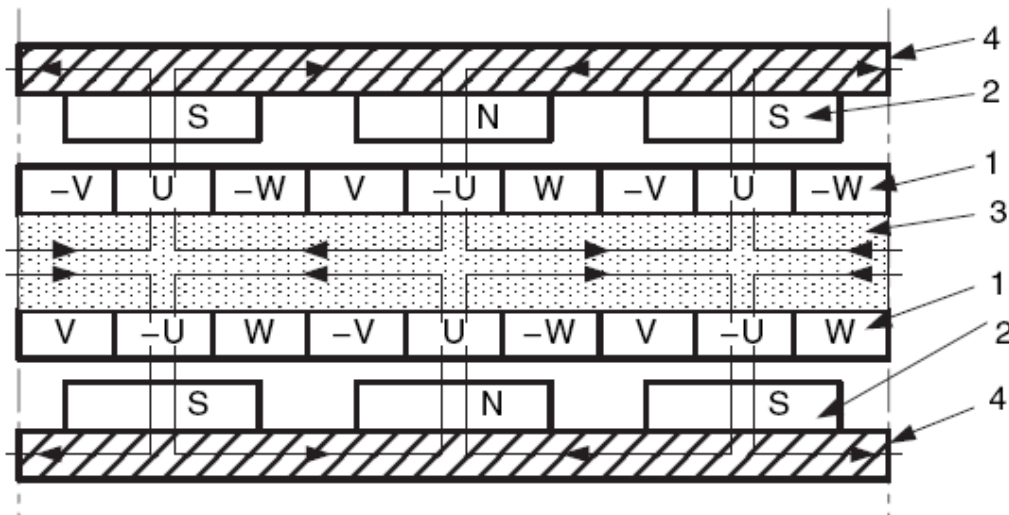
Εφόσον η γεννήτρια είναι αξονικής ροής έχει υψηλή πυκνότητα ισχύος άρα και ροπής. Επίσης, το συγκεντρωμένο τύλιγμα λόγω των μικρότερων άκρων τυλίγματος που διαθέτει από ότι το διανεμημένο τύλιγμα μειώνει την εξωτερική διάμετρο της γεννήτριας. Έτσι, η συγκεκριμένη γεννήτρια καταλαμβάνει μικρό όγκο για τις επιδόσεις της που είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα.

Οι αύλακες μειώνουν το διάκενο της μηχανής και εξυπηρετούν στη δημιουργία ισχυρότερου μαγνητικού πεδίου στο διάκενο. Μεγαλύτερη μαγνητική επαγωγή οδηγεί σε ανάπτυξη μεγαλύτερης ροπής. Αυτό σημαίνει πως για την παραγωγή της ίδιας ροπής χρειάζονται λιγότεροι μόνιμοι μαγνήτες το οποίο μειώνει το κόστος της μηχανής, εφόσον το κόστος των μαγνητών είναι πολύ υψηλότερο από το κόστος του σιδήρου. Έχουν όμως το μειονέκτημα της δημιουργίας ροπής ευθυγράμμισης. Η ροπή ευθυγράμμισης είναι ιδιαίτερα σημαντικό μέγεθος σε εφαρμογές ανεμογεννητριών γιατί δυσκολεύει την εκκίνηση της έλικας με αποτέλεσμα να μην είναι εφικτή η παραγωγή ισχύος σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου. Ένα άλλο μειονέκτημα που προκύπτει λόγω των αυλακών είναι η μεγάλη ελκτική δύναμη ανάμεσα στο δρομέα και στον στάτη που αυξάνει το πάχος του δίσκου του δρομέα ώστε να αποφευχθεί υπερβολική παραμόρφωση και επιβάλλει τη χρήση μεγαλύτερου ρουλεμάν.

3.3.2: Διπλός δρομέας-Μονός στάτης: πυρήνας σιδήρου στον στάτη χωρίς αύλακες

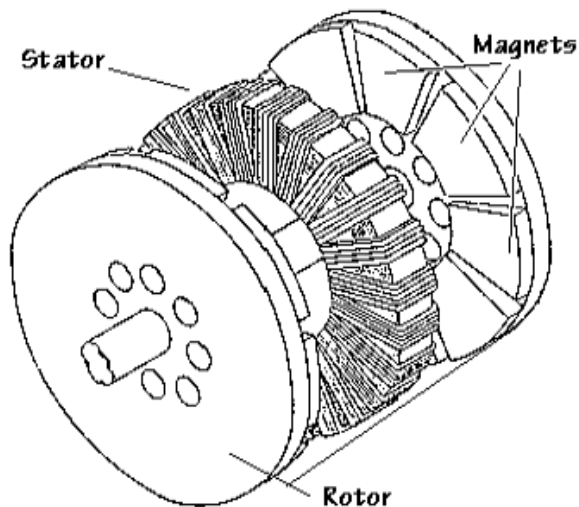
Η συγκεκριμένη διάταξη έχει μελετηθεί και πραγματοποιηθεί αρκετές φορές σε ανεμογεννήτριες για ισχύ που φτάνει μέχρι και τα 100kW[8].

Ο δρομέας αυτής της τοπολογίας αποτελείται από δύο παράλληλους χαλύβδινους δίσκους στους οποίους είναι τοποθετημένοι αντικριστά μόνιμοι μαγνήτες. Ο κάθε μαγνήτης έχει αντίθετη πολικότητα με τον διπλανό του πάνω στον ίδιο χαλύβδινο δίσκο, και την ίδια πολικότητα με τον μαγνήτη που βρίσκεται αντικριστά στον απέναντι δίσκο. Στον στάτη βρίσκεται τοποθετημένος πυρήνας σιδήρου χωρίς αύλακες σε σχήμα «δαχτυλιδιού» και πολυφασικό τύλιγμα το οποίο αποκαλείται τοροειδές, από όπου προκύπτει η ονομασία της μηχανής Torus. Μια τέτοια μηχανή αναπαρίσταται στο Σχήμα 3.6 και το ευθύγραμμο ανάπτυγμα της φαίνεται στο Σχήμα 3.5 όπου διαγράφεται η διαδρομή της μαγνητικής ροής και η μορφή του τυλίγματος. Κάποιες τέτοιες μηχανές περιγράφονται στους [8], [10], [11].



Σχήμα 3.5: Ευθύγραμμο ανάπτυγμα μηχανής διπλού δρομέα-μονού στάτη με τοροειδές τύλιγμα.

Η απουσία των αυλακών έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ενός μεγάλου διάκενου μεταξύ των πυρήνων του στάτη και του δρομέα που οδηγεί σε μικρότερες τιμές της αυτεπαγωγής μαγνήτισης. Επίσης, σκέδαση της μαγνητικής ροής λόγω αυλακών δεν υπάρχει και έτσι περιορίζεται επιπλέον η τιμή της σύγχρονης αυτεπαγωγής. Παράλληλα, για τον ίδιο λόγο η ροπή ευθυγράμμισης πρακτικά είναι ανύπαρκτη το οποίο είναι ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα στις αιολικές εφαρμογές.

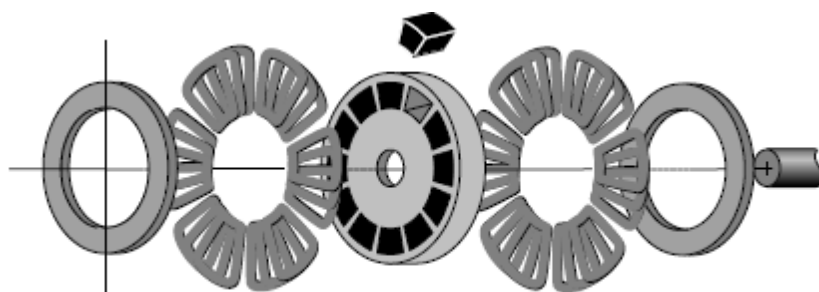


Σχήμα 3.6: Μηχανή διπλού δρομέα-μονού στάτη με τορροειδές τύλιγμα.

Συγκρίνοντας αυτή τη μηχανή με μία μηχανή που διαθέτει πυρήνα σιδήρου στον στάτη με αύλακες παρατηρούμε πως οι μηχανικοί περιορισμοί που δημιουργούνται λόγω των υψηλών ελκτικών δυνάμεων εξαιτίας των αυλακών δεν ισχύουν, εφόσον το διπλό διάκενο περιορίζει την ελκτική δύναμη που ασκείται στους δρομείς. Πλεονέκτημα της απουσίας των αυλακών είναι επίσης οι μικρότερες τιμές της αυτεπαγωγής μαγνήτισης και σκέδασης της μηχανής. Από την άλλη, η ανυπαρξία των αυλακών σημαίνει πως για την ανάπτυξη της ίδιας μαγνητικής επαγωγής χρειάζονται περισσότεροι μαγνήτες, που οδηγεί σε αύξηση του κόστους. Τέλος, η συγκεκριμένη κατασκευή είναι λιγότερο στιβαρή.

3.3.3: Διπλός Στάτης-Μονός δρομέας (εσωτερικός)

Η παρακάτω τοπολογία που φαίνεται στο Σχήμα 3.7 χωρίς αύλακες για εφαρμογή ανεμογεννήτριας αναφέρεται στο [12] και έχει μελετηθεί στο [13].



Σχήμα 3.7: Τοπολογία μηχανής διπλού στάτη-μονού δρομέα, με τον δρομέα στο εσωτερικό.

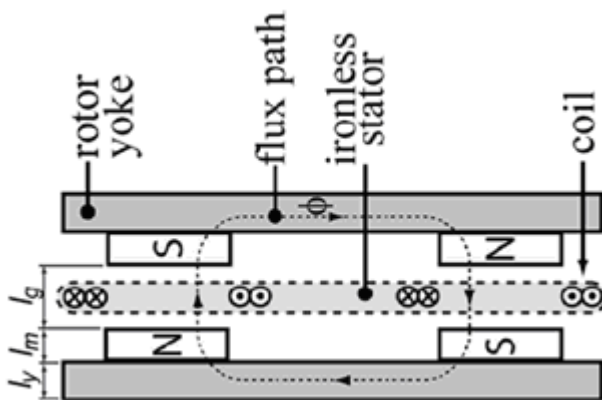
Ο δρομέας βρίσκεται στο εσωτερικό της μηχανής και αποτελείται από έναν μη μαγνητικό μεταλλικό δίσκο στον οποίο είναι τοποθετημένοι κυβοειδής μαγνήτες. Κάθε μαγνήτης έχει αντίθετη πολικότητα από τον διπλανό του και είναι ενσωματωμένος στο δίσκο με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι σε άμεση επαφή με τον αέρα και στις δύο πλευρές του δίσκου. Ο στάτης βρίσκεται στο εξωτερικό της μηχανής και αποτελείται από δύο ξεχωριστά τυλίγματα με πυρήνα σιδήρου σε σχήμα «δαχτυλιδιού» ώστε να αυξάνεται η τιμή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο.

Αντίστοιχη τοπολογία με αυλακώσεις στον στάτη έχει μελετηθεί στο [14]. Οι γεννήτριες αξονικής ροής με εσωτερικό δρομέα και αυλακώσεις στον στάτη έχουν καλύτερη επίδοση από τις γεννήτριες ακτινικής ροής μόνιμων μαγνητών και τις γεννήτριες αξονικής ροής με τοροειδές τυλίγμα στον στάτη («Torus» παράγραφος 3.3.2) για δεδομένη διάμετρο[9]. Δεδομένου πως μέχρι στιγμής λίγη έρευνα έχει εκπονηθεί και λίγες κατασκευές έχουν πραγματοποιηθεί με τη συγκεκριμένη τοπολογία για εφαρμογές ανεμογεννητριών [9] μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως αξίζει να ερευνηθεί περαιτέρω.

3.3.4: Διπλός Δρομέας-Μονός Στάτης χωρίς πυρήνα σιδήρου

Η συγκεκριμένη τοπολογία παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της απουσίας πυρήνα σιδήρου στον στάτη.

Ο δρομέας αποτελείται από δύο μεταλλικούς δίσκους στην περιφέρεια των οποίων είναι τοποθετημένοι μόνιμοι μαγνήτες. Κάθε μαγνήτης έχει αντίθετη πολικότητα από τον διπλανό του και επίσης αντίθετη πολικότητα με αυτόν που βρίσκεται αντικριστά στον απέναντι δίσκο. Το τυλίγμα είναι τοποθετημένο σε ένα διαμαγνητικό και μη αγώγιμο στάτη που βρίσκεται ανάμεσα στους δύο μεταλλικούς δίσκους και μπορεί να είναι διανεμημένο ή συγκεντρωμένο (Σχήμα 3.8).

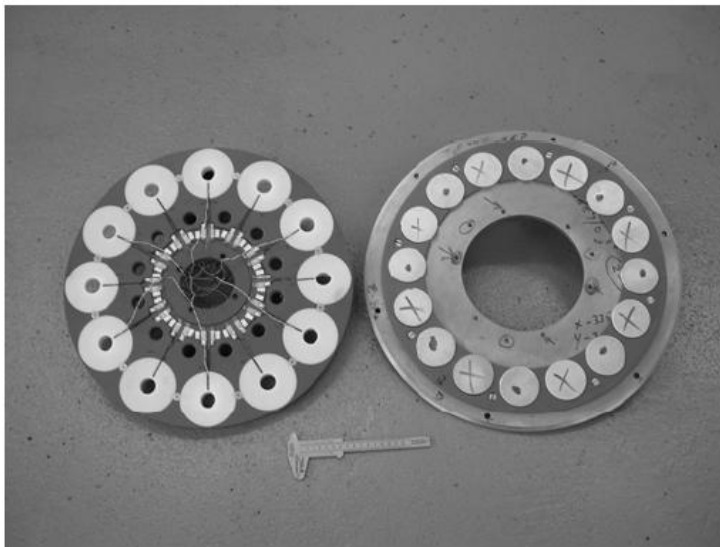


Σχήμα 3.8: Ευθύγραμμο ανάπτυγμα τοπολογίας διπλού δρομέα-μονού στάτη χωρίς πυρήνα σιδήρου.

Η διάταξη αυτή περιλαμβάνει σημαντικά πλεονεκτήματα. Απώλειες πυρήνα υστέρησης ή δινορευμάτων είναι ανύπαρκτες εφόσον στον στάτη δεν υπάρχει σίδηρος και η μαγνητική ροή που διέρχεται από τον σίδηρο του δρομέα δεν μεταβάλλεται. Αυτό σημαίνει πως μπορεί να λειτουργήσει με υψηλότερη απόδοση από ότι άλλες τοπολογίες. Η απουσία σιδήρου στον στάτη επίσης οδηγεί σε μηδενική ροπή ευθυγράμμισης και απουσία μαγνητικού κορεσμού με αποτέλεσμα η σχέση της ροπής με το ρεύμα να είναι γραμμική. Παράλληλα, η κυματομορφή της τάσης είναι σχεδόν ημιτονοειδής. Επιπλέον, η κατασκευή είναι ιδιαίτερα εύκολη, αφού δεν υπάρχουν αύλακες ούτε σίδηρος στο στάτη, και η συναρμολόγηση δεν παρουσιάζει προβλήματα, εφόσον δεν υπάρχουν μαγνητικές δυνάμεις μεταξύ του στάτη και του δρομέα.

Το μεγάλο διάκενο που δημιουργείται οδηγεί σε μεγαλύτερο όγκο μόνιμων μαγνητών στο δρομέα για την ανάπτυξη της ίδιας μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο. Έτσι, αυξάνεται το κόστος της γεννήτριας. Επίσης, κατά τη λειτουργία σε σχετικά υψηλές συχνότητες εκδηλώνονται απώλειες δινορευμάτων στους αγωγούς του τυλίγματος του στάτη.

Σε εφαρμογές μικρών ανεμογεννητριών υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσης των πηνίων παράλληλα ή σε σειρά ώστε να είναι εφικτή η σύνδεση είτε σε συσσωρευτές είτε στο δίκτυο χαμηλής τάσης [15]. Στο Σχήμα 3.9 φαίνεται ο στάτης και ο ένας δίσκος του δρομέα γεννήτριας ισχύος 1 kW και απόδοσης 93,94% με κυκλικούς μαγνήτες και πηνία. Η γεννήτρια αυτή είναι κατάλληλη και για εφαρμογή μικρού υδροηλεκτρικού [15]. Εκτενέστερη ανάλυση της τοπολογίας γίνεται στην παράγραφο 3.5.2.



Σχήμα 3.9: Στάτης και δρομέας γεννήτριας αξονικής ροής χωρίς πυρήνα στον στάτη ονομαστικής ισχύος 1kW με κυκλικούς μαγνήτες και πηνία.

3.3.5: Σύγκριση ανεμογεννητριών μονίμων μαγνητών αξονικής ροής με ακτινικής ροής.

Η σύγκριση των επιδόσεων ανεμογεννητριών με γεννήτριες αξονικής ροής και ανεμογεννητριών με γεννήτριες ακτινικής ροής είναι ένα σύνθετο ζήτημα που μπορεί να μελετηθεί είτε με μοντέλα σε ηλεκτρονικό υπολογιστή είτε με πραγματικές κατασκευές.

Όσον αφορά το κόστος κατασκευής, το συγκρίσιμο μέγεθος είναι το κόστος προς την ονομαστική ισχύ της μηχανής. Επειδή όμως διαφορετικές γεννήτριες λειτουργούν σε διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής, το μέγεθος που υπολογίζεται για τις συγκρίσεις είναι το κόστος προς την ηλεκτρομαγνητική ροπή.

Στο [16] χρησιμοποιώντας ένα πρόγραμμα σε υπολογιστή τα δύο αναφερθέντα είδη μηχανών βελτιστοποιούνται ως προς το κόστος προς ροπή και ως προς τη ροπή προς όγκο της μηχανής. Από τους υπολογισμούς προέκυψε πως οι μηχανές μονίμων μαγνητών ακτινικής ροής έχουν μικρότερο κόστος προς ροπή από τις μηχανές αξονικής ροής με αύλακες, άλλα χαμηλότερη ροπή προς όγκο. Σύμφωνα με την έρευνα, στις ανεμογεννήτριες χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων η ελάττωση του κόστους είναι πιο σημαντική από την ελάττωση του αξονικού μήκους. Οπότε, με βάση το κόστος καταλήγει πως η γεννήτρια μονίμων μαγνητών ακτινικής ροής εξακολουθεί να είναι καλύτερη επιλογή από την αξονικής ροής με αύλακες.

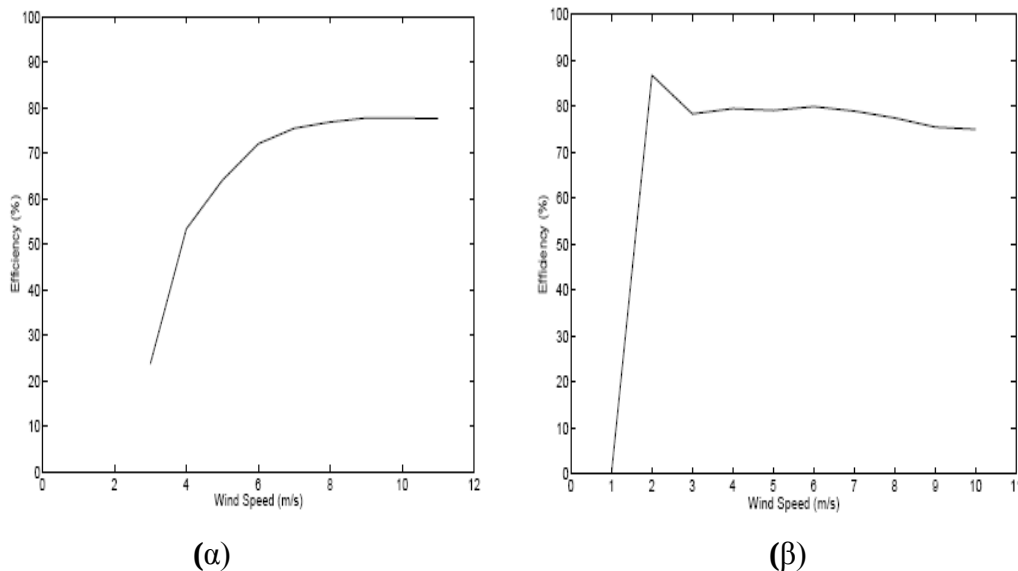
Σε παραπλήσια έρευνα [9] 60 διαφορετικές μηχανές που έχουν κατασκευαστεί ή σχεδιαστεί συγκρίνονται. Μηχανές της τοπολογίας «Torus» (παράγραφος 3.3.2) έχουν σχεδόν τη διπλάσια πυκνότητα ισχύος από μία ακτινικής ροής με επιφανειακούς μόνιμους μαγνήτες. Παρόλα αυτά, το μεγάλο διάκενο απαιτεί την τοποθέτηση μόνιμων μαγνητών με μεγαλύτερο αξονικό ύψος στον δρομέα. Έτσι, μηχανές της τοπολογίας «Torus» έχουν σχεδόν το διπλάσιο κόστος προς ροπή από μηχανές ακτινικής ροής με επιφανειακούς μαγνήτες.

Σύμφωνα με την ίδια έρευνα, η γεννήτρια διπλού στάτη-μονού δρομέα στο εσωτερικό, με σιδερένιο πυρήνα με αύλακες (παράγραφος 3.3.3) έχει αισθητά μικρότερο κόστος προς ροπή και μεγαλύτερη ροπή προς όγκο από τις γεννήτριες ακτινικής ροής. Επίσης, χρειάζεται λιγότερο υλικό μόνιμων μαγνητών από την τοπολογία «Torus» και άρα παρουσιάζει μικρότερο κόστος προς ροπή. Έτσι, καταλήγει πως η συγκεκριμένη τοπολογία είναι από τις πλέον κατάλληλες για εφαρμογές ανεμογεννητριών χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων.

Σημειώνουμε πως οι δύο παραπάνω έρευνες έδωσαν ιδιαίτερη έμφαση στο κριτήριο του ελάχιστου κόστους. Άλλες παράμετροι, όπως η απόδοση, η ροπή ευθυγράμμισης, οι επιδόσεις σε χαμηλούς ανέμους, καθώς και ζητήματα που αφορούν ειδικά τις μικρές ανεμογεννήτριες δεν λήφθηκαν υπόψη. Επιπλέον, το κόστος είναι μία παράμετρος που μεταβάλλεται με το χρόνο και ειδικότερα για τους μόνιμους μαγνήτες περαιτέρω ελάττωση του κόστους στο μέλλον είναι πιθανή.

Στο [12] εξετάζονται ανεμογεννήτριες μικρής κλίμακας. Σύμφωνα με αυτή την έρευνα σε ιδιαίτερα μικρές ανεμογεννήτριες το κόστος των πρώτων υλών αντισταθμίζεται με το κόστος της εργασίας. Η κατασκευή του τυλίγματος του στάτη είναι η πιο χρονοβόρος και ακριβή φάση της παραγωγικής διαδικασίας κάνοντας τη χρήση σχετικά ακριβών υλικών επιτρεπτή. Επίσης, για τη διευκόλυνση εγκαταστάσεων σε απομονωμένες περιοχές ζητούμενο είναι η γεννήτρια να είναι αρκετά ελαφριά ώστε να μπορεί να μετακινηθεί εύκολα.

Στη συνέχεια στην ίδια ερευνητική εργασία κατασκευάζονται μία γεννήτρια ακτινικής ροής και μία γεννήτρια αξονικής ροής με διπλό στάτη, μονό δρομέα στο εσωτερικό, με πυρήνα στο στάτη χωρίς αυλακώσεις (παράγραφος 3.3.3). Προσομοιώνεται η λειτουργία τους στο εργαστήριο και υπολογίζεται η σχέση της απόδοσης της κάθε γεννήτριας με την ταχύτητα του ανέμου (Σχήμα 3.10). Από τις μετρήσεις προκύπτει πως η γεννήτρια αξονικής ροής έχει καλύτερη απόδοση σε χαμηλότερους ανέμους, ενώ η ακτινικής ροής σε υψηλότερους ανέμους. Οι ανεμογεννήτριες και ειδικότερα οι μικρές ανεμογεννήτριες κατά τη μεγαλύτερη διάρκεια της λειτουργίας τους βρίσκονται σε χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου από την ονομαστική τους, όπου η γεννήτρια αξονικής ροής έχει καλύτερη απόδοση. Παράλληλα, η συγκεκριμένη γεννήτρια αξονικής ροής έχει πολύ απλή και στιβαρή κατασκευή, οι ηλεκτροθερμικές ιδιότητες της είναι άριστες και μπορεί να είναι οικονομικά βιώσιμη.



Σχήμα 3.10: Μετρούμενη απόδοση σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου για γεννήτρια ακτινικής ροής (α) και αξονικής ροής με διπλό στάτη-μονό δρομέα στο εσωτερικό (β).

Συμπερασματικά, αναφέρουμε πως οι συγκρίσεις σχετίζονται άμεσα με τα κριτήρια και τις προτεραιότητες που θέτει ο μελετητής και δεν είναι δυνατόν να υπάρξουν μονοσήμαντες απαντήσεις. Στην επόμενη παράγραφο τίθενται τα κριτήρια και οι απαιτήσεις της παρούσης εργασίας.

3.4: Η επιλεγμένη τοπολογία: Ανεμογεννήτρια αξονικής ροής χωρίς σίδηρο στον πυρήνα

Αντικείμενο της παρούσης εργασίας είναι η μελέτη και η κατασκευή μιας μικρής ανεμογεννήτριας. Η γεννήτρια πρέπει να είναι κατάλληλη για διασυνδεδεμένες και αυτόνομες εφαρμογές. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στην απλότητα της κατασκευής ώστε να είναι δυνατή η κατασκευή της σε μία απλή βιοτεχνία ή εργαστήριο χωρίς απαιτήσεις προσωπικού υψηλής εξειδίκευσης. Η υψηλή απόδοση είναι μία σημαντική παράμετρος ώστε να έχουμε βέλτιστη αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού της περιοχής. Σημασία δίνεται επίσης στην εκμετάλλευση χαμηλών ανέμων, δεδομένου πως σε πολλές περιοχές όπου δεν υπάρχει σύνδεση με το δίκτυο οι ταχύτητες του ανέμου δεν είναι ιδιαίτερα υψηλές όπως ισχύει και για περιοχές όπου υπάρχει ικανό αιολικό δυναμικό για τη σύνδεση στο δίκτυο. Τέλος, το χαμηλό κόστος είναι ζητούμενο ώστε να είναι οικονομικά προσβάσιμη.

Εφόσον, η ανεμογεννήτρια θα πρέπει να είναι κατάλληλη για σύνδεση στο δίκτυο αλλά και για αυτόνομες εφαρμογές η πλέον κατάλληλη γεννήτρια θεωρήθηκε η αυτοδιεγείρομενη σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών. Η ύπαρξη κιβώτιου ταχυτήτων θα μείωνε την απόδοση και την αξιοπιστία του συστήματος και παράλληλα θα αύξανε τις απαιτήσεις για συντήρηση και το κόστος. Έτσι, επιλέγεται να κατασκευαστεί μία πολυπολική γεννήτρια. Γεννήτριες μονίμων μαγνητών αξονικής ροής ενδείκνυνται για πολυπολικές εφαρμογές, εφόσον αυξάνοντας απλά τη διάμετρο της μηχανής αυξάνεται ο αριθμός των πόλων που μπορούν να τοποθετηθούν.

Όσον αφορά το ζήτημα της εκμετάλλευσης χαμηλών ανέμων επιδιώκεται η ελάχιστη δυνατή ροπή ευθυγράμμισης ώστε η έλικα να μην εμποδίζεται να εκκινήσει σε χαμηλούς ανέμους. Η τοπολογία αξονικής ροής με διπλό δρομέα-μονό στάτη χωρίς σίδηρο στον πυρήνα (παράγραφος 3.3.4) έχει μηδενική ροπή ευθυγράμμισης.

Όσον αφορά την απόδοση, οι τοπολογίες που δεν διαθέτουν πυρήνα στον στάτη έχουν την υψηλότερη απόδοση εφόσον δεν παρουσιάζουν απώλειες πυρήνα.

Η απλότητα της κατασκευής είναι μία από τις απαιτήσεις της εργασίας. Γενικά οι γεννήτριες αξονικής ροής είναι απλούστερο να κατασκευαστούν από ότι οι ακτινικής ροής. Οι τοπολογίες με αυλακώσεις είναι πιο δύσκολες κατασκευαστικά και έχουν τα μειονεκτήματα της ροής ευθυγράμμισης και των απωλειών πυρήνα. Την απλούστερη κατασκευή παρουσιάζει η τοπολογία αξονικής ροής με διπλό δρομέα-μονό στάτη χωρίς σίδηρο στον πυρήνα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω η γεννήτρια με διπλό δρομέα-μονό στάτη χωρίς σίδηρο στον πυρήνα ικανοποιεί καλύτερα τις απαιτήσεις της εργασίας. Το βασικό μειονέκτημα της είναι το σχετικά υψηλότερο κόστος εξαιτίας του περισσότερου υλικού μονίμων μαγνητών που απαιτείται. Σύμφωνα, όμως με το [12] σε μικρές ανεμογεννήτριες το κόστος των πρώτων υλών μπορεί να αντισταθμιστεί με το κόστος της εργασίας. Έτσι, αυτή θεωρείται η καταλληλότερη τοπολογία.

Μία γεννήτρια αυτής της τοπολογίας είναι η γεννήτρια που έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί από τον Hugh Piggott [17]. Το μέγεθος της πλεονέκτημα έγκειται στη δυνατότητα κατασκευής της από τις πρώτες ύλες, χωρίς εξειδικευμένα εργαλεία και χωρίς ιδιαίτερη προηγούμενη κατασκευαστική εμπειρία. Μία παρουσίαση του τρόπου κατασκευής βρίσκεται στην παράγραφο 4.1.

3.5: Θεωρητική ανάλυση γεννητριών αξονικής ροής

Σε αυτή τη παράγραφο θα γίνει μία συνοπτική παρουσίαση των βασικών σχέσεων που διέπουν τις γεννήτριες αξονικής ροής μόνιμων μαγνητών που είναι απαραίτητες για τη σχεδίαση της γεννήτριας, για την εύρεση των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος της και την πρόβλεψη των επιδόσεων της.

3.5.1: Σχέσεις υπολογισμού της μαγνητικής ροής και ηλεκτρομαγνητικής ροπής για γεννήτριες αξονικής ροής

Θεωρούμε μία μηχανή με τραπεζοειδή τυλίγματα και τραπεζοειδής μαγνήτες. Το πολικό βήμα τ και το πλάτος του πόλου w_p δεν είναι σταθερά, αλλά είναι συναρτήσεις της ακτίνας r .

$$\tau(r) = \frac{2\pi \cdot r}{p} \quad (3.1)$$

$$a_i = \frac{w_p(r)}{\tau(r)} = \frac{B_{avg}}{Bmg} \quad (3.2)$$

όπου p είναι ο αριθμός των πόλων της μηχανής, a_i ο λόγος του πλάτους του μαγνήτη προς το πολικό βήμα, Bmg η μέγιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο, B_{avg} η μέση τιμή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο. Η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο έχει ημιτονοειδή μορφή αν $a_i = \frac{2}{\pi}$

Η στοιχειώδης επιφάνεια ισούται με $dS = 2\pi r dr$, όπου dr είναι η στοιχειώδης ακτίνα. Έτσι, η στοιχειώδης επιφάνεια ανά πόλο ισούται με $2\pi r dr/p$

Η μαγνητική ροή που δημιουργείται από τους μόνιμους μαγνήτες ανά πόλο μπορεί να υπολογιστεί από το παρακάτω ολοκλήρωμα:

$$\Phi_f = \int_{r_{in}}^{r_{out}} a_i Bmg \frac{2\pi}{p} r dr = a_i Bmg \frac{\pi}{p} (r_{out}^2 - r_{in}^2) \quad (3.3)$$

Η ΗΕΔ μπορεί να υπολογιστεί παραγωγίζοντας την θεμελιώδη συνιστώσα της κυματομορφής της μαγνητικής ροής:

$$\Phi f_1 = \Phi f \sin \omega t \Rightarrow$$

$$ef = N_\phi kw \frac{d\Phi f_1}{dt} = 2\pi \cdot f N_\phi kw \Phi f \cos \omega t$$

και η ενεργός τιμή της ΗΕΔ προκύπτει:

$$Ef = \pi \sqrt{2} f N_\phi kw \Phi f = \pi \frac{\sqrt{2}}{2} p N_\phi kw \Phi f n_s \quad (3.4)$$

όπου n_s η ταχύτητα περιστροφής σε στροφές ανά δευτερόλεπτο και kw ο συντελεστής τυλίγματος.

Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση (line current density) είναι συνάρτηση της ακτίνας:

$$A(r) = \frac{m_1 2 N_\phi I_a}{p \tau(r)} = \frac{m_1 N_\phi I_a}{\pi \cdot r} \quad (3.5)$$

όπου m_1 είναι ο αριθμός των φάσεων, N_ϕ είναι τα ελίγματα ανά φάση και I_a είναι η ενεργός τιμή του ρεύματος της κάθε φάσης.

Η εφαπτομενική δύναμη που ασκείται σε έναν δίσκο μπορεί να υπολογιστεί με την σχέση του Ampere:

$$d\vec{F}_x = I_a (d\vec{r} \times \vec{B}_g) = A(r) (d\vec{S} \times \vec{B}_g)$$

$$\text{εφόσον: } I_a d\vec{r} = A(r) d\vec{S}$$

όπου $d\vec{r}$ η στοιχειώδης ακτίνα και $\vec{B}_g$ είναι το διάνυσμα της κανονικής συνιστώσας (κάθετης στην επιφάνεια του δίσκου) της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο.

Η ηλεκτρομαγνητική δύναμη στον δρομέα μπορεί να υπολογιστεί από το γινόμενο της μαγνητικής και ηλεκτρικής φόρτισης $B_{avg} A$ και της ενεργούς επιφάνειας των μαγνητών $S = \pi (r_{out}^2 - r_{in}^2)$. A είναι η ειδική ηλεκτρική φόρτιση στην εσωτερική ακτίνα r_{in} :

$$A = \frac{m_1 N_\phi I_a}{\pi \cdot r_{in}}$$

Έτσι, η μέση ηλεκτρομαγνητική ροπή σύμφωνα με το [4] ισούται με:

$$T_d = F_x r_{in} = 2\pi B_{avg} A (r_{out}^2 - r_{in}^2) r_{in} = 2\pi B_{avg} A r_{out}^3 (kd - kd^3) \quad (3.6)$$

$$\text{Όπου } kd = \frac{r_{in}}{r_{out}}$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει πως η ηλεκτρομαγνητική ροπή στις μηχανές αξονικής ροής είναι ανάλογη με την εξωτερική ακτίνα στον κύβο, άρα και με την εξωτερική διάμετρο στον κύβο.

Παραγωγίζοντας την ίδια σχέση ως προς kd και εξισώνοντας την με το μηδέν προκύπτει πως η μέγιστη ροπή αναπτύσσεται για $kd = \frac{1}{\sqrt{3}}$.

Πραγματικές εφαρμογές δείχνουν όμως πως δεν είναι απαραίτητα αυτή η τιμή στην οποία η ροπή μεγιστοποιείται [4].

Σημειώνουμε πως οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν και για κινητήρες αξονικής ροής.

3.5.2: Βασικές σχέσεις και χαρακτηριστικά γεννητριών διπλού δρομέα-μονού στάτη χωρίς πυρήνα σιδήρου στον στάτη

Η προηγούμενη ανάλυση δεν εστίαζε σε ένα συγκεκριμένο τύπο μηχανών αξονικής ροής. Όπως εξηγήσαμε στη συγκεκριμένη εργασία θα μελετηθεί και θα κατασκευαστεί μια γεννήτρια αξονικής ροής με διπλό δρομέα-μονό στάτη χωρίς πυρήνα στον στάτη.

Αντικαθιστούμε στην εξίσωση (3.4) την μαγνητική ροή που βρίσκουμε στο (3.3) και έχουμε:

$$E_f = \frac{\sqrt{2}}{p} N_\phi \omega_e B_p k_w (r_{out}^2 - r_{in}^2) \quad (3.7)$$

Όπου ω_e η κυκλική συχνότητα και B_p η μέγιστη τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο.

Η μέση ακτίνα του τυλίγματος ισούται με:

$$R_{avg} = \frac{r_{in} + r_{out}}{2}$$

το ενεργό μήκος του τυλίγματος:

$$l_a = r_{out} - r_{in}$$

Στο Σχήμα 3.11 φαίνεται ο ένας δίσκος του δρομέα με μαγνήτες τραπεζοειδούς σχήματος στο οποίο παριστάνονται οι διαστάσεις r_{in} και r_{out} .

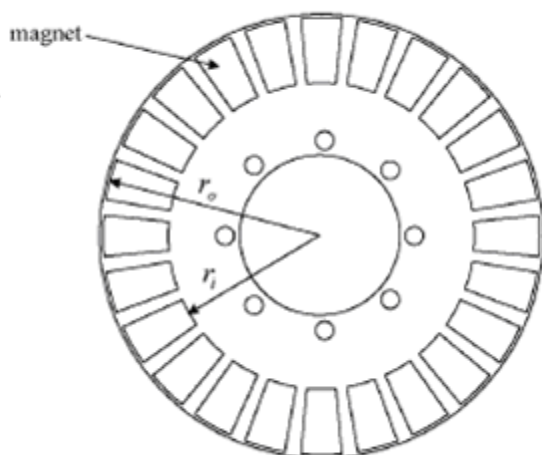
Ο αριθμός των ελιγμάτων ανά φάση:

$$N_\phi = N_c q$$

όπου N_c είναι ο αριθμός των ελιγμάτων κάθε πηνίου και q είναι ο αριθμός των πηνίων ανά φάση.

Έτσι, η σχέση (3.7) σύμφωνα με το [18] γράφεται ως

$$E_f = \frac{2\sqrt{2}}{p} q N_c \omega_e B_p k_w R_{avg} l_a \quad (3.8)$$



Σχήμα 3.11: Δίσκος του δρομέα γεννήτριας αξονικής ροής με μαγνήτες τραπεζοειδούς σχήματος.

3.5.2.1: Μορφή του τυλίγματος του στάτη και αριθμός των πόλων και των πηνίων

Το τύλιγμα του στάτη δεν έχει πυρήνα σιδήρου και είναι τοποθετημένο σε μία πλάκα από ρητίνη η οποία είναι διαμαγνητικό υλικό. Μπορούμε να θεωρήσουμε την κάθε πλευρά πηνίου ως έναν ιδεατό αύλακα γεννήτριας με πυρήνα σιδήρου.

Το τύλιγμα μπορεί να έχει τις εξής μορφές:

-επικαλυπτόμενο τύλιγμα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.12α το τριφασικό τύλιγμα είναι διανεμημένο σε ιδεατούς αύλακες. Τα πηνία είναι τοποθετημένα στο ίδιο επίπεδο και επικαλύπτουν το ένα το άλλο. Στην περίπτωση που το τύλιγμα έχει έναν ιδεατό αύλακα ανά πόλο, ανά φάση ο συντελεστής τυλίγματος k_w ισούται με τη μονάδα.

-συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα διπλής στρώσης. Το τύλιγμα αποτελείται από ανεξάρτητα μη επικαλυπτόμενα πηνία (Σχήμα 3.12β). Σε κάθε ιδεατό αύλακα είναι τοποθετημένες πλευρές πηνίων από δύο ανεξάρτητα πηνία. Τα πηνία εφάπτονται μεταξύ τους σε όλο το μήκος επαφής τους.

-συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα μονής στρώσης. Το τύλιγμα αποτελείται από ανεξάρτητα μη επικαλυπτόμενα πηνία (Σχήμα 3.12γ). Σε κάθε ιδεατό αύλακα είναι τοποθετημένη μόνο μία πλευρά πηνίου. Τα πηνία βρίσκονται σε επαφή μόνο στην εσωτερική ακτίνα r_{in} .

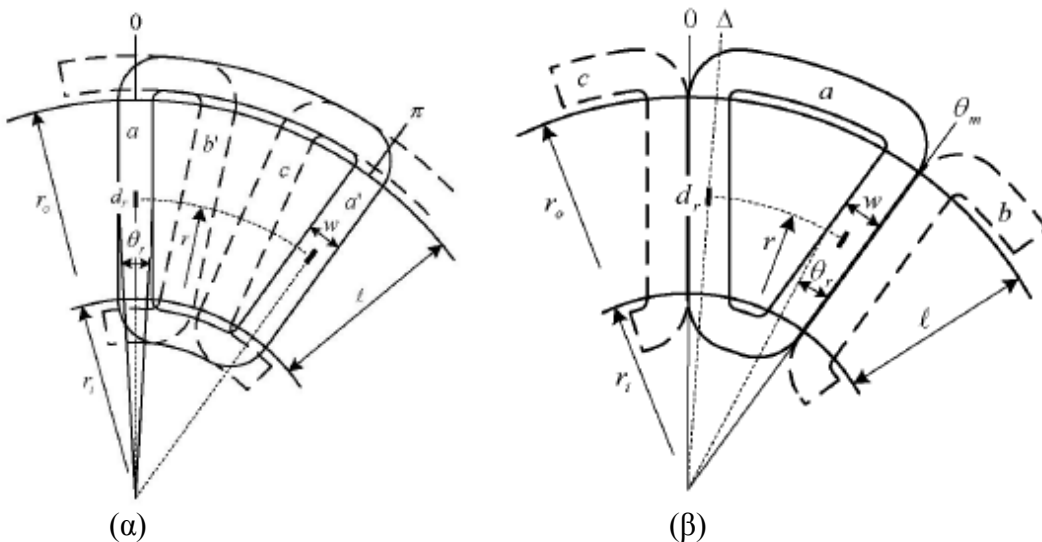
-συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα χωρισμένο σε ομάδες φάσης. Πηνία της ίδιας φάσης τοποθετούνται σε διπλανές θέσεις και σχηματίζουν μία ομάδα φάσης. z είναι ο αριθμός των πηνίων που ανήκουν στην ίδια ομάδα φάσης (Σχήμα 3.12δ).

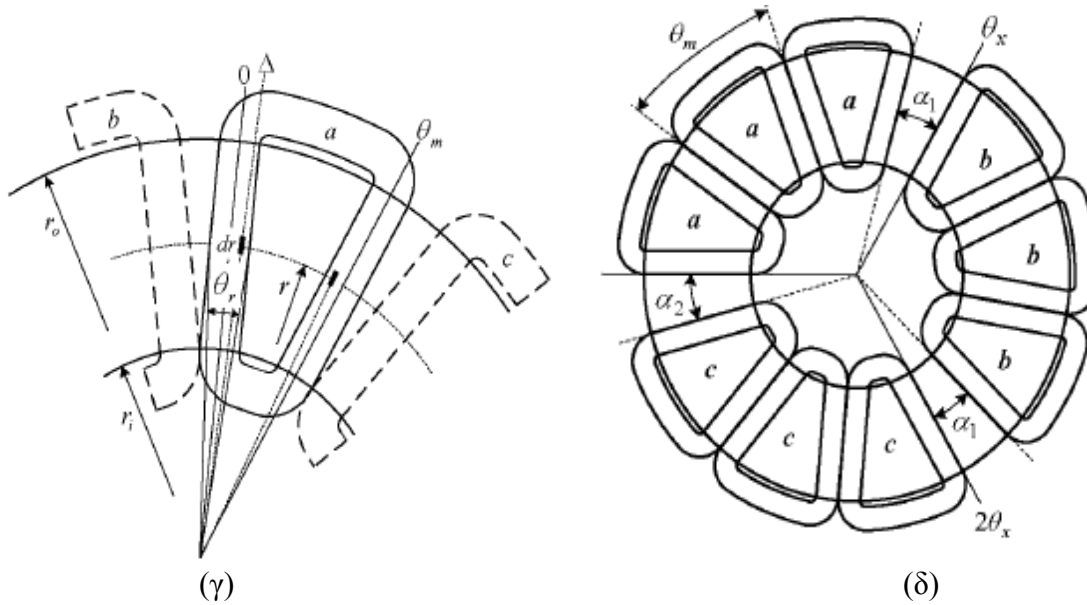
Τα συγκεντρωμένα τυλίγματα παρουσιάζουν κάποια πλεονεκτήματα σε σχέση με τα επικαλυπτόμενα που συνοψίζονται στα εξής [4]:

- ευκολότερη κατασκευή του στάτη.
- μικρότερη εξωτερική διάμετρος της μηχανής χάρη στο μικρότερο μήκος άκρων τυλίγματος.
- λιγότερες απώλειες τυλίγματος χάρη στο μικρότερο μήκος άκρων τυλίγματος.
- μικρότερο κόστος του τυλίγματος του στάτη χάρη στον μικρότερο αριθμό πηνίων και στην απλή δομή του τυλίγματος.

Ένα μειονέκτημα γενικά των συγκεντρωμένων τυλιγμάτων είναι η ανάπτυξη χαμηλότερης ηλεκτρομαγνητικής ροπής εξαιτίας του χαμηλότερου συντελεστή τυλίγματος. Πρόσφατες έρευνες όμως δείχνουν πως συγκεντρωμένα τυλίγματα με μεγάλο αριθμό πόλων μπορούν να έχουν υψηλό συντελεστή τυλίγματος οπότε και καλή ανάπτυξη ροπής [18].

Η σύγκριση των τριών τύπων συγκεντρωμένου τυλίγματος οδηγεί στο συμπέρασμα πως το συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσης αναπτύσσει μεγαλύτερη ροπή από τους δύο άλλους τύπους συγκεντρωμένου τυλίγματος και είναι συγκρίσιμη με την ροπή που αναπτύσσει ένα επικαλυπτόμενο τύλιγμα. Το συγκεντρωμένο τύλιγμα μονής στρώσης οδηγεί σε χαμηλότερη πεπλεγμένη ροή, αλλά έχει το πλεονέκτημα των μικρότερων άκρων τυλίγματος σε σχέση με το συγκεντρωμένο διπλής στρώσης. Η επίδοση των συγκεντρωμένων τυλιγμάτων σε σχέση με των επικαλυπτόμενων βελτιώνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των πόλων. Επίσης, όσο αυξάνεται ο αριθμός των πόλων μειώνεται η μάζα του χαλκού που απαιτείται για το τύλιγμα [18].





Σχήμα 3.12: Διαφορετικές μορφές του τυλίγματος του στάτη: (α) επικαλυπτόμενο τυλίγμα, (β) μη επικαλυπτόμενο διπλής στρώσης, (γ) μη επικαλυπτόμενο μονής στρώσης, (δ) μη επικαλυπτόμενο χωρισμένο σε ομάδες φάσης.

Επιλέγουμε να μελετήσουμε το συγκεντρωμένο τυλίγμα διπλής στρώσης χάρη στα πλεονεκτήματα που συγκεντρώνει. Παρόμοιες σχέσεις διέπουν και τις άλλες μορφές τυλίγματος οι οποίες αναλύονται στο [18].

Για συγκεντρωμένο τυλίγμα διπλής στρώσης το βήμα πηνίου σε ηλεκτρικά ακτίνια (rad) ισούται με:

$$\theta_m = \frac{2\pi}{Q} \frac{p}{2} = \frac{\pi \cdot p}{Q}$$

όπου Q ο συνολικός αριθμός των πηνίων στον στάτη

Ο συντελεστής τυλίγματος δίνεται από τη σχέση $K_w = k_p k_d$

όπου k_d ο συντελεστής πλάτους:

$$k_d = \frac{\sin(0.5z[\theta_m - \pi])}{z \sin(0.5z[\theta_m - \pi])} \quad (3.9)$$

z είναι ο αριθμός των πηνίων που ανήκουν στην ίδια ομάδα φάσης.

Στη περίπτωση μας $z=1$ οπότε και $k_d=1$

Ο συντελεστής βήματος k_p δίνεται από τη σχέση :

$$k_p = \frac{2 \sin([\theta_m - \theta_{re}]/2) \sin(\theta_{re}/2)}{\theta_{re}} \quad (3.10)$$

$$\text{όπου } \theta_{re} = \left(\frac{R_{in} - l_g}{R_{avg}} \right) \frac{\pi}{3} \quad (3.11)$$

είναι η ηλεκτρική γωνία που αντιστοιχεί στο πάχος μίας πλευράς πηνίου (w) σε ακτίνα r (Σχήμα 3.12β). l_g είναι η απόσταση μεταξύ δύο μόνιμων μαγνητών που βρίσκονται αντικριστά στους απέναντι δίσκους.

Ένα ζήτημα ιδιαίτερης σημασίας για τα συγκεντρωμένα τυλίγματα είναι η αριθμητική σχέση μεταξύ μαγνητικών πόλων και πηνίων. Για να προκύψει ένα τριφασικό σύστημα τάσεων και ρευμάτων ο αριθμός των πόλων και των πηνίων δεν πρέπει να είναι ο ίδιος. Ο αριθμός των πόλων είναι πάντα ζυγός. Ο αριθμός των πηνίων για συμμετρικό τριφασικό σύστημα πρέπει να είναι πολλαπλάσιος του τρία.

Μετά από μελέτες προκύπτει πως για συγκεντρωμένο τύλιγμα με ένα πηνίο ανά ομάδα φάσης ($z=1$) η μέγιστη ηλεκτρομαγνητική ροπή αναπτύσσεται για βήμα πηνίου [18]:

$$\theta_m = \frac{\pi \cdot p}{Q} = \frac{4\pi}{3} = 240^\circ \text{ (ηλεκτρική γωνία)}$$

Σε αυτή τη περίπτωση ο αριθμός των πλευρών πηνίων ανά πόλο ανά φάση:

$$\frac{2Q}{p \cdot 3} \text{ είναι κλασματικός και ισούται με } 0,5 \text{ [19].}$$

Έτσι, είναι φανερό πως οι βέλτιστοι συνδυασμοί πόλων-πηνίων είναι 8-6, 12-9, 16-12, 20-15, 24-18, 28-21...

όπου παρατηρούμε πως ο αριθμός των πόλων πρέπει να είναι πολλαπλάσιος του τέσσερα.

Σημειώνουμε πως στην τοπολογία διπλού δρομέα-μονού στάτη χωρίς πυρήνα στον στάτη ο αριθμός των πόλων που ισούται με τον αριθμό των βρόχων της μαγνητικής ροής είναι ίσος με τον αριθμό των μαγνητών στον ένα μόνο δίσκο του δρομέα. Οπότε, ο συνολικός αριθμός των μόνιμων μαγνητών είναι διπλάσιος από τον αριθμό των πόλων.

3.5.2.2 : Μορφή της κυματομορφής της πεπλεγμένης ροής

Η απουσία πυρήνα σιδήρου στον στάτη οδηγεί σε πιο ημιτονοειδή μορφή της πεπλεγμένης ροής στο τύλιγμα. Αρμονικές της πεπλεγμένης ροής εξαιτίας αυλακών και μαγνητικού κορεσμού δεν υπάρχουν εφόσον συνήθως δεν υπάρχει κορεσμός στους χαλύβδινους δίσκους του δρομέα. Χάρη στο μεγάλο διάκενο οι χωρικές αρμονικές της μαγνητεγερτικής δύναμης μπορούν να αγνοηθούν στις περισσότερες περιπτώσεις. Οι αρμονικές που οφείλονται στο επίπεδο σχήμα των μόνιμων μαγνητών πρέπει να ληφθούν υπόψη.

Με βάση τα παραπάνω, η πεπλεγμένη ροή μιας μηχανής αξονικής ροής χωρίς πυρήνα είναι σχεδόν ημιτονοειδής, ενώ για συγκεντρωμένα τυλίγματα υπάρχει συχνά αξιοσημείωτη 3^η αρμονική και λιγότερο σημαντικές 5^η και 7^η [4].

Δεδομένου πως η κυματομορφή της πεπλεγμένη ροής είναι σχεδόν ημιτονοειδής προκύπτει πως και η κυματομορφή της τάσης θα είναι και αυτή σχεδόν ημιτονοειδής.

3.5.2.3: Αντίσταση, αυτεπαγωγή και μάζα χαλκού του τυλίγματος του στάτη

Για να υπολογίσουμε την ωμική αντίσταση και την αυτεπαγωγή του συγκεντρωμένου τυλίγματος του στάτη πρέπει πρώτα να υπολογίσουμε το μέσο μήκος ελίσματος των πηνίων.

Το μέσο μήκος ελίσματος ενός πηνίου ισούται με [4]:

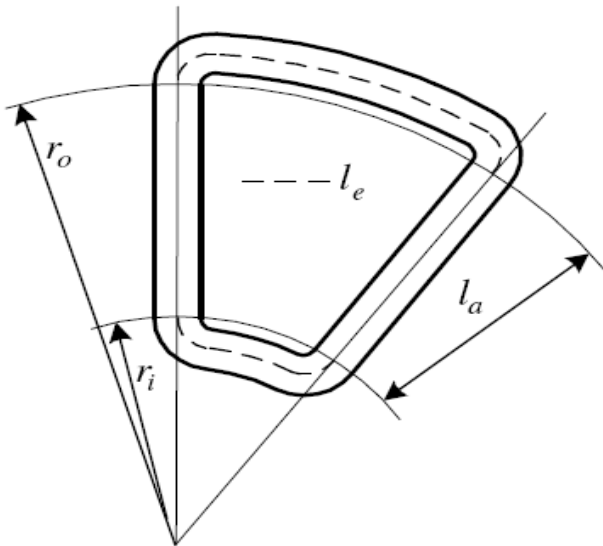
$$l_{avg} = 2l_a + l_{ec} \quad (3.12)$$

όπου $l_a = r_{out} - r_{in}$ το ενεργό μήκος του τυλίγματος και l_{ec} το μήκος άκρων τυλίγματος.

Το μήκος άκρων τυλίγματος l_{ec} φαίνεται στο Σχήμα 3.13 ως διακεκομμένη γραμμή. Ζητούμενο είναι το μήκος άκρων τυλίγματος να είναι το ελάχιστο δυνατόν, εφόσον δεν συνεισφέρει στην πεπλεγμένη ροή και προκαλεί ωμικές απώλειες.

Για τραπεζοειδή πηνία συγκεντρωμένου τυλίγματος διπλής στρώσης το μήκος άκρων τυλίγματος υπολογίζεται [18]:

$$l_{ec} = 2(r_{out} + r_{in}) \frac{\theta_m - 0.6\theta_r}{p} \quad (3.13)$$



Σχήμα 3.13: Το ενεργό μήκος τυλίγματος l_a και το μήκος ακρών τυλίγματος l_e ενός πηνίου.

Από τα παραπάνω αγνοώντας το επιδερμικό φαινόμενο η ωμική αντίσταση μίας φάσης προκύπτει:

$$R_c = \rho_t \frac{N_\phi \text{avg}}{s_c} = \rho_t \frac{N_\phi (2la + lec)}{s_c} \quad (3.14)$$

Όπου s_c η διατομή του καλωδίου χαλκού, ρ_t η ειδική αντίσταση του χαλκού στη θερμοκρασία λειτουργίας και N_ϕ ο αριθμός των ελιγμάτων ανά φάση.

Ως γνωστόν η ειδική αντίσταση του χαλκού αυξάνεται με τη θερμοκρασία [20]:

$$\rho_t = \rho_{20} (1 + 0.0039(tc - 20))$$

όπου tc είναι η θερμοκρασία λειτουργίας ($^{\circ}\text{C}$) και ρ_{20} η ειδική αντίσταση του χαλκού στους 20°C

Η σύγχρονη αυτεπαγωγή του τυλίγματος είναι ίση με το άθροισμα της αυτεπαγωγής μαγνήτισης και της αυτεπαγωγής σκέδασης. Η απουσία πυρήνα οδηγεί σε πολύ μικρές τιμές της σύγχρονης αυτεπαγωγής κάνοντας δύσκολο τον ακριβή υπολογισμό της αυτεπαγωγής μαγνήτισης και σκέδασης. Για συγκεντρωμένα τυλίγματα η σύγχρονη αυτεπαγωγή μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση που ισχύει για σωληνοειδή χωρίς πυρήνα. Η σχέση που προκύπτει για την αυτεπαγωγή κάθε φάσης για συγκεντρωμένο τυλίγμα είναι [20]:

$$L_s = \frac{q \cdot \text{avg}^2 N_c^2}{tw} 10^{-7} \text{ Kn} \quad (3.15)$$

όπου:

tw το αξονικό πάχος του τυλίγματος και q ο αριθμός των πηνίων ανά φάση.

Κατά τη λειτουργία της γεννήτριας τα πηνία μαγνητίζονται, που σημαίνει πως το μαγνητικό πεδίο δεν είναι πλέον ομοιόμορφο στο τυλίγμα, για αυτό απαιτείται ένας διορθωτικός συντελεστής που ονομάζεται σταθερά Nagaoka [20]:

$$Kn = \frac{1}{1 + 0.9 \frac{\text{avg}}{2\pi \cdot tw} + 0.32 \frac{2\pi \cdot w}{\text{avg}} + 0.84 \frac{w}{tw}} \quad (3.16)$$

όπου w είναι το πάχος της πλευράς πηνίου.

Η σύγχρονη αντίδραση προκύπτει: $X_s = \omega L_s$

όπου ω είναι η κυκλική συχνότητα του στάτη. Στο [4] παρατίθεται μία διαφορετική μέθοδος υπολογισμού ξεχωριστά της αυτεπαγωγής μαγνήτισης και της αυτεπαγωγής σκέδασης η οποία οδηγεί σε κοντινά αποτελέσματα.

Όσον αφορά τη μάζα του χαλκού που είναι τοποθετημένη στο τύλιγμα υπολογίζεται από την πυκνότητα του χαλκού ρ_{cu} :

$$m_{cu} = 3N_{\phi} l_{avg} s_c \rho_{cu} \quad (3.17)$$

3.5.2.4: Απώλειες δινορευμάτων στο τύλιγμα του στάτη

Οι απώλειες χαλκού του τυλίγματος μιας ηλεκτρικής μηχανής χωρίζονται στις ωμικές απώλειες και στις απώλειες δινορευμάτων. Οι απώλειες δινορευμάτων δημιουργούνται από το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο που διέρχεται από τους αγωγούς του τυλίγματος. Σε μηχανές αξονικής ροής με αύλακες στον στάτη οι απώλειες δινορευμάτων του τυλίγματος γενικά αγνοούνται γιατί το μεγαλύτερο μέρος της μαγνητικής ροής περνά από τους αύλακες και τους δίσκους του δρομέα [4]. Από την άλλη, σε μηχανές χωρίς αύλακες σημαντικό μέρος της μαγνητικής ροής διέρχεται από το τύλιγμα. Αν αυξηθεί η συχνότητα του στάτη τα δινορεύματα μπορούν να οδηγήσουν σε αξιοσημείωτες απώλειες. Αυτές οι απώλειες θα οδηγήσουν σε αύξηση της θερμοκρασίας του τυλίγματος και σε μείωση της απόδοσης της μηχανής.

Σε αρκετές περιπτώσεις μπορούμε να αγνοήσουμε τις απώλειες δινορευμάτων στο τύλιγμα και σε μηχανές χωρίς αύλακες. Όμως, αν μία μηχανή λειτουργεί σε σχετικά υψηλές συχνότητες, δηλαδή αν στρέφεται με υψηλή ταχύτητα ή έχει μεγάλο αριθμό πόλων οι απώλειες δινορευμάτων πρέπει να ληφθούν υπόψη και προκύπτουν από τη σχέση [20]:

$$\Delta P_{eddy} = \frac{\pi \cdot l_a s_c^4 B_p^2 \omega_e^2 Q N_c N_p}{32 \rho} \quad (3.18)$$

Όπου l_a το ενεργό μήκος του τυλίγματος, s_c η διάμετρος του αγωγού, B_p η μέγιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο, ω_e η κυκλική συχνότητα, Q ο συνολικός αριθμός των πηνίων, N_c τα ελίσματα ανά πηνίο, N_p ο αριθμός των παράλληλων κλώνων ανά αγωγό και ρ η ειδική αντίσταση του χαλκού.

Οι απώλειες δινορευμάτων στο στάτη μπορούν να παρασταθούν στο ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας με μία αντίσταση που συνδέεται παράλληλα με την ΗΕΔ.

$$R_{eddy} = \frac{3 E_{gen}^2}{\Delta P_{eddy}} \quad (3.19)$$

3.5.2.5: Απώλειες περιστροφής

Οι απώλειες περιστροφής είναι ανάλογες με την ταχύτητα περιστροφής. Μπορούν να χωριστούν στις απώλειες τριβών στα ρουλεμάν και στις απώλειες ανεμισμού.

Οι απώλειες τριβών δίνονται από την εμπειρική σχέση [4]:

$$\Delta P_{fr} = 0.06k_{fb}(m_r + m_{sh})n \quad (3.20)$$

όπου ο συντελεστής k_{fb} εκφράζει τη λειτουργία του ρουλεμάν και παίρνει τιμές από 1 μέχρι $3 \text{ m}^2/\text{s}^2$, m_r είναι η μάζα του δρομέα σε kg, m_{sh} η μάζα του άξονα σε kg και n η ταχύτητα περιστροφής σε στροφές ανά δευτερόλεπτο.

Οι απώλειες ανεμισμού υπολογίζονται στο [4], αλλά είναι αμελητέες για τις εφαρμογές που απασχολούν αυτή την εργασία, οπότε οι απώλειες περιστροφής θεωρούνται ίσες με τις απώλειες τριβών.

3.5.2.6: Ισοδύναμο κύκλωμα και απόδοση της γεννήτριας

Με βάση τα παραπάνω προκύπτει το ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας αξονικής ροής χωρίς πυρήνα στον στάτη που φαίνεται στο Σχήμα 3.14.

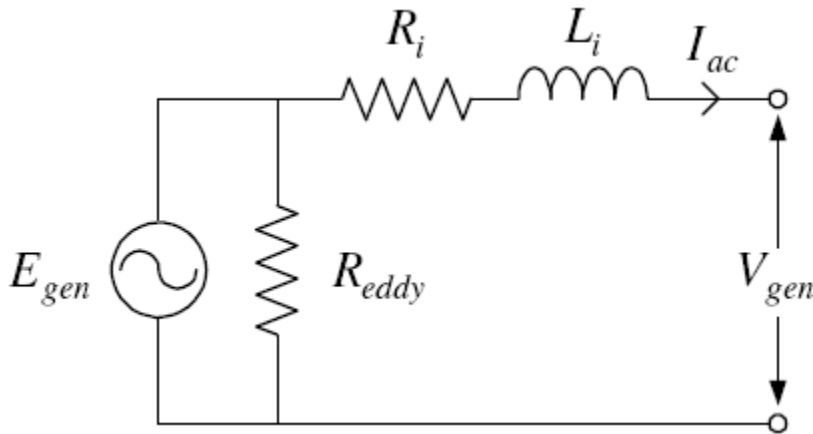
E_{gen} είναι η ΗΕΔ που επάγεται στο τυλίγμα και ισούται με την τάση ανοιχτοκύκλωσης της γεννήτριας. Η R_{eddy} αντιστοιχεί στις απώλειες δινορευμάτων και υπολογίζεται από τη σχέση (3.19).

R_i είναι η ωμική αντίσταση ανά φάση του τυλίγματος

L_i η σύγχρονη αυτεπαγωγή ανά φάση του τυλίγματος

I_{ac} είναι η ενεργός τιμή του ρεύματος γραμμής

V_{gen} είναι η τερματική τάση της γεννήτριας



Σχήμα 3.14: Ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας αξονικής ροής χωρίς πυρήνα στον στάτη.

Οι ωμικές απώλειες χαλκού ανά φάση υπολογίζονται:

$$\Delta P_{ohm} = 3I_{ac}^2 R_i$$

Όπως έχουμε εξηγήσει απώλειες πυρήνα δεν υπάρχουν. Επίσης, οι απώλειες στους μόνιμους μαγνήτες είναι αμελητέες εφόσον δεν υπάρχουν αύλακες στον στάτη [4].

Έτσι, η ηλεκτρομαγνητική ισχύς ισούται με:

$$P_{H/M} = P_{electric} + \Delta P_{eddy} + \Delta P_{ohm}$$

όπου $P_{electric}$ η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς:

$$P_{electric} = 3V_{gen} I_{ac} \cos\phi$$

$\cos\phi$ είναι ο συντελεστής ισχύος

$$\text{και } P_{H/M} = T_{H/M} \omega_R$$

όπου $T_{H/M}$ η ηλεκτρομαγνητική ροπή και ω_R η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής.

Η μηχανική ισχύς προκύπτει από το άθροισμα της ηλεκτρομαγνητικής ισχύος με τις απώλειες περιστροφής.

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

και

$$P_{mech} = T_{mech} \omega_R$$

όπου T_{mech} η μηχανική ισχύς που ασκείται στον άξονα της γεννήτριας.

Η απόδοση της γεννήτριας προκύπτει:

$$\eta_{eff} = \frac{P_{el}}{P_{mech}} = \frac{P_{el}}{P_{el} + \Delta P_{eddy} + \Delta P_{ohm} + \Delta P_{rot}} \quad (3.21)$$

3.5.2.7 Ελκτική δύναμη μεταξύ των δύο δίσκων του δρομέα

Η ελκτική δύναμη μεταξύ των δύο δίσκων του δρομέα είναι σημαντική για τον μηχανικό σχεδιασμό της γεννήτριας. Υψηλές ελκτικές δυνάμεις μπορούν προκαλέσουν παραμόρφωση των δύο δίσκων δημιουργώντας ένα ανομοιόμορφο διάκενο και στη χειρότερη περίπτωση προκαλώντας καταστροφή των μαγνητών. Για αυτό το πάχος των δίσκων πρέπει να είναι αρκετό ώστε η παραμόρφωση να παίρνει μόνο επιτρεπόμενες τιμές.

Η ελκτική δύναμη υπολογίζεται από την σχέση [4]:

$$F_z \approx \frac{1}{2} \frac{B_m g^2}{\mu_o} S_{PM} \quad (3.22)$$

όπου $B_m g$ η μέγιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο και S_{PM} η ενεργός επιφάνεια των μαγνητών:

$$S_{PM} = a_i \frac{\pi}{4} (D_{out}^2 - D_{in}^2) \quad (3.23)$$

όπου $a_i = \frac{w_p(r)}{\tau(r)}$ ο λόγος πλάτους μαγνήτη προς το πολικό βήμα, $D_{in} = 2 r_{in}$ και

$$D_{out} = 2 r_{out}$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΤΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Στο προηγούμενα κεφάλαιο έγινε μία παρουσίαση των βασικών χαρακτηριστικών και σχέσεων που διέπουν τις γεννήτριες αξονικής ροής και εξηγήθηκε η επιλογή της συγκεκριμένης τοπολογίας της γεννήτριας.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα δούμε τον τρόπο σχεδίασης της γεννήτριας που κατασκευάστηκε, θα προσομοιωθεί το μαγνητικό της πεδίο με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα FEMM και θα προσομοιωθούν οι επιδόσεις της με τη χρήση του προγράμματος Matlab.

4.1: Μελέτη της γεννήτριας

Όπως εξηγήθηκε και στην παράγραφο 3.4 η επιλεγμένη γεννήτρια για την εφαρμογή ανεμογεννήτριας είναι μία τριφασική σύγχρονη γεννήτρια αξονικής ροής μόνιμων μαγνητών, τοπολογίας διπλού δρομέα-μονού στάτη χωρίς πυρήνα στον στάτη. Τα βασικά πλεονεκτήματα της είναι η υψηλή απόδοση, η μηδενική ροπή ευθυγράμμισης, η απουσία κιβώτιου ταχυτήτων και ο εξαιρετικά απλός τρόπος κατασκευής της.

Η σχεδίαση και η παρουσίαση του τρόπου κατασκευής της γεννήτριας γίνεται από τον Hugh Piggott στο [17]. Στην παρούσα εργασία θα γίνει μία πιο ολοκληρωμένη παρουσίαση και εξήγηση του τρόπου σχεδίασης της συγκεκριμένης γεννήτριας. Επίσης, θα αναπτυχθεί μία μέθοδος για την εύρεση της εξωτερικής διαμέτρου της γεννήτριας ώστε να πληρείται επαρκώς ψύξη του στάτη. Παράλληλα, θα δείξουμε πως η σχεδίαση αυτή επιδέχεται βελτιώσεις και θα ακολουθήσει μία διαφορετική βελτιωμένη σχεδίαση στην παράγραφο 8.2.

4.1.1: Ταχύτητα περιστροφής εκκίνησης και ΗΕΔ

Η γεννήτρια είναι τριφασική αξονικής ροής χωρίς πυρήνα στο στάτη με συγκεντρωμένο (μη επικαλυπτόμενο) τύλιγμα μονής στρώσης σε συνδεσμολογία αστέρα με επιφανειακούς μόνιμους μαγνήτες τοποθετημένους περιμετρικά στους δύο χαλύβδινους δίσκους του δρομέα. Ονομαστική συχνότητα επιλέγεται $f=50\text{Hz}$.

Η γεννήτρια θα συνδεθεί με μία έλικα για να λειτουργήσει ως ανεμογεννήτρια. Η μελέτη γίνεται ώστε να είναι εφικτή η σύνδεση της ανεμογεννήτριας απευθείας σε συσσωρευτές με $V_{bat}=48\text{V}$ μέσω τριφασικής μη ελεγχόμενης ανόρθωσης γέφυρας, αλλά και σε λειτουργία με σύστημα μεγιστοποίησης της ισχύος (MPPT). Οι δύο διαφορετικοί τρόποι λειτουργίας περιγράφονται στην παράγραφο 6.

Η αεροδυναμική ισχύς που απορροφά η έλικα από τον άνεμο ισούται με [21]:

$$P_{air} = \frac{1}{2} \rho \cdot cp \cdot \pi \cdot Radius^2 \cdot Vw^3 \quad (4.1)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του αέρα, $Radius$ είναι η ακτίνα της έλικας, cp ο αεροδυναμικός συντελεστής και Vw η ταχύτητα του ανέμου.

Ο λόγος ταχύτητας ακροπερυγίου λ ισούται με την μεταφορική ταχύτητα που έχει το άκρο της έλικας προς την ταχύτητα του ανέμου.

$$\lambda = \frac{\omega_R \cdot Radius}{Vw} \quad (4.2)$$

όπου ω_R η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της έλικας σε rad/sec

Η ανεμογεννήτρια έχει σχεδιαστεί για ονομαστική ταχύτητα ανέμου:

$V_{wnom}=10m/sec$.

Η πυκνότητα του αέρα είναι $\rho=1.2kg/m^3$ και η μέγιστη τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή $cp=0,35$

Όπως είδαμε στην παράγραφο 2.1 επιλέγεται η ακτίνα της έλικας $Radius=1,2m$

Τα συγκεκριμένα φτερά έχουν σχεδιαστεί για $\lambda=7$. Η γωνιακή ταχύτητα ω_R σε rad/sec σχετίζεται με την ταχύτητα περιστροφής n σε RPM με τη σχέση:

$$\omega_R = \frac{2\pi \cdot n}{60} \quad (4.3)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (4.2) και (4.3) προκύπτει:

$$n = \frac{60 \cdot Vw \cdot \lambda}{2\pi \cdot Radius} \quad (4.4)$$

Σύμφωνα με το σχεδιαστή των φτερών [17] η έλικα εκκινεί για $\lambda=8.5$ και $V_{w_{cutin}}=3m/sec$

Δεδομένου πως $Radius=1.2m$

προκύπτει

$$n_{cutin}=203RPM \approx 200RPM$$

Στην περίπτωση λειτουργίας με βέλτιστο $\lambda=7$ και cp_{max} (MPPT) για ονομαστική

ταχύτητα ανέμου $Vw=10m/sec$

$$n_{nom}=557RPM \approx 550RPM$$

Η ΗΕΔ E_f της γεννήτριας είναι ανάλογη με την ταχύτητα περιστροφής της. Όταν η γεννήτρια στρέφεται με χαμηλή ταχύτητα περιστροφής και η ανορθωμένη ΗΕΔ είναι μικρότερη από την τάση της μπαταρίας δεν περνά ρεύμα στη μπαταρία οπότε η ΗΕΔ είναι ίση με την τερματική τάση της γεννήτριας V_t . Μόλις οι στροφές γίνουν αρκετές ώστε η ανορθωμένη ΗΕΔ να είναι ίση με την τάση της μπαταρίας ξεκινά η έγχυση ισχύος στο σύστημα.

Έτσι, για $n=n_{cutin}$ πρέπει

$$Ef = \frac{V_{bat}}{\sqrt{3} \cdot 1.35} \quad (4.5)$$

Γιατί ως γνωστόν σε μία μη ελεγχόμενη ανόρθωση [24]: $V_{dc} = \sqrt{3} \cdot 1.35 \cdot V_{ac}$ όπου V_{ac} η φασική τάση πριν την ανόρθωση.

Με βάση τη σχέση (4.5) και δεδομένου πως $V_{bat}=48V$ η προϋπόθεση που πρέπει να πληροί η γεννήτρια είναι:

για

$$n=n_{cutin}=200RPM$$

$$Ef=V_t=20.5V$$

4.1.2: Αριθμός πόλων και διαστάσεις μαγνητών του δρομέα

Σε μία σύγχρονη γεννήτρια ισχύει:

$$n = \frac{120f}{p} \quad (4.6)$$

όπου p είναι ο αριθμός των πόλων της γεννήτριας και f η συχνότητα του στάτη. Για να είναι η συχνότητα της τάξης των 50Hz για $n_{nom} \approx 550$ RPM από την σχέση (4.6) υπολογίζεται:
 $p \approx 10,9$

Στην παράγραφο 3.5.2.1 δείχθηκε πως για να υπάρχει βέλτιστος συνδυασμός πόλων και πηνίων πρέπει ο αριθμός των πόλων να είναι πολλαπλάσιο του τέσσερα. Οπότε επιλέγονται 12 πόλοι:
 $p=12$

Αυτό σημαίνει πως θα τοποθετηθούν 12 μόνιμοι μαγνήτες σε κάθε χαλύβδινο δίσκο ώστε να δημιουργούνται συνολικά 12 βρόχοι της μαγνητικής ροής. Οπότε, χρειάζονται 24 μόνιμοι μαγνήτες.

Από την (4.6) για $p=12$ προκύπτει:

$$n = 10 \cdot f \quad (4.7)$$

Ο σχεδιαστής επιλέγει να χρησιμοποιήσει μόνιμους μαγνήτες NdFeB βαθμού 40 εξαιτίας της μεγάλης τιμής της μαγνητικής επαγωγής που μπορούν να αναπτύξουν στο διάκενο. Με βάση την διαθεσιμότητα άρα και το χαμηλό κόστος των συγκεκριμένων μαγνητών ο σχεδιαστής επιλέγει να χρησιμοποιήσει μόνιμους μαγνήτες σχήματος ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου με τις εξής διαστάσεις:

$la=46mm$ το ακτινικό μήκος του μαγνήτη
 $wm=30mm$ το πάχος του μαγνήτη

$hm=10mm$ το αξονικό ύψος του μαγνήτη

Το ακτινικό μήκος των μαγνητών καθορίζει το ενεργό μήκος του τυλίγματος

$la=r_{out}-r_{in}=46mm$ όπως είδαμε στο κεφάλαιο 3.

Οι μαγνήτες NdFeB βαθμού 40 έχουν

$B_r=1.26-1.29\text{ Tesla}$

και $H_c=915-955kA/m$

Η σχετικά αυθαίρετη επιλογή των μονίμων μαγνητών μπορεί να μειώνει το κόστος και την ευκολία εύρεσης τους, αλλά δεν οδηγεί σε βέλτιστη αξιοποίηση των υλικών που χρησιμοποιούνται. Επίσης, ο σχεδιαστής χάριν απλότητας επιλέγει την σύμπτωση των εσωτερικών διαστάσεων των πηνίων με τις διαστάσεις των μαγνητών, που δεν αποτελεί την καλύτερη δυνατή σχεδίαση για το τύλιγμα.

4.1.3: Αριθμός πηνίων, μορφή του τυλίγματος, αξονικό πάχος του στάτη, αριθμός ελιγμάτων ανά φάση του στάτη.

Η γεννήτρια διαθέτει 12 πόλους. Στην παράγραφο 3.5.2.1 είδαμε πως ο αριθμός των πλευρών πηνίων ανά πόλο ανά φάση $\frac{2Q}{p \cdot 3}$ πρέπει να ισούται με 0,5. Οπότε προκύπτει:

$Q=9$ πηνία στο τύλιγμα

Αφού η μηχανή είναι τριφασική θα υπάρχουν 3 πηνία ανά φάση συνδεδεμένα σε σειρά:
 $q=3$ πηνία ανά φάση

Το τύλιγμα επιλέγεται να είναι συγκεντρωμένο απλής στρώσης με ορθογώνια πηνία. Αυτή η μορφή έχει το πλεονέκτημα της απλούστερης σχεδίασης και κατασκευής, αλλά η ορθογώνια μορφή οδηγεί σε μεγαλύτερα άκρα τυλίγματος και σε μικρότερη ποσότητα χαλκού που χωράει σε δεδομένη διάμετρο της γεννήτριας. Επίσης, η απλή στρώση οδηγεί σε χαμηλότερη πεπλεγμένη ροή από ότι η διπλή στρώση (παράγραφος 3.5.2.1). Για απλότητα της σχεδίασης επιλέγονται οι εσωτερικές διαστάσεις των ορθογώνιων πηνίων να είναι ίδιες με τις διαστάσεις των ορθογώνιων μαγνητών.

Σύμφωνα με το [10] όταν η απόσταση μεταξύ δύο αντικριστών μαγνητών lg είναι περίπου ίση με το συνολικό αξονικό ύψος των μαγνητών επιτυγχάνεται μέγιστη παραγωγή ισχύος.

Δηλαδή:

$$lg \approx hm + hm \quad (4.8)$$

$$lg \approx 20mm$$

Η απόσταση μεταξύ δύο αντικριστών μαγνητών lg είναι ίση με το άθροισμα του αξονικού πάχους του στάτη t_w και των δύο μηχανικών διακένων g μεταξύ των πηνίων του στάτη και των μαγνητών των δύο δίσκων.

$$lg = t_w + g + g \quad (4.9)$$

Η κατασκευή του στάτη γίνεται τοποθετώντας τα πηνία σε μία πλάκα από ρητίνη που στις δύο εξωτερικές πλευρές της έχουν τοποθετηθεί δύο φύλλα από υαλονήματα για να της προσδώσουν μηχανική αντοχή. Επίσης, για καλύτερη μηχανική αντοχή του δρομέα οι μαγνήτες είναι επίσης τοποθετημένοι σε μία πλάκα ρητίνης όπου και εκεί στην εξωτερική επιφάνεια είναι τοποθετημένο ένα φύλλο από υαλονήματα. (παράγραφος 5.1.2). Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ της ρητίνης του στάτη και του δρομέα ώστε να αποφευχθεί επαφή μεταξύ τους και να υπάρχει επαρκής ψύξη είναι $1mm$. Το πάχος των φύλλων ρητίνης είναι επίσης $1mm$. Έτσι, το μηχανικό διάκενο που είναι η ελάχιστη αξονική απόσταση μεταξύ των πηνίων του στάτη και των μαγνητών του κάθε δίσκου είναι:

$$g \approx 1mm + 1mm + 1mm \approx 3mm$$

Με βάση τα παραπάνω από την (4.8) το αξονικό πάχος του στάτη υπολογίζεται:

$$tw \approx 20 - 3 - 3 \approx 14mm$$

Ο σχεδιαστής επιλέγει το αξονικό πάχος του στάτη λίγο μικρότερο από αυτή τη τιμή:

$$tw = 13mm$$

Η μέγιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο Bmg μπορεί να υπολογιστεί ως εξής [4]:

$$Bmg = \frac{Br}{1 + \mu_{rec} \cdot \frac{(g + 0.5tw)}{hm} \cdot k_{sat}} \quad (4.10)$$

όπου

$$\mu_{rec} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (4.11)$$

$$\mu_{rec} = \frac{1}{4\pi \cdot 10^{-7}} \frac{Br - 0}{Hc - 0} = \frac{1}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{1,26}{915000} = 1,09$$

Εφόσον δεν υπάρχει πυρήνας στον στάτη, και οι δίσκοι του δρομέα έχουν το απαιτούμενο πάχος, δεν παρουσιάζεται μαγνητικός κορεσμός στη μηχανή οπότε:

$$k_{sat} = 1$$

Έτσι, από την (4.10) προκύπτει:

$$Bmg = 0,62 \text{ Tesla}$$

Σημειώνουμε εδώ πως η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο αν $lg \approx hm + hm$ μπορεί να υπολογιστεί πρόχειρα ως το μισό της Br . [17]

Για τον υπολογισμό των αριθμών των ελιγμάτων ανά φάση θα χρησιμοποιήσουμε τη σχέση της ΗΕΔ με την ταχύτητα περιστροφής.

Η μαγνητική ροή ανά πόλο για ορθογώνιους μαγνήτες ισούται με:

$$\Phi = \int B_{avg} \cdot dS = B_{avg} \cdot \int dS = B_{avg} \cdot \tau \cdot la =$$

$= ai \cdot Bmg \cdot \tau p \cdot la = Bmg \cdot \omega m \cdot la = 0,62 \cdot 30 \cdot 46 \cdot 10^{-6} = 8,556 \cdot 10^{-4} Wb$
όπου τp το πολικό βήμα της γεννήτριας.

Θεωρούμε πως η κυματομορφή της πεπλεγμένης ροής είναι ημιτονοειδής (παράγραφος 3.5.2.2). Η πεπλεγμένη ροή ανά φάση ισούται με:

$$\lambda = N_{\phi} k_w \Phi_{max} \sin(\omega_e t)$$

Έτσι, η φασική ΗΕΔ προκύπτει:

$$ef = \frac{d\lambda}{dt} = \Phi_{max} \cos(\omega_e t) \cdot \omega_e \cdot N_{\phi}$$

Η μέγιστη τιμή της φασικής ΗΕΔ θα είναι:

$$Ef_{max} = N_{\phi} k_w \Phi_{max} \omega_e = N_{\phi} k_w \Phi_{max} 2\pi f = N_{\phi} k_w \Phi_{max} 2\pi 0,1 n$$

αφού από την (4.7): $n = 10 \cdot f$

Η ενεργός τιμή της ΗΕΔ προκύπτει:

$$Ef = \frac{1}{\sqrt{2}} N_{\phi} k_w \Phi_{max} 2\pi 0,1 n$$

οπότε:

$$N_{\phi} = \frac{\sqrt{2} Ef}{2\pi \cdot k_w \cdot \Phi_{max} \cdot 0,1 n} \quad (4.12)$$

Δείξαμε πως για $n = n_{cutin} = 210 RPM$ η ΗΕΔ ισούται με $Ef = 20,5$

Εκτιμώντας τον συντελεστή τυλίγματος $k_w \approx 0,95$ προκύπτει:

$N_{\phi} = 270$ ελίγματα ανά φάση

$N_c = N_{\phi} / 3 = 90$ ελίγματα ανά πηνίο.

Σημειώνουμε πως δεν χρησιμοποιούμε τους τύπους των παραγράφων 3.5.1 και 3.5.2 γιατί δεν αναφέρονται σε μαγνήτες και πηνία σχήματος ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου.

4.1.3: Εξωτερική διάμετρος, διατομή, αντίσταση και αυτεπαγωγή ανά φάση, συνολική μάζα του τυλίγματος του στάτη.

Η εξωτερική διάμετρος του τυλίγματος είναι η διάσταση της γεννήτριας που σχετίζεται άμεσα με την ισχύ της. Ανάλογα με τα κριτήρια και τις προτεραιότητες του σχεδιαστή η εξωτερική διάμετρος παίρνει διαφορετικές τιμές.

Στην παράγραφο αυτή αναπτύσσεται μία μέθοδος για την εύρεση της εξωτερικής διαμέτρου του τυλίγματος ώστε να υπάρχει επαρκής ψύξη τοποθετώντας αγωγούς με τη μεγαλύτερη δυνατή διάμετρο.

Πρώτα θα ασχοληθούμε με κάποιες βασικές σχέσεις που αφορούν το τύλιγμα του στάτη.

Ο χαλκός δεν καταλαμβάνει ολόκληρη τη διατομή ενός πηνίου εξαιτίας της μόνωσης που διαθέτει και της κυκλικής διατομής των αγωγών. Έτσι, ο συντελεστής πλήρωσης ισούται με την επιφάνεια του χαλκού που βρίσκεται στη διατομή ενός πηνίου προς την συνολική επιφάνεια της διατομής:

$$kf = \frac{Areacopper}{wc \cdot tw} \Rightarrow$$

$$Areacopper = kf \cdot wc \cdot tw \quad (4.13)$$

όπου tw το αξονικό πάχος του στάτη και wc το πάχος πλευράς πηνίου. Συνήθης τιμή για τον συντελεστή πλήρωσης είναι $kf \approx 0,55$ [17]

Η επιφάνεια του χαλκού σε διατομή ενός πηνίου ισούται με το γινόμενο του αριθμού των ελιγμάτων του πηνίου με την διατομή ενός αγωγού χαλκού sc :

$$Areacopper = Nc \cdot sc \Rightarrow$$

$$sc = \frac{Areacopper}{Nc} = \frac{kf \cdot wc \cdot tw}{Nc} \quad (4.14)$$

Το μέσο μήκος ελίσματος προκύπτει [17]:

$$lavg = 2 \cdot (la + wm) + \pi \cdot wc \quad (4.15)$$

όπου $la=rout-rin$ είναι το ενεργό μήκος τυλίγματος και wm το πάχος ενός μαγνήτη που ταυτίζεται με το την αντίστοιχη εσωτερική διάσταση ενός πηνίου (εσωτερικό άνοιγμα).

Η αντίσταση ενός πηνίου σύμφωνα με τα παραπάνω υπολογίζεται:

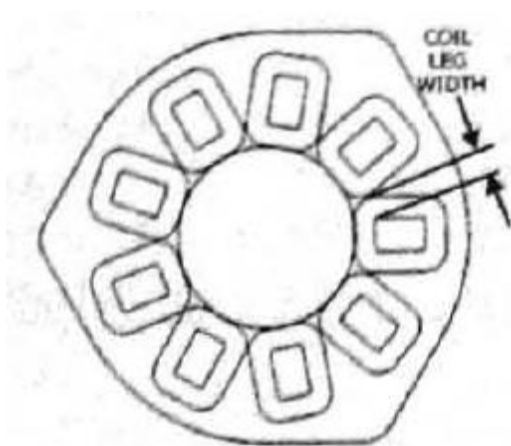
$$Rc = \rho \cdot \frac{Nc \cdot lavg}{sc} \quad (4.16)$$

Το τύλιγμα είναι συγκεντρωμένο μονή στρώσης που σημαίνει πως τα πηνία βρίσκονται σε επαφή στην εσωτερική ακτίνα του τυλίγματος rin .

Από το Σχήμα 4.1 φαίνεται πως η περιφέρεια του κύκλου με κέντρο τον άξονα περιστροφής και ακτίνα ίση με rin ισούται κατά προσέγγιση με το άθροισμα του αριθμού των πηνίων (Q) επί το εσωτερικό άνοιγμα του πηνίου (που ισούται με το πάχος του μαγνήτη wm) με τον αριθμό των πλευρών πηνίου ($2Q$) επί το πάχος πλευράς πηνίου wc :

$$2\pi \cdot rin = 2 \cdot Q \cdot wc + Q \cdot wm \Rightarrow$$

$$rin = \frac{2Q \cdot wc + Q \cdot wm}{2\pi} \quad (4.17)$$



Σχήμα 4.1: Στάτης της συγκεκριμένης γεννήτριας με μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα μονής στρώσης.

Η επαρκής ψύξη των πηνίων είναι απαραίτητη για την αξιόπιστη λειτουργία της γεννήτριας. Για κάθε πηνίο η θερμότητα που αποβάλλεται οφείλεται στις ωμικές απώλειες χαλκού (αγνοούμε τα δινορεύματα στο τύλιγμα) και η επιφάνεια αποβολής ισούται με την επιφάνεια επαφής των αγωγών με τον αέρα και στις δύο πλευρές του στάτη. Έτσι, ορίζεται ο συντελεστής cq [17]:

$$cq = \frac{P_{losscoil}}{coilsurface} = \frac{I_a^2 \cdot Rc}{2 \cdot wc \cdot lavg} \quad (4.18)$$

όπου I_a η ενεργός τιμή του ρεύματος γραμμής.

Δεδομένου πως η ανεμογεννήτρια βρίσκεται σε εξωτερικό χώρο και έρχεται σε επαφή με τον άνεμο, ενδεικτική τιμή για τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του cq είναι [17]:

$$cq = 0,3 \frac{W}{cm^2}$$

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις μπορούμε να αναπτύξουμε μία μέθοδο για την εύρεση της εξωτερικής διαμέτρου της γεννήτριας ώστε να πληρείται επαρκής ψύξη του στάτη. Στη συνέχεια, με δεδομένη την εξωτερική διάμετρο βρίσκουμε τη μεγαλύτερη διατομή καλωδίου που χωράει στον στάτη, την αντίσταση ανά φάση και τη μάζα χαλκού που απαιτείται. Εισάγοντας την (4.16) και την (4.14) στην (4.18) προκύπτει:

$$cq = \frac{I_a^2 \cdot Rc}{2 \cdot wc \cdot lavg} \Leftrightarrow cq = \rho \frac{I_a^2 \cdot Nc \cdot lavg}{2 \cdot wc \cdot lavg \cdot sc} \Leftrightarrow$$

$$cq = \rho \frac{I_a^2 \cdot Nc \cdot Nc}{2 \cdot wc \cdot kf \cdot wc \cdot tw} \Leftrightarrow cq = \rho \frac{I_a^2 \cdot Nc^2}{2 \cdot wc^2 \cdot kf \cdot tw} \Leftrightarrow$$

$$wc = \frac{I_a \cdot Nc}{\sqrt{\frac{2 \cdot cq \cdot kf \cdot tw}{\rho}}} \quad (4.19)$$

Το μέγιστο ρεύμα γραμμής για την απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές υπολογίζεται εύκολα δεδομένου πως σύμφωνα με τον σχεδιαστή η μέγιστη στιγμιαία τιμή της ενεργούς ισχύος είναι 700W:

$$Idc = \frac{P_{\max}}{Vdc} = \frac{700}{48} = 14,6A$$

$$Ia = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot Idc = 11,9A$$

Από την σχέση (4.14) έχοντας γνωστά όλα τα μεγέθη βρίσκουμε:

$$wc = 21,6mm$$

οπότε από την εξίσωση (4.17) προκύπτει:

$$rin = 105mm$$

$$Din = 2 \cdot rin = 210mm$$

Η εξωτερική διάμετρος του τυλίγματος ισούται με:

$$Dout = Din + 2la = 302mm$$

Έτσι, τελικά επιλέγεται:

$$Dout = 300mm$$

$$Din = 300 - 2 \cdot 46 = 208mm$$

$$wc = 21mm$$

και προκύπτει:

$$kd = \frac{Din}{Dout} = 0,693$$

Από την (5.10) βρίσκουμε τη διατομή του χαλκού:

$$sc = 1,668mm^2$$

Το καλώδιο τυλίγματος χαρακτηρίζεται από τη διάμετρο του:

$$dc = \sqrt{\frac{4 \cdot sc}{\pi}} = 1,46mm$$

Με βάση τις διαθέσιμες διαμέτρους στο εμπόριο επιλέγουμε διάμετρο:

$$dc = 1,5mm \Rightarrow sc = 1,766mm^2$$

Η πυκνότητα ρεύματος υπολογίζεται:

$$J = \frac{Ia}{sc} = 6,7 \frac{A}{mm^2}$$

Το συνηθισμένο όριο για μηχανές χωρίς εξαναγκασμένη ψύξη είναι $3,5-4A/mm^2$. Για εφαρμογές ανεμογεννητριών επιτρεπόμενη τιμή είναι τα $5A/mm^2$ [31]. Για μηχανές αξονικής ροής μικρότερες των $10kW$ η πυκνότητα ρεύματος μπορεί να έχει την τιμή $6.3A/mm^2$ [4]. Έτσι, η τιμή είναι κοντά στο επιτρεπόμενο όριο και θεωρείται ικανοποιητική.

Από την (4.15) υπολογίζουμε το μέσο μήκος ελίσματος:

$$l_{avg}=218mm$$

οπότε από την (4.16) η ωμική αντίσταση ενός πηνίου προκύπτει:

$$R_c=0,195\Omega$$

στους $20^\circ C$

$$R_\phi = 3R_c = 0,585\Omega$$

Για τον υπολογισμό της αυτεπαγωγής η σταθερά Nagaoka προκύπτει από την (3.16) προκύπτει:

$$Kn = \frac{1}{1 + 0.9 \frac{l_{avg}}{2\pi \cdot tw} + 0.32 \frac{2\pi \cdot w}{l_{avg}} + 0.84 \frac{w}{tw}} = 0,2018$$

οπότε η σύγχρονη αυτεπαγωγή από την (3.15) ισούται με:

$$L_s = \frac{q \cdot l_{avg}^2 N_c^2}{tw} 10^{-7} Kn = 1,793mH$$

Η συνολική μάζα χαλκού που χρησιμοποιείται στο τύλιγμα με βάση την (3.17) υπολογίζεται:

$$m_{cu} = 3N_\phi l_{avg} s_c \rho_{cu} = 2,745kg$$

4.1.4: Πάχος των δύο δίσκων του δρομέα

Το πάχος των δύο δίσκων εξαρτάται από τις ελκτικές δυνάμεις μεταξύ των δίσκων και πρέπει να είναι αρκετό ώστε να επιτρέπει μικρές τιμές παραμόρφωσης.

Το μέσο πολικό βήμα τ_m προκύπτει:

$$\tau_m = \frac{2\pi \cdot R_{avg}}{p} = 66,46mm$$

οπότε ο λόγος πάχους μαγνήτη προς το μέσο πολικό βήμα ισούται με:

$$a_i = \frac{wm}{\tau_m} = \frac{30}{66,46} = 0,45$$

Η ενεργός επιφάνεια των μαγνητών ισούται σύμφωνα με την (3.23):

$$S_{PM} = a_i \frac{\pi}{4} (D_{out}^2 - D_{in}^2) = 0,0165m^2$$

Οπότε η ελκτική δύναμη υπολογίζεται από την (3.22):

$$F_z \approx \frac{1}{2} \frac{Bmg^2}{\mu_o} S_{PM} = 2525N$$

$$Bmg=0,62T$$

Η μαγνητική πίεση στην αξονική κατεύθυνση ισούται με:

$$p_z = \frac{F_z}{SPM} = 153kPa$$

με βάση την εμπειρία επιλέγεται από τον σχεδιαστή πάχος δίσκου $8mm$. Με μηχανική μελέτη [22] για δεδομένη εξωτερική διάμετρο και μαγνητική πίεση μπορεί να προκύψει βέλτιστο αποτέλεσμα.

4.2: Προσομοίωση του μαγνητικού πεδίου και επιδόσεις της γεννήτριας

Η μελέτη της γεννήτριας ακολουθείται από την προσομοίωση του μαγνητικού πεδίου της με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η προσομοίωση επιτρέπει την πραγματοποίηση ακριβέστερων υπολογισμών, την εκτίμηση των επιδόσεων της γεννήτριας, καθώς και την δυνατότητα πραγματοποίησης βελτιώσεων και βελτιστοποίησης ως προς κάποιες επιλεγμένες παραμέτρους.

Για την προσομοίωση του μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιείται το πρόγραμμα ελεύθερου λογισμικού FEMM. Το FEMM χρησιμοποιεί την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για να υπολογίσει διάφορα μεγέθη όπως η μαγνητική επαγωγή, η μαγνητική ροή, η ένταση του μαγνητικού πεδίου, η ηλεκτρομαγνητική δύναμη κ.α. σε επιλεγμένες γραμμές και περιοχές. Το πρόβλημα χωρίζεται σε πολλά μικρά τρίγωνα στα οποία υπολογίζεται το διανυσματικό μαγνητικό δυναμικό A όπου $B = \nabla \times A$. Σε δισδιάστατες γεωμετρίες το διάνυσμα A έχει τη διεύθυνση του άξονα των z και το μέτρο του εξαρτάται από τις συντεταγμένες x, y του προβλήματος. Σύμφωνα με το θεώρημα του Stokes η μαγνητική ροή που διέρχεται από μία επιφάνεια S ισούται με [4]:

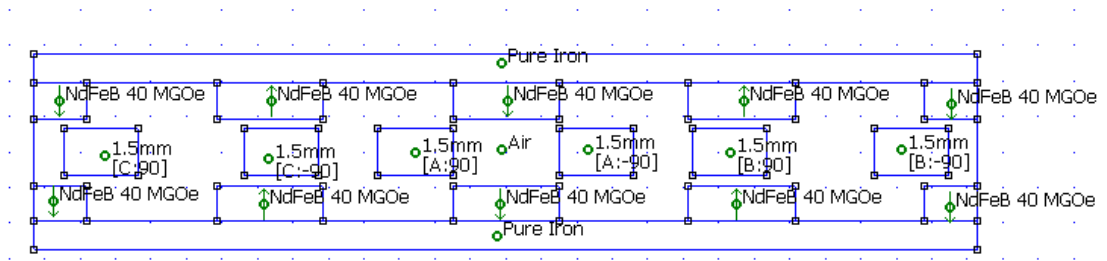
$$\int_S B \cdot dS = \int \nabla \times A \cdot dS = \oint_C A \cdot dl$$

4.2.1: Γεωμετρία του προβλήματος

Μία ακριβής αναπαράσταση μιας μηχανής μονίμων μαγνητών αξονικής ροής χρειάζεται να είναι τρισδιάστατη λόγω του δισκοειδούς σχήματος της. Παρόλα αυτά, στις περισσότερες περιπτώσεις για λόγους απλότητας χρησιμοποιείται μία αναπαράσταση σε δύο διαστάσεις η οποία παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα [4].

Έτσι, στο Σχήμα 4.2 παριστάνεται το ευθύγραμμο ανάπτυγμα της γεννήτριας που μελετήθηκε. Ανάλογα με τη διάμετρο της γεννήτριας στην οποία επιλέγεται να γίνει η τομή, αλλάζει η απόσταση μεταξύ των παρακείμενων μαγνητών, οπότε και το πολικό βήμα, καθώς και η απόσταση μεταξύ των παρακείμενων πηνίων. Για να υπάρξει το πιο αντιπροσωπευτικό αποτέλεσμα επιλέγεται η τομή στην μέση διάμετρο.

$D_{avg} = (D_{in} + D_{out})/4 = 254\text{mm}$. Οι αποστάσεις μεταξύ των παρακείμενων μαγνητών και μεταξύ των παρακείμενων πηνίων υπολογίζονται με βάση την μέση διάμετρο. Το πάχος των δύο δίσκων καθώς και το αξονικό πάχος του στάτη παίρνουν τις τιμές που υπολογίστηκαν στη μελέτη.

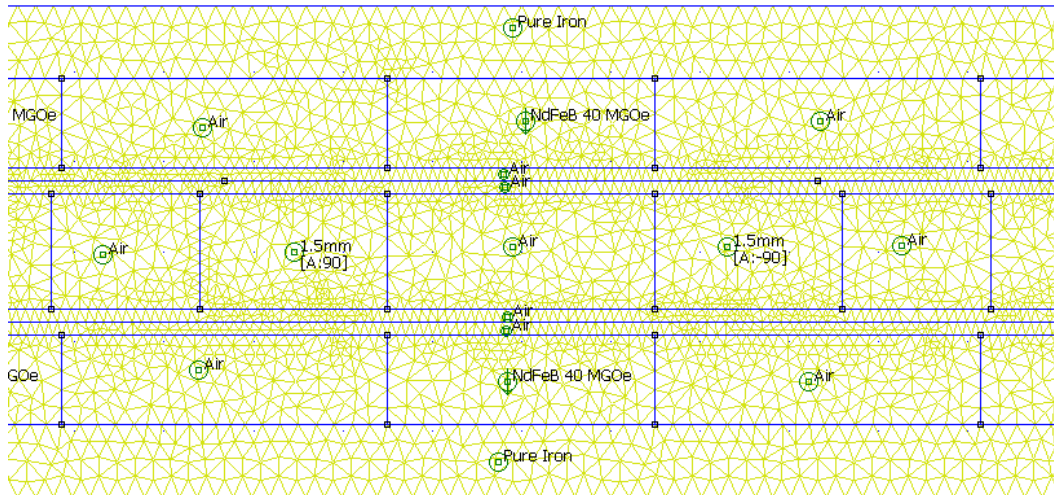


Σχήμα 4.2: Γεωμετρία στο FEMM της γεννήτριας αξονικής ροής

Η μηχανή διαθέτει 12 μόνιμους μαγνήτες με σχήμα ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου σε κάθε δίσκο του δρομέα και 9 πηνία με εσωτερικές διαστάσεις ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου. Το τύλιγμα είναι συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο μονής στρώσης με 3 πηνία ανά φάση. Λόγω συμμετρίας δεν χρειάζεται να αναπαρασταθεί όλη η μηχανή, ώστε να μειωθεί ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος. Έτσι, αρκεί να αναπαρασταθεί το ένα τρίτο της μηχανής δηλαδή τέσσερα πολικά βήματα και τρία πηνία, ένα για κάθε φάση. Οι συνθήκες που πρέπει να εγκατασταθούν στα δεξιά και αριστερά σύνορα του προβλήματος είναι περιοδικές, εφόσον αναπαρίσταται ζυγός αριθμός πολικών βημάτων και η μορφή του μαγνητικού πεδίου επαναλαμβάνεται δεξιά και αριστερά της γεωμετρίας. Στα πάνω και κάτω σύνορα εγκαθίστανται συνθήκες που μηδενίζουν το διάνυσμα A εκτός της μηχανής.

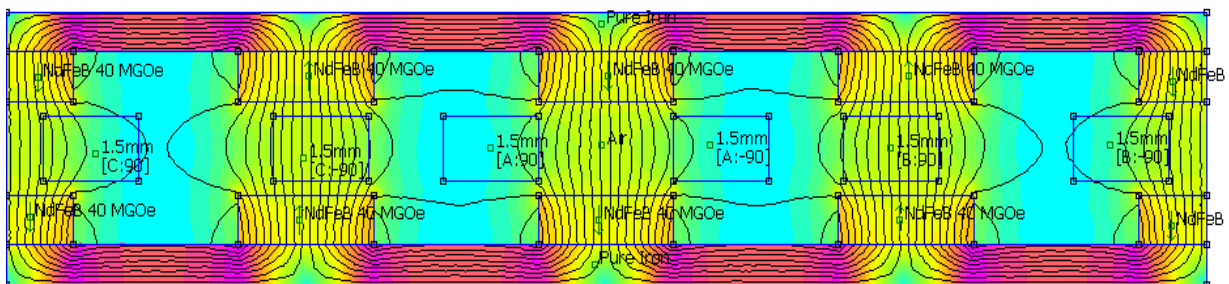
Στις καθορισμένες περιοχές ορίζονται τα υλικά του προβλήματος: μόνιμοι μαγνήτες NdFeB βαθμού 40, σίδηρος, χαλκός της επιλεγμένης διαμέτρου και αέρας. Επίσης, επιλέγεται η φορά μαγνήτισης των μαγνητών, ο αριθμός των ελιγμάτων στα πηνία και η φορά αναφοράς των ρευμάτων στο τύλιγμα

Το διάκενο, δηλαδή η απόσταση μεταξύ μαγνητών και πηνίων, επιλέγεται 3mm εξαιτίας του πάχους που προσθέτει η ρητίνη του δρομέα και του στάτη. Ως βάθος της γεωμετρίας επιλέγεται το ενεργό μήκος της μηχανής $l_a=46\text{mm}$. Για να υπάρξει μεγαλύτερη ακρίβεια στο αποτέλεσμα της προσομοίωσης επιλέγεται μικρότερο πλέγμα στο διάκενο (1mm) από ότι στην υπόλοιπη γεωμετρία (2mm) όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3. Το πρόβλημα χωρίζεται συνολικά σε 7161 στοιχεία.



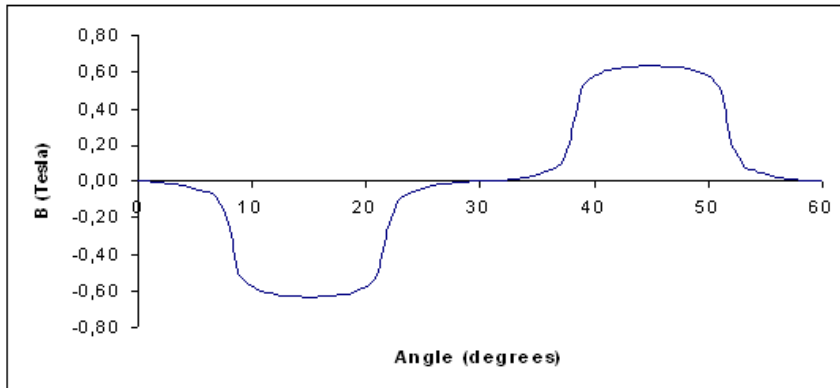
Σχήμα 4.3: Πλέγμα της γεωμετρίας στο FEMM με πυκνότερο πλέγμα στο διάκενο

Στη συνέχεια το πρόβλημα επιλύεται για μηδενικές τιμές ρευμάτων και η μορφή του μαγνητικού πεδίου σε ολόκληρη την επιλεγμένη γεωμετρία παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4. Παρατηρούμε τους 4 μαγνητικούς βρόχους που δημιουργούνται και την μαγνητική ροή που διέρχεται από τα πηνία κατά κύριο λόγο παράλληλα με τον άξονα περιστροφής. Η πεπλεγμένη ροή κάθε πηνίου μπορεί να υπολογιστεί από την μαγνητική επαγωγή, την μέση απόσταση μεταξύ των πλευρών ενός πηνίου και το βάθος της γεωμετρίας. Ο υπολογισμός της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης μπορεί να γίνει με τον τανυστή Maxwell κατά μήκος ευθείας γραμμής στο μέσο των δύο διακένων όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3.

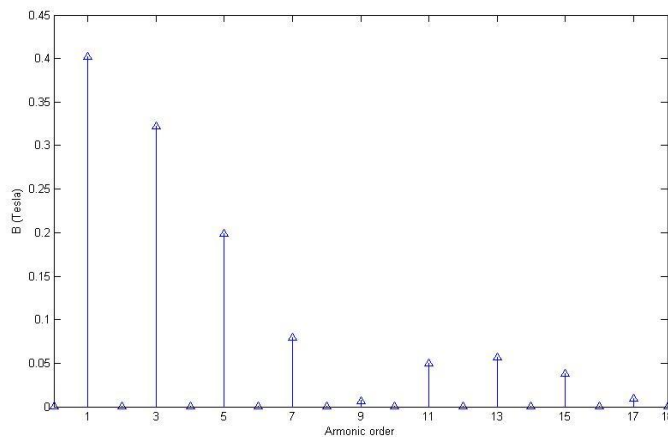


Σχήμα 4.4: Επίλυση του μαγνητοστατικού προβλήματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μορφή της μαγνητικής επαγωγής στο μέσο του διακένου. Στο Σχήμα 4.5 παριστάνεται η μαγνητική επαγωγή του διακένου σε σχέση με τη μηχανική γωνία σε δύο πολικά βήματα. Η περίοδος της είναι $2 \cdot 360/12 = 60^\circ$ και η μέγιστη τιμή της $0,63T$ για μηχανική γωνία 15° και 45° και η απουσία αυλακών προκαλεί την ομαλή μορφή της. Χρησιμοποιώντας έτοιμο πρόγραμμα σε γλώσσα Fortran που υλοποιεί τον ταχύ μετασχηματισμό Fourier (FFT), γίνεται αρμονική ανάλυση της μαγνητικής επαγωγής το αποτέλεσμα της οποίας φαίνεται στο Σχήμα 4.6. Η θεμελιώδης συνιστώσα $0,4T$ χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τον υπολογισμό των δινορευμάτων του τυλίγματος του στάτη. Βασικές αρμονικές συνιστώσες είναι οι εξής: $3^\eta, 5^\eta, 7^\eta, 11^\eta, 13^\eta, 15^\eta$.



Σχήμα 4.5: Μορφή της μαγνητικής επαγωγής στο μέσο του διακένου.



Σχήμα 4.6: Αρμονική ανάλυση της μαγνητικής επαγωγής στο μέσο του διακένου

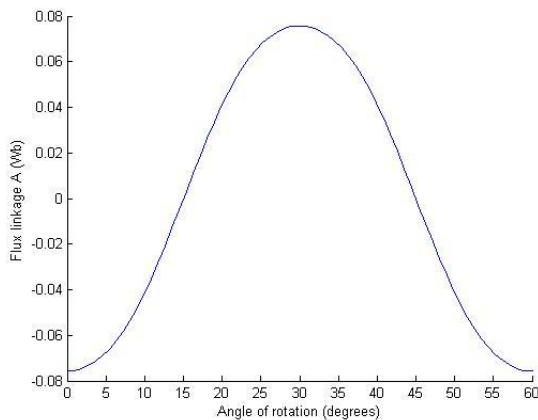
4.2.2: Υπολογισμός της ΗΕΔ και της ηλεκτρομαγνητικής Ροπής

Η γεωμετρία που έχουμε πραγματοποιήσει μέχρι στιγμής είναι στατική και το πρόβλημα μαγνητοστατικό. Για να υπολογίσουμε την ΗΕΔ χρειάζεται να πραγματοποιηθεί μετακίνηση του δρομέα ως προς τον στάτη. Για να γίνει αυτό αναπτύσσεται πρόγραμμα στη γλώσσα προγραμματισμού του Matlab που δέχεται την γεωμετρία του προβλήματος, μετακινεί τον δρομέα προς τα δεξιά για απόσταση $1mm$ που ισοδυναμεί σε μηχανική

γωνία περιστροφής $0,9^\circ$ και επιλύει το μαγνητοστατικό πρόβλημα σε κάθε θέση. Για κάθε μετακίνηση του δρομέα διαγράφονται τα σημεία δεξιά της γεωμετρίας και δημιουργούνται νέα σημεία στα αριστερά της γεωμετρίας ώστε το πρόβλημα να παραμένει ανάμεσα στα προκαθορισμένα όρια. Σε κάθε μετακίνηση τοποθετούνται εκ νέου οι συνοριακές συνθήκες στα αριστερά και δεξιά σύνορα. Για κάθε ημιπερίοδο των ηλεκτρικών μεγεθών το πρόγραμμα χωρίζεται σε τρεις περιπτώσεις: Αρχικά οι αντικριστοί δεξιά μαγνήτες κινούνται προς τα δεξιά μέχρι να διαγραφούν, έπειτα οι δύο επόμενοι μαγνήτες πλησιάζουν το δεξί σύνορο, και τέλος οι δύο επόμενοι μαγνήτες φτάνουν στο δεξί σύνορο και μετακινούνται προς τα δεξιά μέχρι να φτάσει το μέσο τους στο δεξί σύνορο.

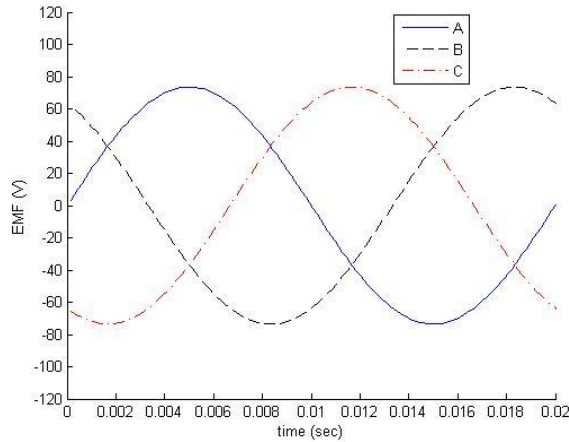
Ιδιαίτερη προσοχή σε αυτή τη μέθοδο χρειάζεται στη τοποθέτηση της σωστής φοράς μαγνήτισης στον νέο μαγνήτη μόλις σχηματοποιηθεί στο αριστερό μέρος της γεωμετρίας, καθώς και στην εξασφάλιση της παρουσίας των μαγνητικών ιδιοτήτων εντός του περιγράμματος του μαγνήτη μέχρι να διαγραφεί εντελώς από τη δεξιά πλευρά. Το πλήρες πρόγραμμα βρίσκεται στο Παράρτημα Α.

Με αυτό τον τρόπο υπολογίζεται η πεπλεγμένη ροή για καθένα από τα τρία πηνία σε σχέση σε σχέση με το μήκος ή τη γωνία της μετακίνησης (Σχήμα 4.7). Όπως, ήταν αναμενόμενο η μορφή της είναι ημιτονοειδής. Στη συνέχεια υπολογίζεται η ενεργός τιμή της πεπλεγμένης ροής που είναι χρήσιμη για τις προσομοιώσεις του κεφαλαίου 7.



Σχήμα 4.7: Πεπλεγμένη ροή της φάσης Α σε σχέση με την γωνία περιστροφής.

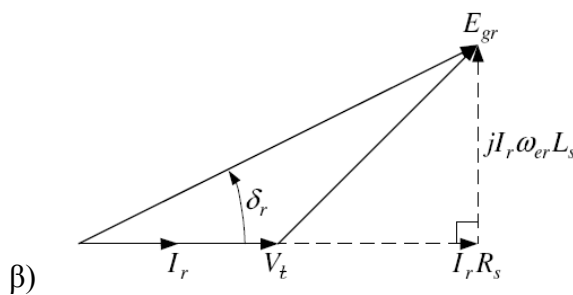
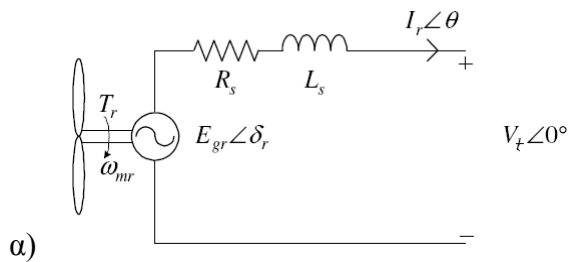
Ο χρόνος της μετακίνησης ισούται με την μηχανική γωνία περιστροφής προς την γωνιακή ταχύτητα. Έτσι, προκύπτει η σχέση της πεπλεγμένης ροής σε σχέση με τον χρόνο της μετακίνησης για συγκεκριμένη ταχύτητα περιστροφής. Η ΗΕΔ προκύπτει παραγωγίζοντας την πεπλεγμένη ροή ανά φάση ως προς τον χρόνο. Στο Σχήμα 4.8 παριστάνεται η κυματομορφή της αναπτυσσόμενης ΗΕΔ και των τριών φάσεων για ταχύτητα περιστροφής $500RPM$. Εκτός από την ημιτονοειδή μορφή αξίζει να παρατηρήσουμε την σωστή ανάπτυξη τριφασικού συστήματος με διαφορά φάσης 120° μεταξύ δύο διαδοχικών φάσεων.



Σχήμα 4.8: Κυματομορφή της αναπτυσσόμενης ΗΕΔ και στις τρεις φάσεις ($n=500\text{RPM}$)

Για τον υπολογισμό της ηλεκτρομαγνητικής ροπής χρειάζεται να τοποθετηθεί κατάλληλο ρεύμα στο τύλιγμα. Για να γίνει αυτό κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν σε βασικές σχέσεις που ισχύουν όταν η γεννήτρια παράγει μόνο ενεργό ισχύ ($\cos\phi=1$) που είναι και η περίπτωση που θα δούμε σε όλες τις εφαρμογές ανεμογεννητριών αυτής της εργασίας.

Στο Σχήμα 4.9α παριστάνεται το ισοδύναμο κύκλωμα μίας ανεμογεννήτριας με σύγχρονη γεννήτρια που πρόκειται να συνδεθεί σε μία μη ελεγχόμενη ανόρθωση πλήρους γέφυρας. Η ανόρθωση επιβάλλει μοναδιαίο συντελεστή ισχύος στην είσοδο του. Έτσι, το ρεύμα γραμμής είναι συμφασικό με την τερματική τάση της γεννήτριας, οπότε προκύπτει το διανυσματικό διάγραμμα του Σχήματος 4.9β.



Σχήμα 4.9: Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας σε εφαρμογή ανεμογεννήτριας (α), διανυσματικό διάγραμμα της γεννήτριας συνδεδεμένης σε ανορθωτή(β).

Από το διανυσματικό διάγραμμα προκύπτουν εύκολα οι σχέσεις για τη γωνία ισχύος δ :

$$\cos \delta = \frac{Vt + I_{rms} \cdot R_s}{Ef} \quad (4.20)$$

$$\sin \delta = \frac{I_{rms} \cdot \omega_e \cdot L_s}{Ef} \quad (4.21)$$

Η ηλεκτρομαγνητική ισχύς της γεννήτριας ισούται με το άθροισμα της ενεργού ισχύος στους ακροδέκτες της γεννήτριας και των ωμικών απωλειών χαλκού αν αγνοήσουμε τις πιθανές απώλειες πυρήνα ή τις απώλειες δινορευμάτων του τυλίγματος.

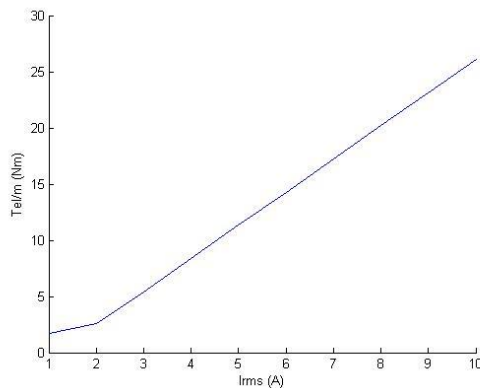
$$P_{H/M} = 3Vt \cdot I_{rms} + 3I_{rms}^2 \cdot R_s \quad (4.22)$$

Λύνοντας την εξίσωση δευτέρου βαθμού υπολογίζεται το ρεύμα γραμμής:

$$I_{rms} = \frac{\sqrt{Vt^2 + \frac{4}{3} R_s \cdot P_{H/M}} - Vt}{2R_s} \quad (4.23)$$

Με βάση την σχέση (4.21) υπολογίζεται στο ίδιο πρόγραμμα η γωνία ισχύος δ και εγκαθίστανται κατάλληλα ημιτονοειδή ρεύματα στο τύλιγμα. Ταυτόχρονα μετακινώντας με την αντίστοιχη γωνιακή ταχύτητα τον δρομέα, υπολογίζεται η ηλεκτρομαγνητική δύναμη με χρήση του τανυστή Maxwell, η οποία πολλαπλασιαζόμενη με τη μέση ακτίνα της μηχανής δίνει την ηλεκτρομαγνητική ροπή.

Η μέση τιμή της ηλεκτρομαγνητικής ροπής που υπολογίστηκε για διάφορα ρεύματα γραμμής παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.10. Στην επόμενο παράγραφο θα υπολογιστεί η ηλεκτρομαγνητική ροπή με βάση το ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας που δίνει πιο ακριβή αποτελέσματα.

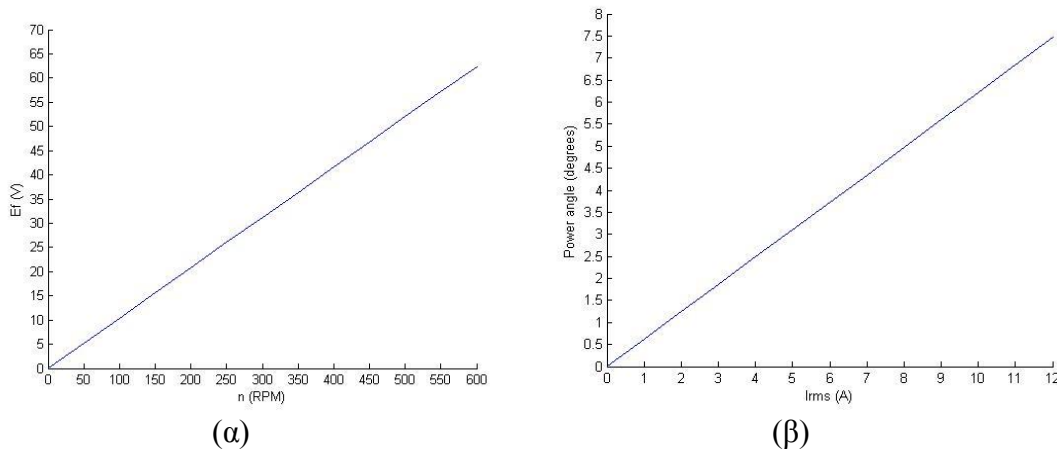


Σχήμα 4.10: Ηλεκτρομαγνητική ροπή σε σχέση με το ρεύμα γραμμής με βάση την προσομοίωση στο FEMM.

4.2.3: Επιδόσεις της γεννήτριας

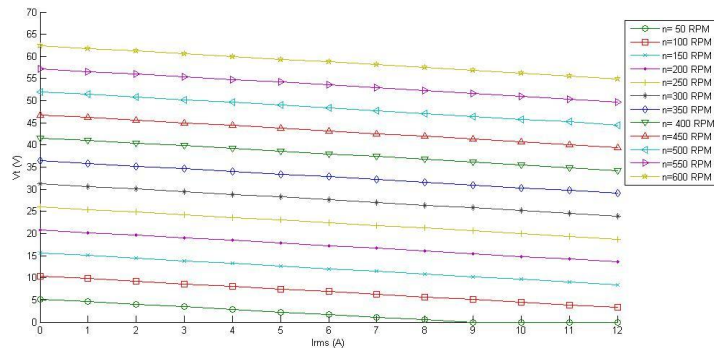
Στην παράγραφο αυτή για διάφορες τιμές του ρεύματος γραμμής και της ταχύτητας περιστροφής θα υπολογιστούν χρήσιμα ηλεκτρικά και μηχανικά μεγέθη. Το πλήρες πρόγραμμα που υλοποιήθηκε βρίσκεται στο Παράρτημα Β

Η σχέση της ΗΕΔ με την ταχύτητα περιστροφής είναι ως γνωστόν γραμμική και παριστάνεται στο Σχήμα 4.11α. Η γωνία ισχύος δ υπολογίζεται από την σχέση (4.21). Η μικρή σύγχρονη αντίδρασης οδηγεί σε μικρές τιμές της γωνίας δ που εξηγεί την γραμμική της σχέση με το ρεύμα γραμμής (Σχήμα 4.11β).



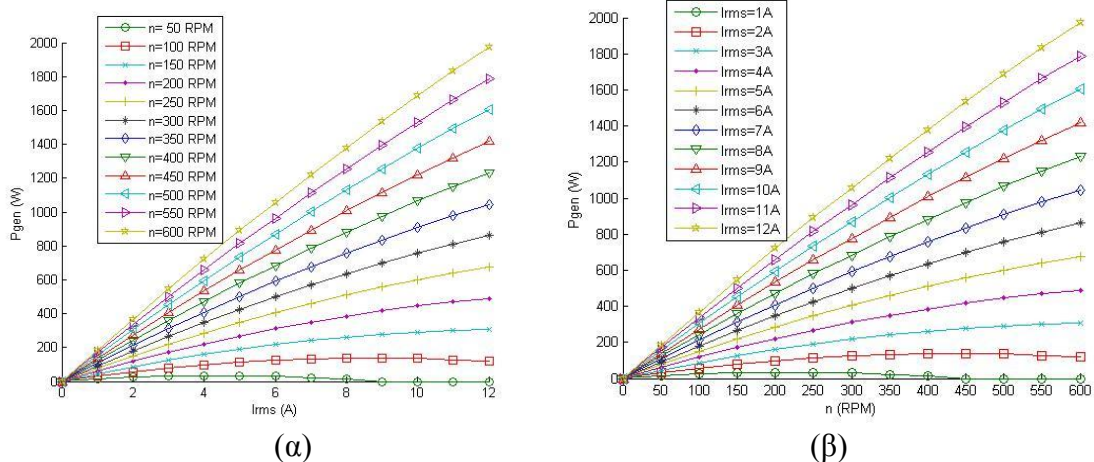
Σχήμα 4.11: ΗΕΔ σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής (α). Γωνία ισχύος δ σε σχέση με το ρεύμα γραμμής(β).

Η σχέση της τερματικής τάσης με το ρεύμα γραμμής για διάφορες ταχύτητες περιστροφής παριστάνεται στο Σχήμα 4.12. Για δεδομένη ταχύτητα περιστροφής όταν αυξάνεται το ρεύμα αυξάνεται η πτώση τάσης και μειώνεται η τερματική τάση. Η γραμμική τους σχέση οφείλεται στη μικρή τιμή της σύγχρονης αυτεπαγωγής. Για μεγαλύτερες ταχύτητες περιστροφής η ΗΕΔ αυξάνεται οπότε αυξάνεται και η τερματική τάση.



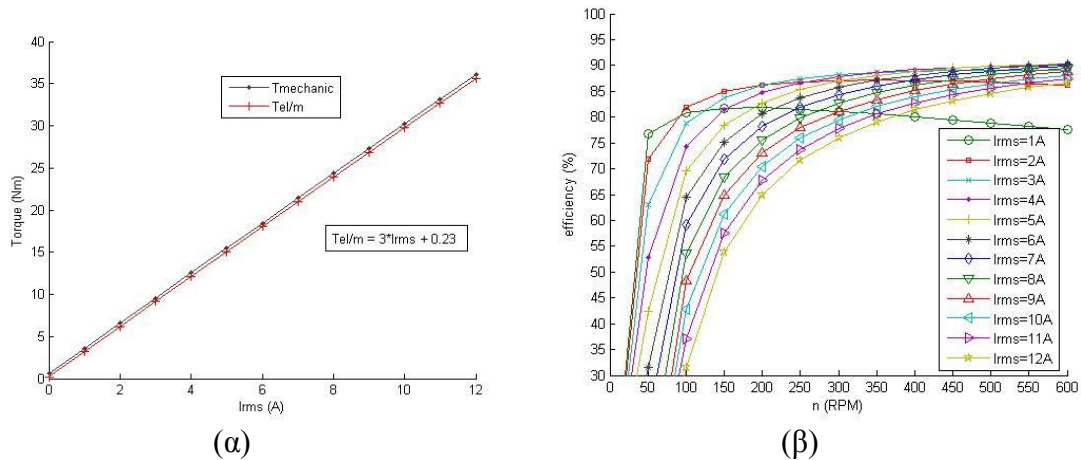
Σχήμα 4.12: Τερματική τάση σε σχέση με το ρεύμα γραμμής για διάφορες ταχύτητες περιστροφής.

Η μεταβολή της ηλεκτρικής ισχύος σε σχέση με το ρεύμα για διάφορες ταχύτητες περιστροφής και της ισχύος σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής για διάφορα ρεύματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.13α και 4.13β αντίστοιχα. Η σχεδόν γραμμική σχέση της ισχύος με το ρεύμα για δεδομένη ταχύτητα περιστροφής οφείλεται στην μικρή μείωση της τερματικής τάσης με την αύξηση του ρεύματος. Για μεγαλύτερες τιμές της ταχύτητας περιστροφής η παραγόμενη ισχύς αυξάνεται. Η κατά προσέγγιση γραμμική σχέση της ισχύος με την ταχύτητα περιστροφής για δεδομένο ρεύμα οφείλεται στην σχεδόν γραμμική σχέση της τερματικής τάσης με την ταχύτητα περιστροφής. Για μεγαλύτερα ρεύματα η παραγόμενη ισχύς αυξάνεται.



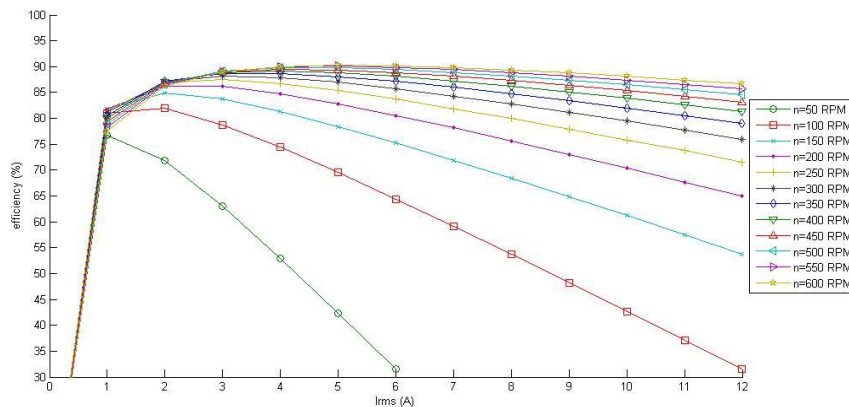
Σχήμα 4.13: Ηλεκτρική ισχύς σε σχέση με το ρεύμα γραμμής για διάφορες ταχύτητες περιστροφής(α). Ηλεκτρική ισχύς σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής για διάφορα ρεύματα γραμμής(β).

Η μεταβολή της ηλεκτρομαγνητικής ροπής και της μηχανικής ροπής στον άξονα σε σχέση με το ρεύμα γραμμής χαράσσονται στο Σχήμα 4.14α. Ως γνωστόν η ηλεκτρομαγνητική ροπή είναι ανεξάρτητη της ταχύτητας περιστροφής και η ακριβής σχέση της με το ρεύμα αναγράφεται στο Σχήμα 4.14α και θα χρησιμοποιηθεί στις προσομοιώσεις του κεφαλαίου 7.



Σχήμα 4.14: Ηλεκτρομαγνητική ροπή και μηχανική ροπή στον άξονα σε σχέση με το ρεύμα γραμμής(α). Απόδοση της γεννήτριας σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής για διάφορα ρεύματα γραμμής(β).

Τέλος, παρουσιάζεται η μεταβολή της απόδοσης της γεννήτριας σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής για διάφορα ρεύματα γραμμής (Σχήμα 4.14β) και η μεταβολή της απόδοσης σε σχέση με το ρεύμα για διάφορες ταχύτητες περιστροφής (Σχήμα 4.15). Για δεδομένο ρεύμα, αύξηση της ταχύτητας περιστροφής οδηγεί σε σημαντική αύξηση της παραγόμενης ισχύος ενώ οι απώλειες περιστροφής και δινορευμάτων αυξάνονται λιγότερο. Αύξηση του ρεύματος για δεδομένη ταχύτητα περιστροφής οδηγεί σε μεγαλύτερες απώλειες χαλκού που είναι οι κυρίαρχες απώλειες της γεννήτριας με αποτέλεσμα να μειώνεται η απόδοση της.



Σχήμα 4.15: Απόδοση της γεννήτριας σε σχέση με το ρεύμα γραμμής για διάφορες ταχύτητες περιστροφής

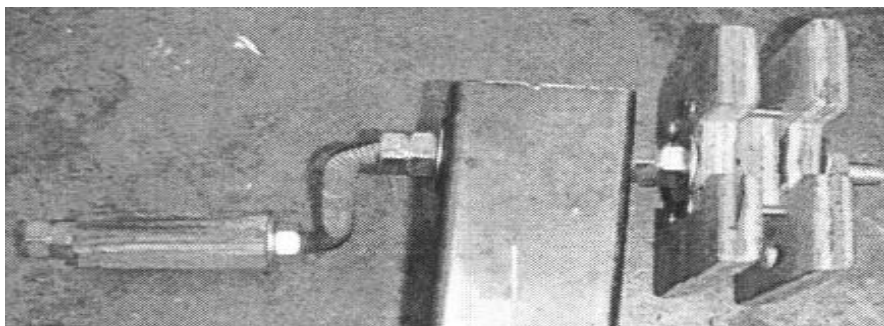
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ

5.1: Τρόπος κατασκευής της γεννήτριας

5.1.1: Κατασκευή του στάτη

Η γεννήτρια αξονικής ροής μονίμων μαγνητών χωρίς πυρήνα στον στάτη παρουσιάζει απλότητα στον τρόπο κατασκευής. Η κατασκευή της γεννήτριας βασίστηκε στις λεπτομερείς οδηγίες που βρίσκονται στο [1] πραγματοποιήθηκε χωρίς να χρειάζονται εξειδικευμένα εργαλεία ούτε κάποια σημαντική κατασκευαστική εμπειρία. Τα βασικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται είναι ηλεκτρική σέγα, πριόνια, λίμες, επιτραπέζιο δράπανο, ηλεκτρικός τροχός, ηλεκτροσυγκόλληση, βιδολόγος κ.α.

Αρχικά κατασκευάζεται από ξύλο η μηχανή χειρός που χρησιμεύει στην περιέλιξη των πηνίων και φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Οι διαστάσεις της επιλέγονται ίσες με τις επιθυμητές εσωτερικές διαστάσεις των πηνίων. Τυλίγονται 9 πηνία από καλώδιο τυλίγματος διαμέτρου 1.5mm^2 , όπου το καθένα αποτελείται από 90 ελίγματα.



Σχήμα 5.1: Μηχανή χειρός για την περιέλιξη των πηνίων.

Τα πηνία πρόκειται να τοποθετηθούν σε μία πλάκα από πολυεστερική ρητίνη που θα τα κρατά στη θέση τους και θα εξασφαλίζει μηχανική αντοχή. Για να γίνει αυτό χρειάζεται να κατασκευαστεί πρώτα ένα καλούπι στο οποίο στη συνέχεια θα γίνει έγχυση της ρητίνης. Το καλούπι κατασκευάζεται από τρία ξύλα τύπου κόντρα πλακέ όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2. Το κάτω κόντρα πλακέ είναι η βάση και το πάνω χρησιμεύει ως καπάκι μετά την έγχυση της ρητίνης ώστε η πλάκα που θα προκύψει να είναι επίπεδη. Το μεσαίο κόβεται εσωτερικά σε κατάλληλες διαστάσεις ώστε να δημιουργηθεί ο χώρος στον οποίο θα τοποθετηθούν τα πηνία. Παράλληλα, κόβεται ένας μικρός δίσκος ιδίου πάχους που τοποθετείται στο κέντρο του μεσαίου κόντρα πλακέ ώστε η πλάκα που θα προκύψει να είναι κενή στο κέντρο της για να μπορεί να περιστρέφεται ο άξονας της γεννήτριας.



Σχήμα 5.2: Καλούπι κατασκευής του στάτη.

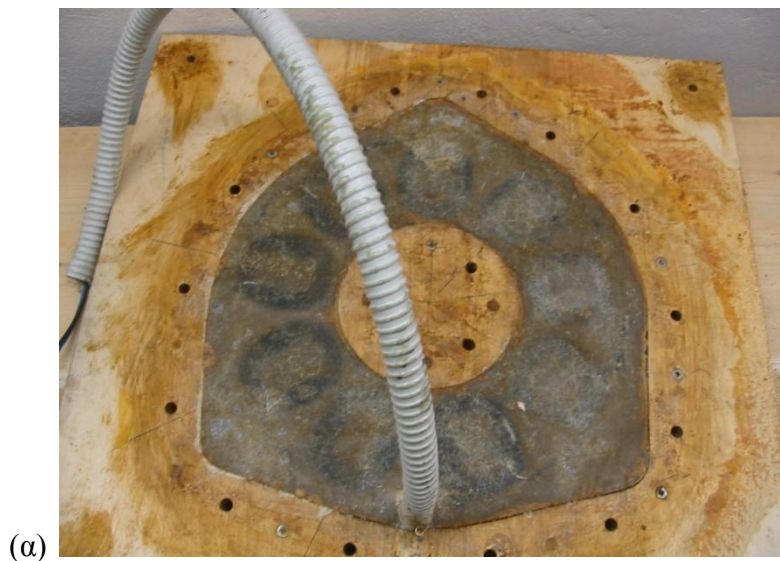
Στη συνέχεια τα πηνία τοποθετούνται στο καλούπι χωρίς το καπάκι του σε θέσεις που καθορίζονται από την εσωτερική διάμετρο του τυλίγματος της γεννήτριας περιμετρικά και με συμμετρικό τρόπο (Σχήμα 5.3). Εφόσον υπάρχουν τρία πηνία ανά φάση, κάθε πηνίο συνδέεται σε σειρά με τα πηνία με τα οποία σχηματίζει γωνία 120° ως προς το κέντρο, ο ουδέτερος κόμβος προκύπτει συνδέοντας τη μία άκρη των καλωδίων των τριών φάσεων και η άλλη άκρη των καλωδίων των τριών φάσεων καταλήγει στην έξοδο. Οι συνδέσεις γίνονται χρησιμοποιώντας κολλητήρι .



Σχήμα 5.3: Σταθεροποίηση των πηνίων στις επιθυμητές θέσεις και πραγματοποίηση της συνδεσμολογίας.

Έχοντας εξασφαλίσει πως οι θέσεις των πηνίων είναι σωστές στο καλούπι έρχεται η ώρα για την έγχυση της ρητίνης. Πρώτα τοποθετείται κερί στα σημεία που δεν πρέπει να

κολλήσουν με την πλάκα ρητίνης, όπως είναι ο κεντρικός δίσκος και τα τοιχώματα. Η πολυεστερική ρητίνη βρίσκεται σε υγρή μορφή και για να στερεοποιηθεί χρειάζεται να αναμειχθεί με κατάλληλη ποσότητα καταλύτη ο οποίος και αυτός είναι σε υγρή μορφή. Στο μείγμα τοποθετείται κατάλληλη ποσότητα ταλκ ώστε να προστεθεί όγκος. Παράλληλα, τοποθετούνται δύο λεπτά φύλλα από υαλονήματα στις δύο εξωτερικές πλευρές του στάτη ώστε να προσδοθεί μηχανική αντοχή. Οι αναλογίες οι οποίες εξαρτώνται και από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος πρέπει να τηρηθούν αυστηρά ώστε να αποφευχθεί αδυναμία στερεοποίησης ή πρόωρη στερεοποίηση του μείγματος. Στη συνέχεια το καλούπι αποσυναρμολογείται ξεβιδώνοντας τις βίδες που συγκρατούν τα τρία κόντρα πλακέ και αφαιρείται η έτοιμη πλάκα του στάτη (Σχήμα 5.4).



(α)



(β)

Σχήμα 5.4: (α) Η πλάκα του στάτη μέσα στο καλούπι μετά την στερεοποίηση της ρητίνης. (β) Η πλάκα του στάτη έτοιμη για τοποθέτηση.

5.1.2: Κατασκευή του δρομέα

Ο δρομέας αποτελείται από δύο χαλύβδινους δίσκους περιμετρικά των οποίων είναι τοποθετημένοι μόνιμοι μαγνήτες. Αρχικά αφαιρείται από το κέντρο των δίσκων κυκλικός δίσκος κατάλληλης διαμέτρου ώστε να μπορεί γίνει η σύνδεση με το ρουλεμάν και να μειωθεί η μάζα του δρομέα. Στη συνέχεια ανοίγονται τέσσερις τρύπες στον κάθε δίσκο με το επιτραπέζιο δράπανο για να περάσει ο άξονας της γεννήτριας που αποτελείται από τέσσερις ντίζες. Δύο τρύπες με σπείρωμα ανοίγονται με βιδολόγο στον ένα δίσκο ώστε να διευκολυνθεί η συναρμολόγηση.

Έπειτα, τοποθετούνται οι 24 μόνιμοι μαγνήτες περιμετρικά των δύο δίσκων με βάση την εσωτερική διάμετρο της γεννήτριας με συμμετρικό τρόπο. Διαδοχικοί μαγνήτες στον ίδιο δίσκο έχουν αντίθετη πολικότητα και αντικριστοί μαγνήτες στον απέναντι δίσκο έχουν επίσης αντίθετη πολικότητα. Οι μαγνήτες τοποθετούνται με ισχυρή κόλλα.

Για επιπλέον μηχανική αντοχή και σταθεροποίηση των μαγνητών πάνω στους δίσκους, ο κάθε δίσκος με τους αντίστοιχους μαγνήτες τοποθετείται μέσα σε μία πλάκα ρητίνης. Με παρόμοιο τρόπο με την κατασκευή του καλουπιού του στάτη, κατασκευάζονται τα καλούπια του δρομέα χρησιμοποιώντας τρία κόντρα πλακέ για το καθένα και τοποθετώντας έναν κεντρικό ξύλινο δίσκο εκεί από όπου αρχικά είχε αφαιρεθεί χάλυβας. Στη συνέχεια, αφού απλωθεί το κερί, τοποθετείται φύλλο από υαλονήματα στη πλευρά που βρίσκονται οι μαγνήτες του κάθε δίσκου για επιπλέον μηχανική αντοχή, γίνεται έγχυση του μείγματος πολυεστερικής ρητίνης, καταλύτη και ταλκ και ο δίσκος είναι έτοιμος (Σχήμα 5.5).



Σχήμα 5.5: Ο ένας δίσκος του δρομέα έτοιμος για τοποθέτηση.

5.1.3: Χαλύβδινη κατασκευή στήριξης

Έχοντας, ετοιμάσει τον στάτη και τον δρομέα της γεννήτριας προκύπτει η ανάγκη σύνδεσης τους με τον ιστό στήριξης, την έλικα και την ουρά της ανεμογεννήτριας. Χρησιμοποιώντας ηλεκτροσυγκόλληση δημιουργείται η κατασκευή που φαίνεται στο Σχήμα 5.6.



Σχήμα 5.6: Η χαλύβδινη κατασκευή στήριξης.

Ένας σωλήνας κατάλληλης διαμέτρου τοποθετείται στο δεξί μέρος της κατασκευής στήριξης και προσαρμόζεται στον κατακόρυφο ιστό της ανεμογεννήτριας. Τοποθετώντας γράσο στο σωλήνα και στον ιστό γίνεται εφικτή η περιστροφή της ανεμογεννήτριας ως προς τον κατακόρυφο άξονα για την προσαρμογή της στην κύρια κατεύθυνση του ανέμου (σύστημα yaw). Για την στήριξη του δρομέα χρησιμοποιείται ένα ρουλεμάν αυτοκινήτου (μουαγιέ) στο οποίο περνούν οι τέσσερις ντίζες του άξονα περιστροφής και προσαρμόζεται με βίδες στη χαλύβδινη κατασκευή στήριξης. Το ρουλεμάν αυτό είναι μεγάλο και στιβαρό και μόνο του αρκεί για τη στήριξη του δρομέα της γεννήτριας και της έλικας. Ο στάτης στηρίζεται σε τρία σταθερά σημεία πάνω στη χαλύβδινη κατασκευή. Μία ελαφριά κλίση προς τα πάνω σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο δίνεται στη χαλύβδινη κατασκευή ώστε σε περίπτωση ισχυρού ανέμου να μην είναι δυνατή η πρόσκρουση της έλικας πάνω στον κατακόρυφο ιστό.

Τέλος ένας μικρότερος σωλήνας τοποθετείται στο πίσω δεξί μέρος της κατασκευής σε κατάλληλη γωνία ως προς την κατακόρυφο σωλήνα. Σε αυτόν προσαρμόζεται ένας άλλος σωλήνας που είναι συνδεδεμένος με την ουρά της ανεμογεννήτριας. Οι δύο αυτοί σωλήνες επιτρέπουν την σχετική κίνηση μεταξύ της κατασκευής στήριξης και της ουράς ώστε σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου η έλικα να εκτρέπεται από την κύρια κατεύθυνση του ανέμου (σύστημα furling) για την προστασία της ανεμογεννήτριας. Τέλος, όλα τα χαλύβδινα μέρη πρέπει να περασθούν με αντισκωριακό χρώμα.

5.1.4: Συναρμολόγηση της γεννήτριας

Για να γίνει η συναρμολόγηση της γεννήτριας με ευκολία τοποθετείται η κατασκευή στήριξης σε κατακόρυφο ιστό χαμηλού ύψους. Οι τέσσερις ντίζες του άξονα περιστροφής προσαρμόζονται πάνω στο ρουλεμάν. Πρώτα τοποθετείται ο πίσω δίσκος του δρομέα μέχρι να ακουμπήσει στο κινούμενο μέρος του ρουλεμάν. Για να κρατιέται σταθερή η απόσταση μεταξύ των δύο δίσκων του δρομέα τοποθετούνται διαδοχικά παξιμάδια στις ντίζες. Στη συνέχεια η πλάκα του στάτη ωθείται προς τον πίσω δίσκο του δρομέα και βιδώνεται προσωρινά στα τρία σημεία στήριξης της (Σχήμα 5.7). Για την τοποθέτηση του εμπρόσθιου δίσκου του δρομέα χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή λόγω των ελκτικών δυνάμεων που ασκούνται μεταξύ των μαγνητών των δύο δίσκων, που μπορεί να προκαλέσουν πρόβλημα κατά τη συναρμολόγηση. Για αυτό τοποθετούνται βίδες στις δύο τρύπες με σπείρωμα που ανοίχτηκαν στον μπροστά δίσκο του δρομέα. Ο δίσκος σπρώχνεται μέχρι οι δύο βίδες να ακουμπήσουν τον άλλο χαλύβδινο δίσκο. Στη συνέχεια ξεβιδώνοντας τις βίδες αργά γίνεται ομαλά η τοποθέτηση και του δεύτερου δίσκου.



Σχήμα 5.7: Συναρμολόγηση της γεννήτριας.

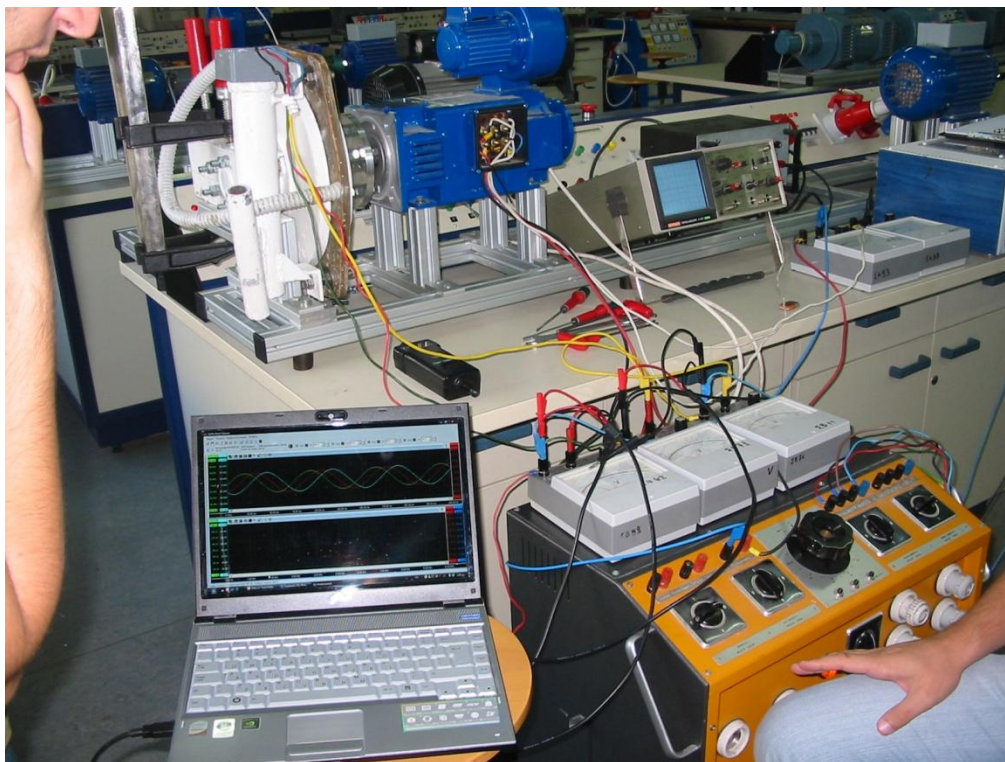
Η απόσταση μεταξύ των δύο δίσκων του δρομέα έχει καθοριστεί από τα παξιμάδια που βρίσκονται ανάμεσα τους πάνω στις ντίζες του άξονα περιστροφής. Ο στάτης τώρα προσαρμόζεται ώστε να απέχει ίση απόσταση από τους δύο δίσκους και βιδώνεται οριστικά. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται ώστε η απόσταση του στάτη από κάθε έναν από τους δύο δίσκους να είναι γύρω στο 1mm. Μικρότερη απόσταση αυξάνει την πιθανότητα επαφής του στάτη και του δρομέα κατά την περιστροφή, ενώ μεγαλύτερη απόσταση μειώνει την μαγνητική επαγωγή στο διάκενο της μηχανής. Τελειώνοντας, στις τέσσερις ντίζες του άξονα τοποθετείται πρώτα ο πίσω ξύλινος δίσκος της πλήμνης της έλικας, εν συνεχεία τα τρία περύγια και μετά ο μπροστά δίσκος της πλήμνης και βιδώνονται με παξιμάδια. Σε όλες τις βίδες τοποθετείται κατάλληλο υλικό που εμποδίζει το ξεβίδωμα τους.

5.2 Πειραματικές μετρήσεις

5.2.1: Πειραματική διάταξη και μετρούμενα μεγέθη

Μετά την κατασκευή της γεννήτριας, κρίθηκε σκόπιμη η μέτρηση της στο εργαστήριο ηλεκτρικών μηχανών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Η γεννήτρια αξονικής ροής συνδέθηκε με έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος τοποθετώντας μία ένωση στους άξονες των δύο μηχανών (Σχήμα 5.8). Επιλέχθηκε ο DC κινητήρας χάρη στην ευκολία μεταβολής της ταχύτητας περιστροφής του μέσω της τάσης του τυμπάνου του. Ο DC κινητήρας είναι ξένης διέγερσης και ονομαστική ισχύος 2.7kW.



Σχήμα 5.8: Πραγματοποίηση πειραματικών μετρήσεων στο εργαστήριο ηλεκτρικών μηχανών του Ε.Μ.Π.

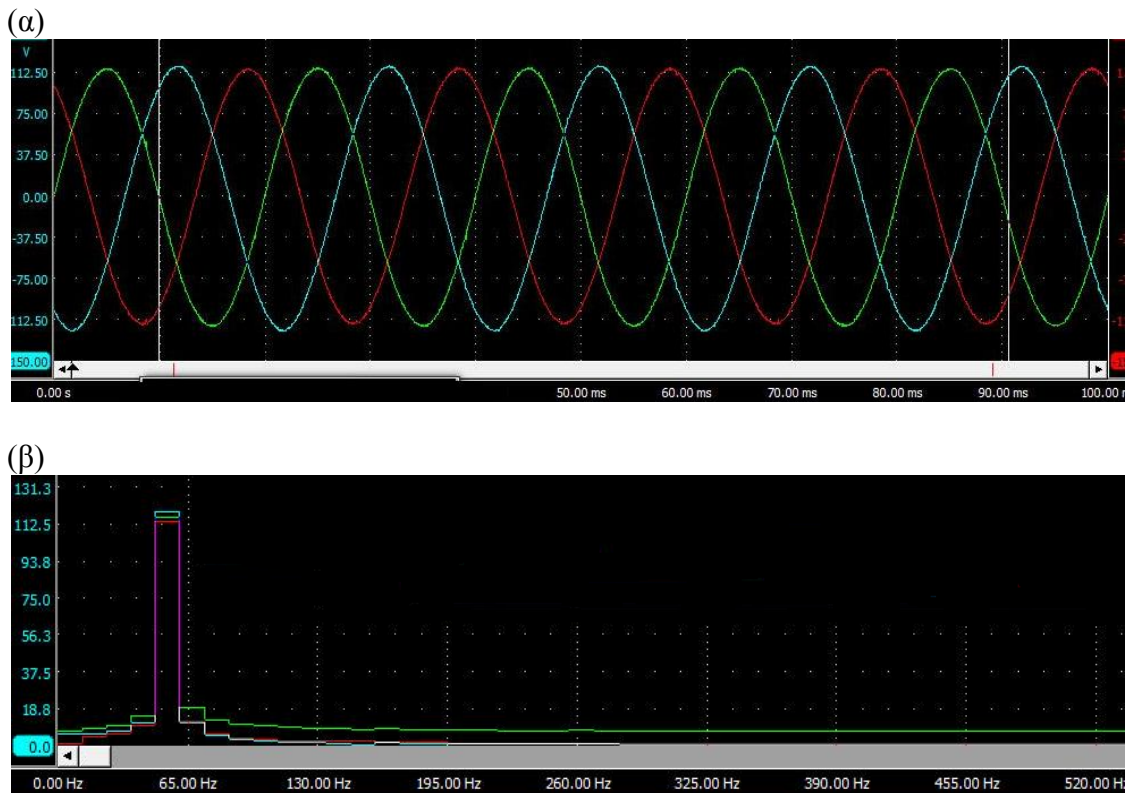
Η ταχύτητα περιστροφής μετρήθηκε με στροφόμετρο στοχεύοντας τον άξονα περιστροφής. Αναλογικά βολτόμετρα και αμπερόμετρα χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση των τάσεων και των ρευμάτων του τυμπάνου της γεννήτριας και του τυμπάνου και της διέγερσης του DC κινητήρα.

5.2.2 Ηλεκτρεγερτική δύναμη της γεννήτριας και DC τάση ανοιχτοκύκλωσης συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής

Για την μέτρηση της ΗΕΔ που επάγεται στον στάτη αρκεί η μέτρηση της τάσης ανοιχτοκύκλωσης της γεννήτριας. Μεταβάλλοντας την τάση του τυμπάνου του κινητήρα μεταβάλλονται οι στροφές του. Για διάφορες τιμές των στροφών μετράμε με ένα βολτόμετρο την φασική τάση ανοιχτοκύκλωσης και για τις τρεις φάσεις και τις καταγράφουμε στον Πίνακα 5.1. Επίσης, με τη χρήση ψηφιακού παλμογράφου και του προγράμματος Tie Pie Multichannel βλέπουμε σε πραγματικό χρόνο την μορφή της κυματομορφής της πολικής ΗΕΔ (Σχήμα 5.9α) καθώς και την ανάλυση Fourier για τον υπολογισμό των αρμονικών της τάσης (Σχήμα 5.9β) σε ταχύτητα περιστροφής 500RPM που αντιστοιχεί σε συχνότητα 50Hz, εφόσον η γεννήτρια έχει 12 πόλους.

$n(RPM)$	$E_{fa}(V)$	$E_{fb}(V)$	$E_{fc}(V)$	$E_{favg}(V)$
63,3	6,0	6,5	5,5	6,0
85,5	8,0	8,5	8,0	8,2
98,2	9,0	9,5	9,0	9,2
116,1	10,5	11,0	10,5	10,7
147,5	14,0	14,5	14,0	14,2
167,1	15,5	16,0	15,5	15,7
181,2	17,0	17,5	17,0	17,2
200,6	19,0	19,5	19,0	19,2
219,6	20,5	21,0	21,0	20,8
237,7	22,5	23,0	22,5	22,7
260,7	24,5	25,0	25,0	24,8
281,2	26,5	27,5	26,5	26,8
303,6	28,5	29,5	29,0	29,0
323,7	30,0	31,5	31,0	30,8
340,0	31,5	33,0	32,5	32,3
360,5	33,5	35,0	34,5	34,3
382,2	35,5	37,0	36,5	36,3
399,4	37,0	38,5	38,0	37,8
423,0	39,0	41,0	40,0	40,0
439,4	40,5	42,5	41,5	41,5
462,3	43,0	44,5	44,0	43,8
482,4	44,5	46,5	46,0	45,7
502,0	46,0	48,5	47,5	47,3
523,6	48,0	50,5	49,5	49,3
538,1	49,5	52,0	51,0	50,8
560,3	51,5	54,0	53,0	52,8
580,0	53,0	56,0	55,0	54,7
602,5	55,0	58,0	58,0	57,0

Πίνακας 5.1: Σχέση των φασικών ΗΕΔ με την ταχύτητα περιστροφής και για τις τρεις φάσεις.

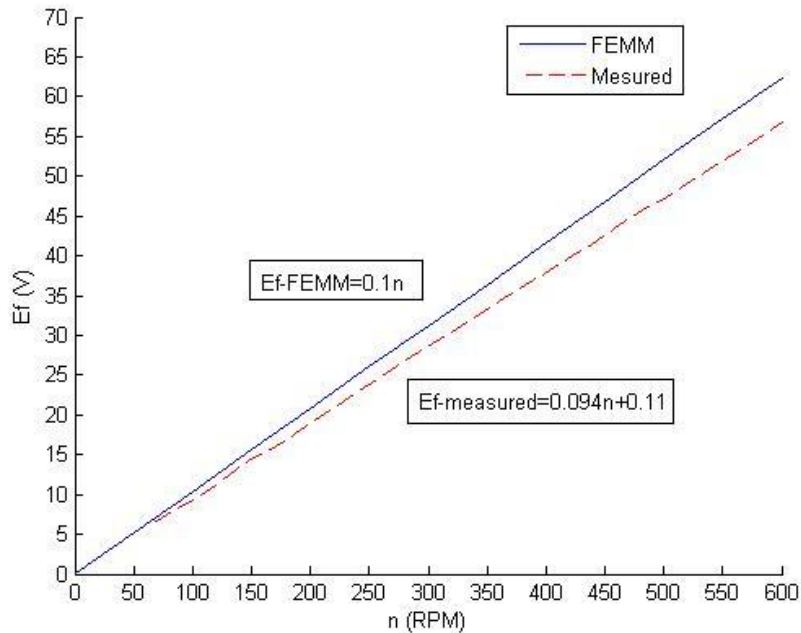


Σχήμα 5.9: Μετρήσεις ψηφιακού παλμογράφου: (α) Κυματομορφή της πολικής HEΔ για ταχύτητα περιστροφής 500RPM. (β) Ανάλυση Fourier της HEΔ για ταχύτητα περιστροφής 500RPM.

Από το σχήμα είναι εμφανές πως η κυματομορφή της τάσης είναι ημιτονοειδής. Η ανάλυση Fourier επιβεβαιώνει πως εκτός από την θεμελιώδη συνιστώσα αρμονικές μεγαλύτερης συχνότητας δεν υπάρχουν. Η ημιτονοειδής κυματομορφή της HEΔ ήταν αναμενόμενη και έχει εξηγηθεί στην παράγραφο 3.5.2.2.

Επίσης, από τον Πίνακα 1 και το Σχήμα 5.9α παρατηρούμε πως οι τιμές των τριών φάσεων είναι κοντινές και πως υπάρχει καλή συμμετρία μεταξύ τους. Οι μικρές αποκλίσεις οφείλονται σε διαφορετικό αριθμό ελιγμάτων ανά φάση λόγω σφάλματος κατά την περιέλιξη.

Στη συνέχεια με βάση τα αποτελέσματα του Πίνακα 1 αναπαριστούμε γραφικά τη σχέση του μέσου όρου της HEΔ με την ταχύτητα περιστροφής (Σχήμα 5.10). Στο ίδιο διάγραμμα παριστάνεται η σχέση της HEΔ με την ταχύτητα περιστροφής που προέκυψε από την προσομοίωση της παραγράφου 4.2.3.



Σχήμα 5.10: Σχέση της φασικής ΗΕΔ με την ταχύτητα περιστροφής με βάση τις πειραματικές μετρήσεις και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Η ΗΕΔ μεταβάλλεται γραμμικά με την ταχύτητα περιστροφής, εφόσον αύξηση της ταχύτητας περιστροφής οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού μεταβολής της πεπλεγμένης ροής στο τύλιγμα. Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη σχέση των δύο μεγεθών για τις πειραματικές τιμές και τις τιμές της προσομοίωσης υπολογίζονται με γραμμική παρεμβολή και φαίνονται στο Σχήμα 5.10.

Για ταχύτητα περιστροφής 500RPM η απόκλιση της τιμής της προσομοίωσης από τη μετρούμενη είναι 9,9%. Η τιμή αυτή θεωρείται ικανοποιητική, εφόσον αφενός η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων εμπεριέχει σφάλμα, και αφετέρου η γεωμετρία της προσομοίωσης έχει γίνει για λόγους απλότητας δισδιάστατη. Επίσης, σφάλμα εμπεριέχεται και στις μετρούμενες τιμές.

Η ενεργός τιμή της πεπλεγμένης ροής σε κενό φορτίο μπορεί να υπολογιστεί για ταχύτητα 500RPM με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα:

$$\text{fluxoc} = \frac{Ef}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{47.3}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0.15 \text{Wb}$$

Η γεννήτρια κατά τη λειτουργία ανεμογεννήτριας συνδέεται με μία μη ελεγχόμενη ανόρθωση. Έτσι, στο εργαστήριο συνδέουμε τις τρεις φάσεις της γεννήτριας με μία τριφασική μη ελεγχόμενη ημιανόρθωση και μετράμε την ανορθωμένη τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{dc-oc} . Οι μετρούμενες τιμές καταγράφονται στον Πίνακα 5.2.

$n(RPM)$	$E_{fa}(V)$	$E_{fb}(V)$	$E_{fc}(V)$	$E_{favg}(V)$	$V_{dc-oc}(V)$ <i>measured</i>	$V_{dc-oc}(V)$ <i>calculated</i>
100,40	9,50	9,50	9,50	9,50	22,00	22,21
201,80	19,00	19,50	19,00	19,17	45,00	44,82
300,20	28,00	29,00	28,50	28,50	67,00	66,64
402,40	37,00	39,00	38,00	38,00	90,00	88,85
500,00	46,00	48,00	47,50	47,17	112,50	110,29
606,80	55,50	58,50	57,50	57,17	137,50	133,67

Πίνακας 5.2: Τιμές των φασικών ΗΕΔ και της DC τάσης ανοιχτοκύκλωσης σε διαφορές ταχύτητες περιστροφής.

Στην 6^η στήλη του πίνακα καταγράφονται οι μετρούμενες τιμές ενώ στην 7^η οι υπολογισμένες τιμές της DC τάσης ανοιχτοκύκλωσης με βάση την σχέση [24]:

$$V_{dc} = \sqrt{3} \cdot 1.35 \cdot V_{ac}$$

Η μέγιστη απόκλιση μεταξύ πραγματικών και θεωρητικών τιμών υπολογίζεται 2.78% και είναι ικανοποιητική.

5.2.3: Τερματική τάση της γεννήτριας υπό μεταβλητό φορτίο

Συνδέουμε την γεννήτρια με ένα τριφασικό συμμετρικό καθαρά ωμικό μεταβλητό φορτίο. Μεταβάλλοντας την αντίσταση του φορτίου μεταβάλλεται το ρεύμα που το διαρρέει άρα και η ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας. Έτσι, κάθε φορά που αυξάνουμε το ρεύμα του φορτίου, οι στροφές της γεννήτριας μειώνονται και για να τις κρατήσουμε στην επιθυμητή τιμή χρειάζεται να δώσουμε παραπάνω ισχύ στον DC κινητήρα. Στο εργαστήριο μετρήσαμε την μεταβολή της τάσης με το φορτίο για $n=500RPM$ και για ρεύμα μέχρι $I=3A$. Ιδανικά θα παίρναμε μέτρηση μέχρι και $I=12A$, αλλά ο DC κινητήρας δεν μπορούσε να δώσει περισσότερη ισχύ στις 500 στροφές χωρίς να υπερθερμανθεί. Η απουσία όμως πυρήνα στο στάτη της γεννήτριας που σημαίνει απουσία μαγνητικού κορεσμού και παράλληλα μικρή τιμή της αυτεπαγωγής οδηγεί σε γραμμική σχέση του ρεύματος με την τάση.

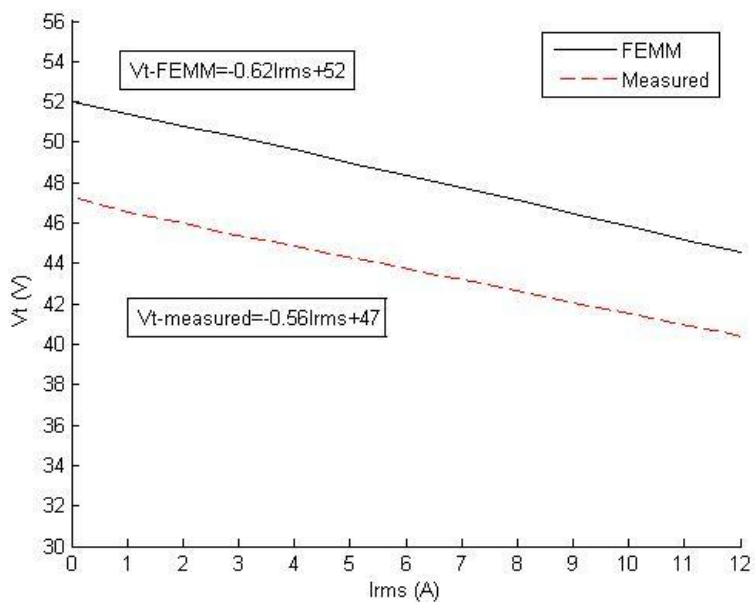
Στον Πίνακα 5.3 καταγράφουμε με έντονα γράμματα τις μετρούμενες τιμές της τερματικής φασικής τάσης της γεννήτριας για ρεύμα γραμμής από $I=1A$ μέχρι $I=2,8A$. Χρησιμοποιώντας γραμμική παρεμβολή υπολογίζουμε τις τιμές της τερματικής τάσης για ρεύμα μέχρι σχεδόν 13A. Η ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας για καθαρά ωμικό φορτίο υπολογίζεται κατά τα γνωστά από τη σχέση:

$$P_{el} = 3 \cdot V_t \cdot I$$

$I(A)$	$V_t(V)$	$P_{el}(W)$
1,0	46,5	139,5
2,0	46,0	276,0
2,8	45,5	382,2
3,7	45,0	504,0
4,6	44,5	618,6
5,5	44,0	730,4
6,4	43,5	839,6
7,3	43,0	946,0
8,2	42,5	1049,8
9,1	42,0	1150,8
10,0	41,5	1249,2
10,9	41,0	1344,8
11,8	40,5	1437,8
12,7	40,0	1528,0

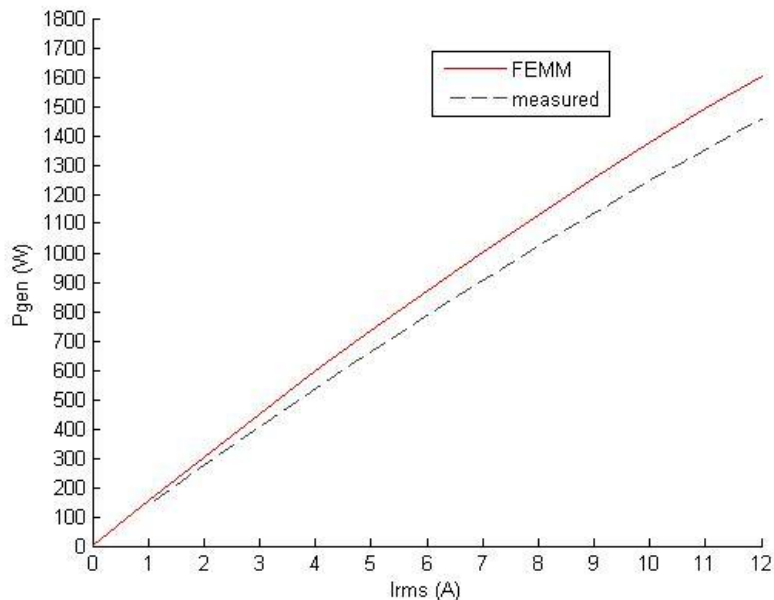
Πίνακας 5.3: Τερματική φασική τάση και ηλεκτρική ισχύς για διάφορα ρεύματα γραμμής.

Στη συνέχεια με βάση τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.3 αναπαριστούμε γραφικά τη σχέση της τερματικής τάσης με το ρεύμα γραμμής (Σχήμα 5.11) καθώς και τη σχέση της ηλεκτρικής ισχύος της γεννήτριας με το ρεύμα γραμμής (Σχήμα 5.12). Στα ίδια διαγράμματα παριστάνονται οι σχέσεις που προέκυψαν από την προσομοίωση της παραγράφου 4.2.3. Όπως εξηγήσαμε παραπάνω η σχέση της τερματικής τάσης και του ρεύματος είναι γραμμική, οπότε με γραμμική παρεμβολή υπολογίζουμε τις εξισώσεις για τις πειραματικές τιμές και την προσομοίωση.



Σχήμα 5.11: Σχέση της τερματικής τάσης με το ρεύμα γραμμής με βάση τις πειραματικές μετρήσεις και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

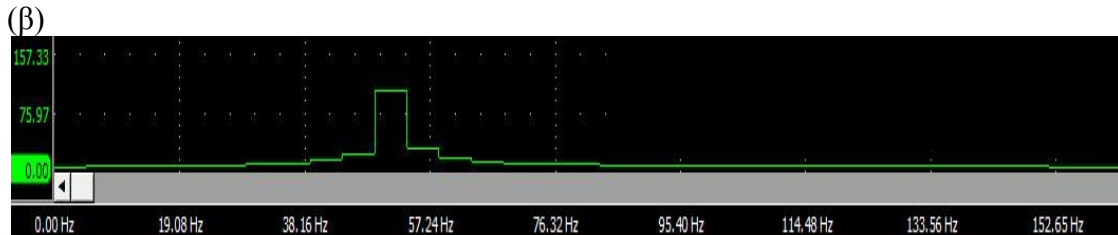
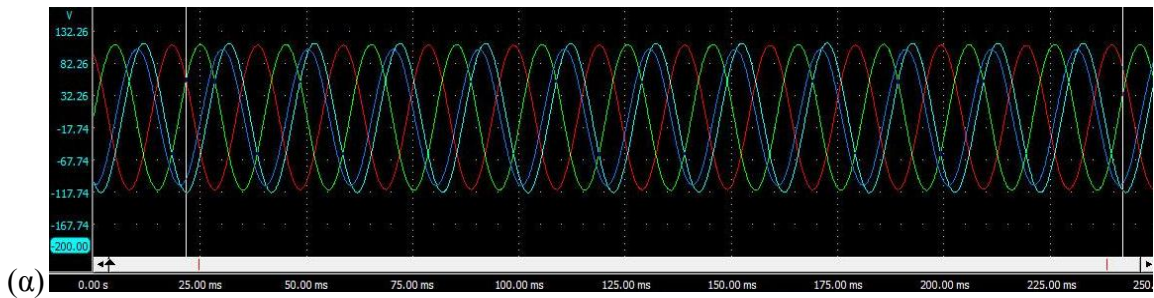
Για ταχύτητα περιστροφής 500RPM και ρεύμα γραμμής 5A η απόκλιση μεταξύ της τιμής της προσομοίωσης και της μετρούμενης είναι 10,8%. Η απόκλιση αυτή οφείλεται κυρίως στην διαφορά στις αναπτυσσόμενες ΗΕΔ και λιγότερο στην πτώση τάσης στην σύγχρονη αντίδραση και την αντίσταση της γεννήτριας εφόσον η κλίση των δύο ευθειών παίρνει κοντινές τιμές.



Σχήμα 5.12: Σχέση της ηλεκτρικής ισχύος της γεννήτριας με το ρεύμα γραμμής με βάση τις πειραματικές μετρήσεις και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Με τη χρήση ψηφιακού παλμογράφου και του προγράμματος Tie Pie Multichannel βλέπουμε την μορφή της κυματομορφής της πολικής τερματικής τάσης για ρεύμα γραμμής 3A (Σχήμα 5.13α) καθώς και την ανάλυση Fourier (Σχήμα 5.13β), όπου οι 500 στροφές αντιστοιχούν σε συχνότητα 50 Hz. Επίσης, στο ίδιο σχήμα φαίνεται και η κυματομορφή της έντασης του ρεύματος.

Η κυματομορφή της τάσης όπως ήταν αναμενόμενο εξακολουθεί να είναι ημιτονοειδής όπως και η κυματομορφή του ρεύματος που διέρχεται από το ωμικό φορτίο. Η ανάλυση Fourier επιβεβαιώνει πως εκτός από την θεμελιώδη συνιστώσα, αρμονικές μεγαλύτερης τάξης δεν υπάρχουν. Η πτώση τάσης στη γεννήτρια οφείλεται κυρίως στην ωμική αντίσταση της γεννήτριας και όχι τόσο στην επαγωγική αντίδραση η οποία παίρνει μικρές τιμές.



Σχήμα 5.13: Μετρήσεις ψηφιακού παλμογράφου: (α) Κυματομορφή της πολικής τερματικής τάσης για ταχύτητα περιστροφής 500RPM και ρεύμα γραμμής 3A. (β) Ανάλυση Fourier της πολικής τερματικής τάσης για ταχύτητα περιστροφής 500RPM και ρεύμα γραμμής 3A.

5.2.4: Μέτρηση της αντίστασης της γεννήτριας

Η αντίσταση της γεννήτριας μετρήθηκε μετά το πέρας των προηγούμενων πειραμάτων ώστε να έχει αναπτυχθεί η θερμοκρασία λειτουργίας στη μηχανή. Το τύλιγμα της γεννήτριας είναι σε συνδεσμολογία αστέρα με τον ουδέτερο να βρίσκεται στο εσωτερικό της γεννήτριας. Χρησιμοποιώντας ένα τροφοδοτικό εφαρμόζουμε μία DC τάση σε δύο φάσεις και μετράμε το DC ρεύμα. Από το νόμο του Ohm $R = \frac{V}{I}$ υπολογίζουμε την αντίσταση των δύο φάσεων και βρίσκουμε τη μέση τιμή της αντίστασης. Ακολουθούν οι μετρήσεις και οι υπολογισμοί στον Πίνακα 5.4.

Φάσεις A-B		
$I(A)$	$V_{A-B}(V)$	$R_{A-B}(\Omega)$
1,340	1,700	1,269
2,070	2,600	1,256
3,320	4,100	1,235
Φάσεις A-C		
$I(A)$	$V_{A-C}(V)$	$R_{A-C}(\Omega)$
1,040	1,300	1,250
2,110	2,600	1,232
3,320	4,100	1,235
Φάσεις B-C		
$I(A)$	$V_{B-C}(V)$	$R_{B-C}(\Omega)$
1,100	1,300	1,182
2,100	2,500	1,190
3,330	4,000	1,201
		$R_{avg}=1,228\Omega$

Πίνακας 5.4: Υπολογισμός της ωμικής αντίστασης δύο φάσεων από το μετρούμενο ρεύμα και την μετρούμενη τάση.

Για να βρούμε τη μέση τιμή της αντίστασης μίας φάσης διαιρούμε την μέση τιμή της αντίστασης δύο φάσεων δια δύο. Έτσι προκύπτει:

$$R_{\phi}=0.614\Omega$$

Συγκρίνοντας με την τιμή που υπολογίσαμε με αναλυτικό τρόπο στην παράγραφο 4.1.3 οι τιμές παρουσιάζουν μικρή απόκλιση.

Αντίστοιχα, ένας τρόπος υπολογισμού της σύγχρονης αυτεπαγωγής της γεννήτριας γίνεται με τη δοκιμή βραχυκυκλώματος. Στην περίπτωση όμως της γεννήτριας αξονικής ροής χωρίς πυρήνα στο στάτη, η τιμή της αυτεπαγωγής είναι πολύ μικρή και δεν μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια με τον παραπάνω τρόπο. Έτσι, θα αρκεστούμε στον υπολογισμό της αυτεπαγωγής με αναλυτικό τρόπο που γίνεται στην παράγραφο 4.1.3.

5.2.5 Υπολογισμός της απόδοσης της γεννήτριας συνδεδεμένη με ωμικό φορτίο.

Η απόδοση της γεννήτριας ισούται με την ηλεκτρική ενεργό ισχύ που παράγει η γεννήτρια προς την μηχανική ισχύ που δέχεται στον άξονα περιστροφής της. Η ηλεκτρική ισχύς μετριέται εύκολα με χρήση βολτόμετρου και αμπερομέτρου. Η μηχανική ισχύς μπορεί επίσης να μετρηθεί εύκολα μετρώντας την ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας με ένα στροφόμετρο και της μηχανικής ροπής που ασκείται πάνω στον άξονα της.

Λόγω μη διαθεσιμότητας μετρητικού οργάνου για την μηχανική ροπή, ακολουθήθηκε μία πιο σύνθετη και λιγότερη ακριβής μέθοδος υπολογισμού της απόδοσης της γεννήτριας.

Βολτόμετρα και αμπερόμετρα τοποθετήθηκαν στο τύμπανο και στη διέγερση του DC κινητήρα ώστε να μπορεί να μετρηθεί η ηλεκτρική ισχύς εισόδου του κινητήρα. Αφαιρώντας από την ηλεκτρική ισχύ του κινητήρα τις απώλειες χαλκού και πυρήνα καθώς και τις απώλειες περιστροφής του μπορούμε να υπολογίσουμε την μηχανική ισχύ εξόδου του κινητήρα. Η μηχανική ισχύς εξόδου του κινητήρα είναι η μηχανική ισχύς εισόδου της γεννήτριας. Οπότε, διαιρώντας την ηλεκτρική ισχύ εξόδου της γεννήτριας με την μηχανική ισχύ εισόδου της βρίσκουμε την απόδοση της.

Πιο συγκεκριμένα η ηλεκτρική ισχύς εισόδου του DC κινητήρα ισούται με το άθροισμα της ηλεκτρικής ισχύος του τυμπάνου και της διέγερσης:

$$P_{el dc} = V_{tdc} \cdot I_{tdc} + V_{fdc} \cdot I_{fdc}$$

και φαίνεται στην ένατη στήλη του Πίνακα 5.5.

Οι απώλειες χαλκού του κινητήρα είναι ίσες με το άθροισμά των απωλειών χαλκού του τυμπάνου και της διέγερσης του κινητήρα

$$P_{copper dc} = I_{tdc}^2 \cdot R_t + I_{fdc}^2 \cdot R_f$$

και φαίνονται στη 10^η στήλη του Πίνακα 5.5.

όπου οι αντιστάσεις τυμπάνου και διέγερσης R_t , R_f υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας ένα τροφοδοτικό με τον ίδιο τρόπο που υπολογίστηκε η αντίσταση της γεννήτριας.

Στη συνέχεια αποσυνδέουμε τη γεννήτρια από τον DC κινητήρα και ο κινητήρας στρέφεται εν κενό. Η ηλεκτρική ισχύς που δίνεται στο τύμπανο και στη διέγερση του κινητήρα ισούται με τις απώλειες περιστροφής και τις απώλειες πυρήνα του κινητήρα μαζί με τις απώλειες χαλκού στο τύμπανο και στη διέγερση. Υπολογίζοντας τις απώλειες χαλκού στο τύμπανο και στη διέγερση βρίσκουμε το άθροισμα των απωλειών περιστροφής και πυρήνα του κινητήρα. Οι υπολογισμοί φαίνονται στον Πίνακα 5.6.

$$P_{rot} + P_{core} = P_{el dc_{noload}} - I_{tdc_{noload}}^2 R_t + I_{fdc_{noload}}^2 R_f$$

Οι τιμές των απωλειών περιστροφής μαζί με τις απώλειες πυρήνα καταγράφονται στην 11^η στήλη του Πίνακα 5.5. Έτσι, η μηχανική ισχύς εξόδου του κινητήρα ισούται με:

$$P_{mech dc} = P_{el dc} - P_{copper dc} - (P_{rot} + P_{core})$$

και φαίνεται στη 12^η στήλη του Πίνακα 5.5.

Η απόδοση της γεννήτριας προκύπτει:

$$eff_{gen} = \frac{P_{el_{gen}}}{P_{mech dc}}$$

και φαίνεται στη 13^η στήλη του Πίνακα 5.5.

GENERATOR				DC MOTOR								GENERATOR
n(RPM)	Vtgen (V)	IL (A)	Pelgen(W)	Vtdc (V)	Itdc(A)	Vfdc (V)	Ifdc(A)	Peldc(W)	Pcopperdc(W)	Prot+Pcore(W)	Pmechdc(W)	effgen
100,0	9,0	1,0	27,0	21,0	6,2	162,0	1,7	576,0	218,9	145,0	72,9	80,4
100,0	8,5	2,0	51,0	29,0	12,0	185,0	1,8	1496,0	459,9	145,0	66,9	76,3
100,0	8,0	2,7	64,8	42,0	15,4	185,0	1,9	2743,2	675,5	145,0	177,8	38,5
200,0	18,5	1,0	55,5	23,0	6,2	171,0	1,7	1295,0	218,9	147,0	83,3	94,4
200,0	17,5	2,0	105,0	33,0	12,0	185,0	1,8	3500,0	459,9	147,0	112,9	93,0
200,0	17,0	2,9	145,4	43,0	17,2	200,0	1,9	6298,5	799,9	147,0	153,4	89,4
300,0	28,0	1,0	84,0	29,0	6,4	180,0	1,7	2464,0	224,3	149,5	118,4	77,2
300,0	27,0	2,0	162,0	38,0	12,0	185,0	1,8	6210,0	459,9	149,5	170,4	95,1
300,0	26,5	2,8	218,6	49,0	16,4	190,0	1,9	10785,5	743,0	149,5	262,6	83,2
400,0	37,5	1,0	112,5	35,0	6,6	166,0	1,6	3975,0	213,6	151,9	155,9	91,6
400,0	36,5	2,0	219,0	44,5	12,2	185,0	1,8	9818,5	470,1	151,9	244,6	89,5
400,0	36,0	2,8	297,0	54,0	16,0	200,0	2,0	16137,0	734,7	151,9	367,4	80,8
500,0	46,5	1,0	139,5	41,0	6,8	161,0	1,7	5766,0	235,5	154,2	195,7	90,1
500,0	46,0	2,0	276,0	50,0	12,4	185,0	1,8	13892,0	480,6	154,2	309,0	89,3
500,0	45,5	2,8	382,2	60,0	16,8	202,5	1,9	23059,4	771,1	154,2	457,3	83,6
600,0	56,0	1,0	168,0	47,0	7,0	154,0	1,6	7952,0	233,1	156,5	237,8	90,4
600,0	55,5	2,0	333,0	55,0	12,6	185,0	1,8	18426,0	491,2	156,5	369,1	90,2
600,0	55,0	2,8	453,8	65,0	16,4	202,5	1,9	29645,0	752,4	156,5	541,8	83,7

Πίνακας 5.5: Υπολογισμός της απόδοσης της γεννήτριας με βάση τις μετρούμενες τιμές στη γεννήτρια και στον DC κινητήρα.

DC MOTOR NO LOAD							
n(RPM)	VtDC _{noload} (V)	ItDC _{noload} (A)	VfDC _{noload} (V)	IfDC _{noload} (A)	PelDC _{noload} (W)	Pcopper _{noload} (W)	Protation+Pcore(W)
107	6,91	0,3	170	1,7	291,07	146,08	145,00
198	12,5	0,33	170	1,7	293,13	146,12	147,01
304	18,5	0,36	170	1,7	295,66	146,16	149,50
400	24,5	0,37	170	1,7	298,07	146,18	151,89
497	30	0,38	170	1,7	300,40	146,19	154,21
601	36	0,38	170	1,7	302,68	146,19	156,49

Πίνακας 5.6: Υπολογισμός των απωλειών περιστροφής και των απωλειών πυρήνα του DC κινητήρα.

Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει μικρή ακρίβεια γιατί χρησιμοποιούνται πολλές μετρήσεις μεγεθών οι οποίες εμπεριέχουν σφάλματα. Επίσης, η απόδοση δεν υπολογίζεται απευθείας από τη γεννήτρια, αλλά μέσω μιας σειράς υπολογισμών που ξεκινούν από τον DC κινητήρα. Υποθέτουμε πως πιο κοντά στην πραγματικότητα βρίσκονται οι τιμές της προσομοίωσης της παραγράφου 4.2.3.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΜΙΚΡΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκε η μελέτη μιας μικρής ανεμογεννήτριας, έγινε προσομοίωση των επιδόσεων της γεννήτριας της, κατασκευάστηκε και πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις στο εργαστήριο. Επόμενο βήμα είναι η σύνδεση της. Έτσι, αντικείμενο αυτής της παραγράφου είναι η παρουσίαση των διαφορετικών δυνατών τρόπων σύνδεσης μιας μικρής ανεμογεννήτριας σε μικροδίκτυο ή στο κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ισχύος κάνοντας αρχικά μία αναφορά στα μικροδίκτυα.

6.1: Μικροδίκτυα

6.1.1: Γενικές πληροφορίες, εφαρμογές και πλεονεκτήματα

Τα τελευταία χρόνια συντελείται μία αλλαγή στον τρόπο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες αποδεδειγμένα πλέον συντελούν στην αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη μέσω του φαινομένου του θερμοκηπίου με πιθανές καταστροφικές συνέπειες για τους ανθρώπους και όλες τις άλλες μορφές ζωής στη γη. Παράλληλα, τα ορυκτά καύσιμα που χρησιμοποιούνται σε συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι ανεξάντλητα και επίσης ζητήματα ιδιοκτησίας και εκμετάλλευσης των ορυκτών καυσίμων έχουν οδηγήσει σε ενεργειακές κρίσεις όπως στις δεκαετίες του '70 και του '80. Έτσι, υπάρχει μια στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καθώς και σε τεχνολογίες που μπορεί να χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα, αλλά έχουν υψηλότερο βαθμό απόδοσης, όπως είναι οι μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας.

Το γεγονός πως το κόστος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας μειώνεται όσο αυξάνεται το μέγεθος της εγκατεστημένης ισχύος, οδήγησε στη δημιουργία λίγων μεγάλων μονάδων παραγωγής, είτε πρόκειται για θερμοηλεκτρικούς, υδροηλεκτρικούς ή πυρηνικούς σταθμούς. Η ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται στους καταναλωτές που βρίσκονται σε μακρινή απόσταση από τις μονάδες παραγωγής, μέσω γραμμών υψηλής τάσης και στη συνέχεια μέσω μετασχηματιστών υποβιβασμού της τάσης που βρίσκονται κοντά στους καταναλωτές. Έχοντας το οικονομικό κόστος ως το βασικότερο κριτήριο, περιβαλλοντικά και κοινωνικά ζητήματα, όπως η έκλυση διοξειδίου του άνθρακα και άλλων ρύπων, οι επιπτώσεις από την απόρριψη θερμότητας σε ποτάμια και θάλασσες, τα προβλήματα υγείας ανθρώπων που ζουν κοντά σε μονάδες παραγωγής δεν λήφθηκαν σοβαρά υπόψη με αποτέλεσμα το ζήτημα της αλλαγής μοντέλου παραγωγής ενέργειας να τίθεται επιτακτικά.

Μια άλλη πρόταση αποτελεί η διεσπαρμένη παραγωγή ενέργειας η οποία βασίζεται σε ένα πλήθος μικρότερων μονάδων. Κατά τη διεσπαρμένη παραγωγή τοποθετούνται μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε περιοχές όπου υπάρχει διαθέσιμη η πρωταρχική πηγή ενέργειας, καθώς και μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας κοντά σε τόπους κατανάλωσης όπως πόλεις και βιομηχανίες, εφόσον η μεταφορά θερμότητας σε μεγάλες αποστάσεις δεν είναι εφικτή. Οι μονάδες παραγωγής

που βρίσκονται κοντά στην κατανάλωση περιορίζουν τις απώλειες στις γραμμές μεταφοράς και στη περίπτωση των μονάδων συμπαραγωγής τροφοδοτούν και με ζεστό νερό τους καταναλωτές.

Ένα δίκτυο που περιέχει μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και πιθανώς μονάδες αποθήκευσης (όπως συσσωρευτές, σφονδύλους κ.α) το οποίο σχεδιάζεται ανεξάρτητα από το κεντρικό δίκτυο αποκαλείται μικροδίκτυο. Το μικροδίκτυο μπορεί να βρίσκεται σε αυτόνομη λειτουργία ή να ανταλλάσει ισχύ με το κεντρικό δίκτυο. Κατά την αυτόνομη λειτουργία απαιτείται συνεχής ρύθμιση της τάσης και της συχνότητας, ενώ όταν υπάρχει αλληλεπίδραση με το κεντρικό δίκτυο μπορεί να δίνει ενέργεια σε αυτό όταν διαθέτει περίσσεια ενέργειας και να απορροφά από αυτό όταν έχει έλλειψη. Οι πηγές του μπορεί να είναι φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες, μικρά υδροηλεκτρικά, γεννήτριες ντίζελ, μονάδες συμπαραγωγής, κυψέλες καυσίμου, μονάδες βιομάζας κτλ. Λόγω της σχετικά μικρής εγκατεστημένης ισχύος των μονάδων και των μικρών αποστάσεων μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης, η παραγωγή και η διανομή της ενέργειας γίνεται συνήθως στη χαμηλή τάση. Υπάρχουν μικροδίκτυα που αποτελούνται από φωτοβολταϊκά πλαίσια και συσσωρευτές για την κάλυψη των αναγκών μίας οικίας, μέχρι μικροδίκτυα που αποτελούνται από αιολικά πάρκα, γεννήτριες ντίζελ και μονάδες συμπαραγωγής που τροφοδοτούν μεγάλους καταναλωτές. Ένα μικροδίκτυο που αποτελείται από ανεμογεννήτρια, φωτοβολταϊκά, κυψέλη καυσίμου, μικροτουρμπίνα, οικιακά, εμπορικά και βιομηχανικά φορτία παριστάνεται στο Σχήμα 6.1.

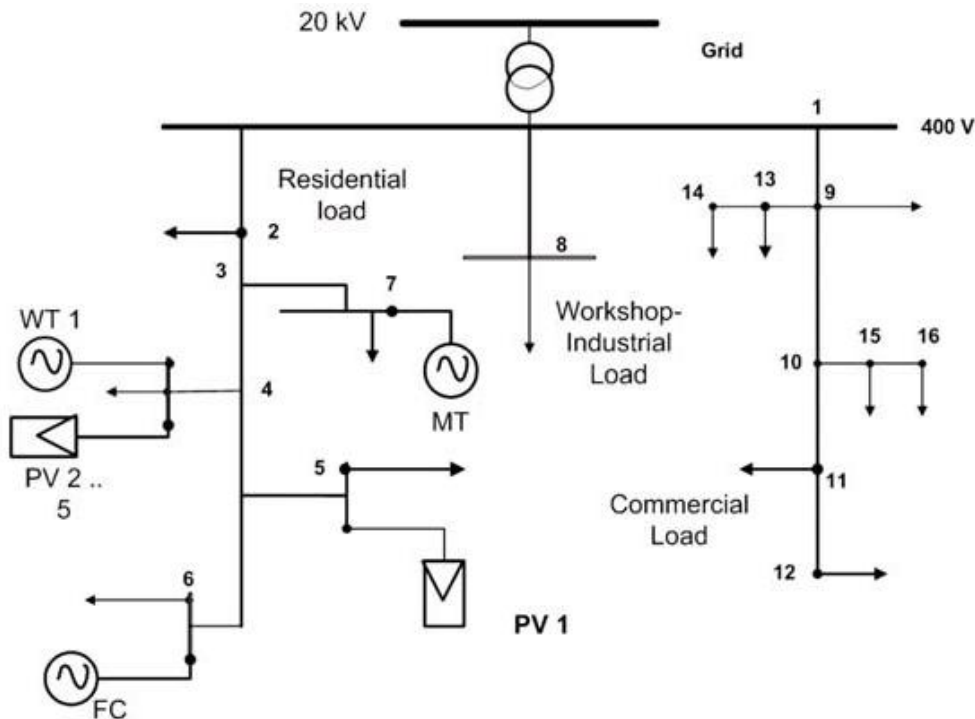


Figure 7. The study case LV Network

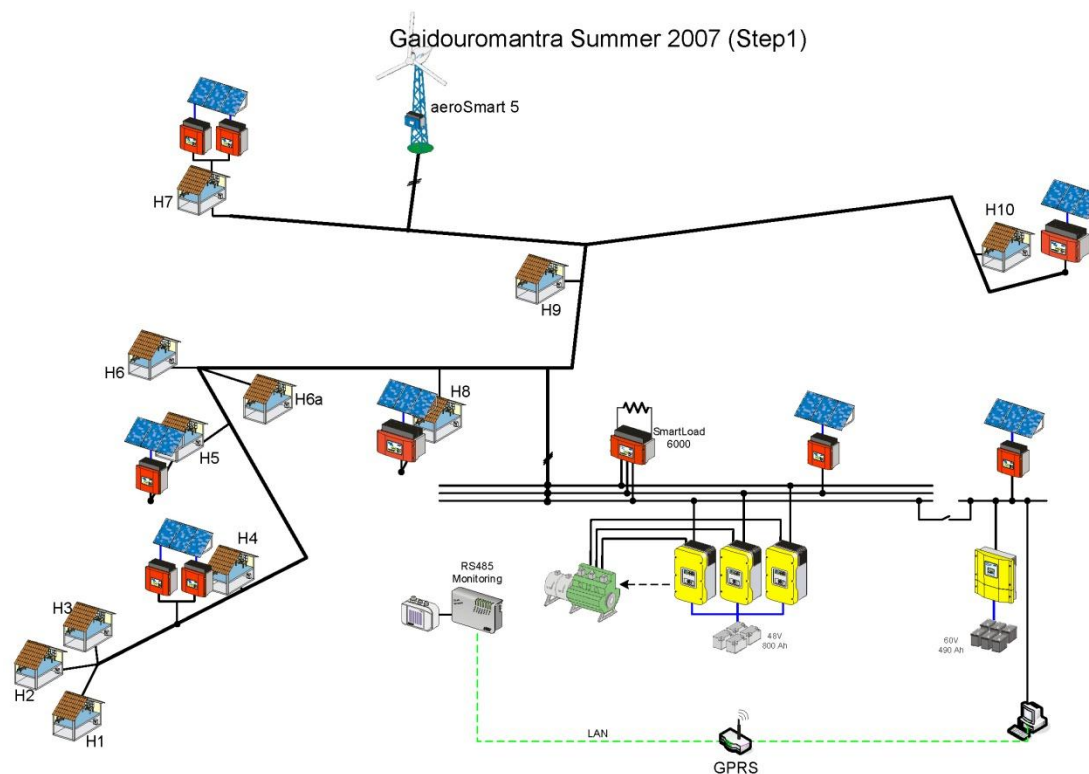
Σχήμα 6.1: Μικροδίκτυο που αποτελείται από ανεμογεννήτρια, φωτοβολταϊκά, κυψέλη καυσίμου, μικροτουρμπίνα, οικιακά, εμπορικά και βιομηχανικά φορτία

Τα μικροδίκτυα παρουσιάζουν μία σειρά από πλεονεκτήματα. Οι πηγές του είναι συνήθως μονάδες Α.Π.Ε ή μονάδες συμπαραγωγής με υψηλή απόδοση που οδηγούν σε περιορισμό των αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον. Η ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας οδηγεί σε εξοικονόμηση ενέργειας αυξάνοντας την απόδοση ως 30%. Επίσης, ο τοπικός χαρακτήρας της παραγωγής μειώνει τις απώλειες μεταφοράς. Όταν, το μικροδίκτυο λειτουργεί παράλληλα με το κεντρικό δίκτυο μπορεί να το στηρίζει προσφέροντας του ισχύ τις ώρες αιχμής και απορροφώντας ή διοχετεύοντας ενεργό και άεργο ισχύ όταν απαιτείται. Τέλος, η αξιοπιστία του συστήματος βελτιώνεται, εφόσον σε περίπτωση απώλειας του κεντρικού δικτύου το μικροδίκτυο μπορεί να τροφοδοτεί κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις μέρος των καταναλωτών.

Όσον αφορά μικρές εγκαταστάσεις, τα μικροδίκτυα δίνουν τη δυνατότητα ηλεκτροδότησης απομονωμένων περιοχών στις οποίες δεν υπάρχει κεντρικό δίκτυο και όπου πολλές φορές το κόστος σύνδεσης με το κεντρικό δίκτυο είναι μεγαλύτερο από την εγκατάσταση αυτόνομου συστήματος. Τέτοιες περιπτώσεις αποτελούν σπίτια και οικισμοί σε βουνά, δάση και άλλες δύσβατες περιοχές στον αναπτυγμένο κόσμο και ολόκληρα χωριά σε αναπτυσσόμενες χώρες όπου ένα μεγάλο ποσοστό του πληθυσμού δεν έχει πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια.

6.1.2: Τυπικό μικροδίκτυο

Στην παράγραφο αυτή θα αναφερθούν συνοπτικά τα βασικά ηλεκτρονικά μέρη, οι συσκευές επικοινωνίας και ελέγχου που περιέχονται σε ένα μικροδίκτυο με μικρές πηγές Α.Π.Ε, συσσωρευτές και γεννήτρια ντίζελ. Ένα τέτοιο μικροδίκτυο είναι εγκατεστημένο στη Κύθνο και φαίνεται στο Σχήμα 6.2.



το δίκτυο επιβάλλει την τάση και τη συχνότητα και ο sunny island συμπεριφέρεται ως ένας αντιστροφέας πηγής έντασης [23].

-Sunny boy control: Παρακολουθεί την ισχύ εξόδου των αντιστροφέων και μπορεί να συνδέσει ή να αποσυνδέσει τους αντιστροφείς. Έχει τη δυνατότητα να επικοινωνήσει με τους αντιστροφείς και επιτρέπει στον χρήστη να εισάγει τιμές σε παραμέτρους, όπως ο χρόνος ένταξης και εξόδου του αντιστροφέα, να εισάγει τη χαρακτηριστική καμπύλη της ανεμογεννήτριας στον windy boy κ.α.

-Web box: Επιτρέπει την παρακολούθηση και τον έλεγχο του μικροδικτύου μέσω internet από οποιοδήποτε υπολογιστή. Επικοινωνεί με τους αντιστροφείς και επιτρέπει στον χρήστη την εισαγωγή παραμέτρων στους αντιστροφείς.

-Έλεγχος των φορτίων: Τα φορτία μπορεί να είναι τα πραγματικά οικιακά φορτία όπως στο μικροδίκτυο της Κύθνου είτε μπορεί να είναι αντιστάσεις, λαμπτήρες και κινητήρες σε ένα εργαστήριο. Τα φορτία μπορούν να ελέγχονται μέσω PLC που επικοινωνούν με κατάλληλο πρόγραμμα υπολογιστή όπως είναι το Labview. Με το ίδιο πρόγραμμα είναι εφικτή η παρακολούθηση των ηλεκτρικών μεγεθών του μικροδικτύου. Η διαχείριση φορτίου είναι μία σημαντική δυνατότητα που επιτρέπει για παράδειγμα την απόρριψη συγκεκριμένων φορτίων όταν η στάθμη φόρτισης των συσσωρευτών μειωθεί κάτω από το 70% και έχει πληθώρα εφαρμογών.

6.2: Τρόποι σύνδεσης μικρών ανεμογεννητριών

Οι μικρές ανεμογεννήτριες μαζί με τα φωτοβολταϊκά είναι οι βασικές πηγές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα μικροδίκτυο μικρής κλίμακας επιπέδου οικίας ή μικρού οικισμού. Οι δύο αυτές πηγές αλληλοσυμπληρώνονται εφόσον συχνά όταν η ηλιακή ακτινοβολία είναι χαμηλή, υπάρχει ικανοποιητικός άνεμος και αντίστροφα. Οι μικρές ανεμογεννήτριες πλεονεκτούν ως προς το χαμηλότερο κόστος, αλλά έχουν τα μειονεκτήματα της μη σταθερής παραγωγής, και της ανάγκης για συντήρηση εφόσον διαθέτουν κινούμενα μέρη.

Η σύνδεση μίας μικρής ανεμογεννήτριας μπορεί να γίνει στον AC ζυγό ενός μικροδικτύου ή στον AC ζυγό του δικτύου χαμηλής τάσης. Ένας άλλος τρόπος είναι η σύνδεση στον DC ζυγό ενός αυτόνομου συστήματος με συσσωρευτές ως μονάδα αποθήκευσης.

Όσον αφορά τη σύνδεση σε ζυγό AC ενός μικροδικτύου υπάρχουν συγκεκριμένα πλεονεκτήματα σε σχέση με την σύνδεση σε ζυγό DC. Το AC σύστημα όπως περιγράφηκε στην παράγραφο (6.1.2) επιτρέπει τη σύνδεση πολλών διαφορετικών πηγών και μέσων αποθήκευσης σε έναν κοινό ζυγό AC. Οι πηγές και οι συσσωρευτές μπορεί να βρίσκονται σε διαφορετικές περιοχές και να συνδέονται απλά στον κοινό ζυγό. Επίσης, οι απώλειες του συστήματος είναι λιγότερες από το DC σύστημα εφόσον λειτουργεί σε υψηλότερη τάση.

Στις επόμενες παραγράφους εξηγούνται οι δύο διαφορετικοί τρόποι σύνδεσης μικρής ανεμογεννήτριας στον ζυγό AC και στον ζυγό DC.

6.2.1: Σύνδεση σε ζυγό AC

Η σύνδεση μίας μικρής ανεμογεννήτριας σε ένα τυπικό μικροδίκτυο όπως αυτό που περιγράφεται στην παράγραφο 6.1.2 γίνεται στον κοινό ζυγό AC μέσω ενός αντιστροφέα. Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο γίνεται η σύνδεση στο δίκτυο χαμηλής τάσης, είτε για πώληση ενέργειας στο δίκτυο, είτε για μείωση του λογαριασμού ηλεκτρικής ενέργειας ανάλογα με τη νομοθεσία κάθε χώρας.

Οι περισσότερες μικρές ανεμογεννήτριες διαθέτουν γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος που η τάση και η συχνότητα τους εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου. Η σύνδεση στον AC ζυγό γίνεται γενικά μέσω ηλεκτρονικών ισχύος. Έτσι, η εναλλασσόμενη τάση της γεννήτριας πρέπει πρώτα να περάσει από έναν ανορθωτή και μετά από έναν αντιστροφέα που θα μετατρέψει την DC τάση στην εναλλασσόμενη τάση και συχνότητα του μικροδικτύου ή του δικτύου χαμηλής τάσης. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται εφικτή η μέγιστη απόδοση ισχύος από την ανεμογεννήτρια (Maximum Power Point Tracking) όπως θα δούμε στην παράγραφο (6.2.1.2)

6.2.1.1: Ηλεκτρονικά ισχύος

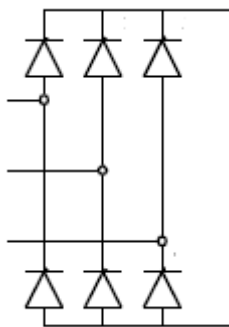
Για την κατανόηση της σύνδεσης στον ζυγό AC θα γίνει μία σύντομη αναφορά στους μη ελεγχόμενους ανορθωτές πλήρους γέφυρας, στους DC/DC μετατροπείς και στους αντιστροφείς.

- Τριφασική μη ελεγχόμενη ανόρθωση πλήρους γέφυρας:

Αποτελείται από 6 απλές διόδους όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.3. Όταν η τάση στην είσοδο είναι ημιτονοειδής η τάση εξόδου που προκύπτει έχει 6 παλμούς για κάθε κύκλο λειτουργίας. Η μέση τιμή της τάσης εξόδου για σταθερό ρεύμα εξόδου ισούται με [24]:

$$\overline{V_o} = \sqrt{3} \cdot 1.35 \cdot V_{rms} = 2.34 \cdot V_{rms} \quad (6.1)$$

$$\text{και } \overline{I_o} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I_{rms} \quad (6.2)$$

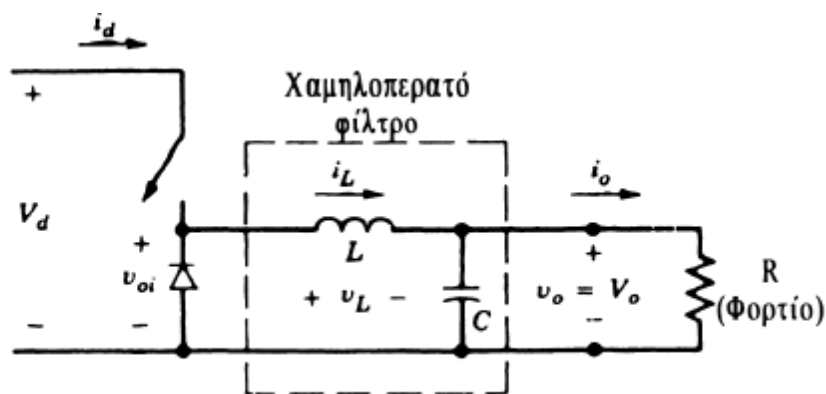


Σχήμα 6.3: Τριφασική μη ελεγχόμενη ανόρθωση πλήρους γέφυρας.

-DC/DC μετατροπείς:

Υπάρχουν αρκετές κατηγορίες DC/DC μετατροπέων. Για την εφαρμογή που εξετάζεται θα αναφερθούμε στους μετατροπείς υποβιβασμού και ανύψωσης τάσης από τους οποίους προκύπτουν και οι άλλες κατηγορίες μετατροπέων.

Ένας DC/DC μετατροπέας υποβιβασμού τάσης μετατρέπει μία μη ελεγχόμενη DC τάση στην είσοδο του, σε μία ελεγχόμενη DC τάση μικρότερης τιμής στην έξοδο του. Αποτελείται από έναν διακόπτη, μία διόδο, ένα πηνίο και έναν πυκνωτή όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.4. Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός η διόδος είναι ανάστροφα πολωμένη οπότε η είσοδος δίνει ενέργεια στο φορτίο και στο πηνίο. Όταν ο διακόπτης ανοίγει, ρέει ρεύμα από το πηνίο προς το φορτίο μέσω της διόδου και μεταφέρει μέρος της αποθηκευμένης ενέργειας του πηνίου στο φορτίο.



Σχήμα 6.4: Κύκλωμα DC/DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης

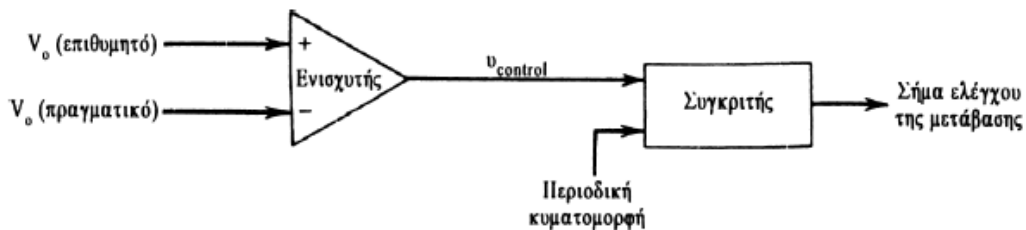
Η μέση τιμή της τάσης εξόδου σε ένα χρονικό διάστημα καθορίζεται από τον χρόνο αγωγής του διακόπτη προς το διάστημα αυτό. Ο έλεγχος του διακόπτη γίνεται συνήθως χρησιμοποιώντας την τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM).

Κατά την τεχνική PWM η μέση τιμή της τάσης εξόδου ελέγχεται ρυθμίζοντας

τη σχετική διάρκεια αγωγής του διακοπτικού στοιχείου. Η περίοδος μετάβασης T_s ισούται με το άθροισμα του χρόνου αγωγής ton και του χρόνου σβέσης $toff$ και παραμένει σταθερή όπως και η συχνότητα μετάβασης. Αυτό που μεταβάλλεται είναι η σχετική διάρκεια αγωγής του διακόπτη $D=ton/T_s$ που ονομάζεται duty cycle. Έτσι, προκύπτει η μέση τιμή της τάσης εξόδου [23]:

$$V_o = \frac{1}{T_s} \cdot \int_0^{T_s} V_o(t) dt = \frac{1}{T_s} \cdot \left(\int_0^{ton} V_d \cdot dt + \int_{ton}^{T_s} 0 \cdot dt \right) = \frac{ton}{T_s} \cdot V_d = D \cdot V_d$$

Ένα κύκλωμα συγκριτή παράγει το σήμα που ελέγχει τη σχετική διάρκεια αγωγής όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.5. Η διαφορά της επιθυμητής τιμής της τάσης εξόδου και της πραγματικής τιμής ενισχύεται και παράγει την τάση $V_{control}$. Στη συνέχεια η τάση $V_{control}$ συγκρίνεται με μία πριονωτή κυματομορφή V_s όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.6. Όταν το σήμα $V_{control}$ είναι μεγαλύτερο κατά πλάτος από την τιμή της πριονωτής τάσης, ο διακόπτης άγει για χρόνο ton . Η συνολική περίοδος μετάβασης είναι η περίοδος της πριονωτής τάσης.



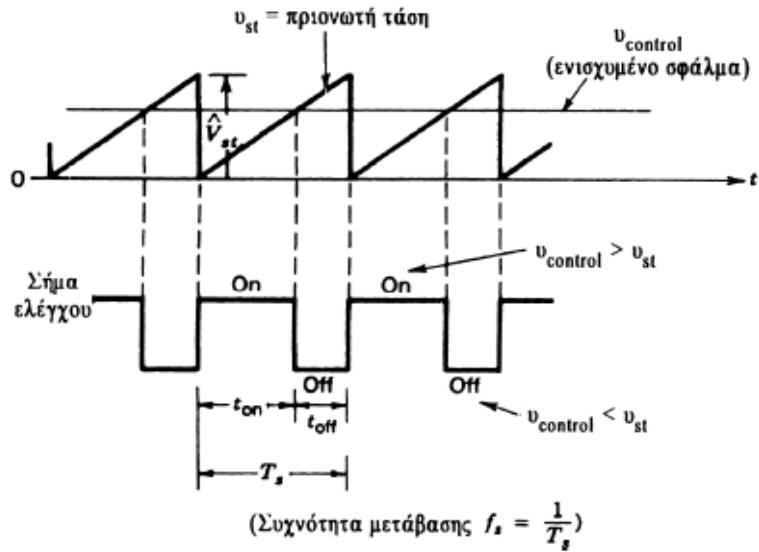
Σχήμα 6.5: Κύκλωμα συγκριτή που παράγει το σήμα που ελέγχει τη σχετική διάρκεια αγωγής του διακόπτη.

Έτσι, η σχετική διάρκεια αγωγής μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει των δύο αυτών τάσεων ως εξής

$$D = \frac{ton}{T_s} = \frac{V_{control}}{V_s}$$

και

$$V_o = D \cdot V_d = \frac{V_d}{V_s} \cdot V_{control} = k \cdot V_{control}$$

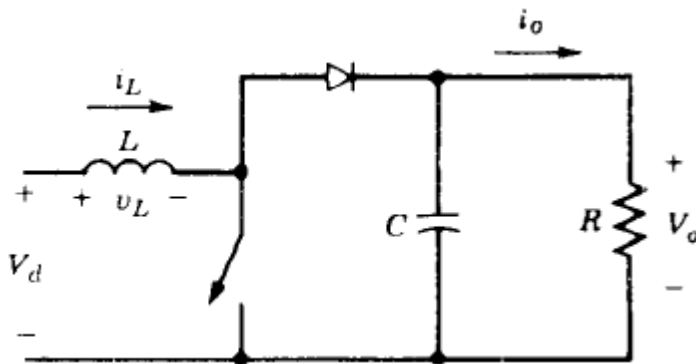


Σχήμα 6.6: Η τάση $V_{control}$ συγκρίνεται με μία πριονωτή κυματομορφή και προκύπτει το σήμα ελέγχου του διακόπτη.

Είναι φανερό ότι η τάση εξόδου εξαρτάται αποκλειστικά από το σχετικό εύρος των παλμών D , οπότε με την κατάλληλη ρύθμιση αυτού επιτυγχάνεται ο υποβιβασμός στην επιθυμητή τιμή.

Αντίστοιχα λειτουργεί ο DC/DC μετατροπέας ανύψωσης τάσης που φαίνεται στο Σχήμα 6.7 από όπου προκύπτει η σχέση [23]:

$$V_o = \frac{1}{1-D} \cdot V_d$$



Σχήμα 6.7: Κύκλωμα DC/DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης.

Ο μεικτός μετατροπέας DC/DC μπορεί είτε να υποβιβάζει είτε να ανυψώνει την τάση εισόδου και αποτελείται από την εν σειρά σύνδεση των μετατροπέων υποβιβασμού και ανύψωσης, οπότε η συνάρτηση μεταφοράς για την τάση εξόδου θα είναι το γινόμενο αυτών των δύο:

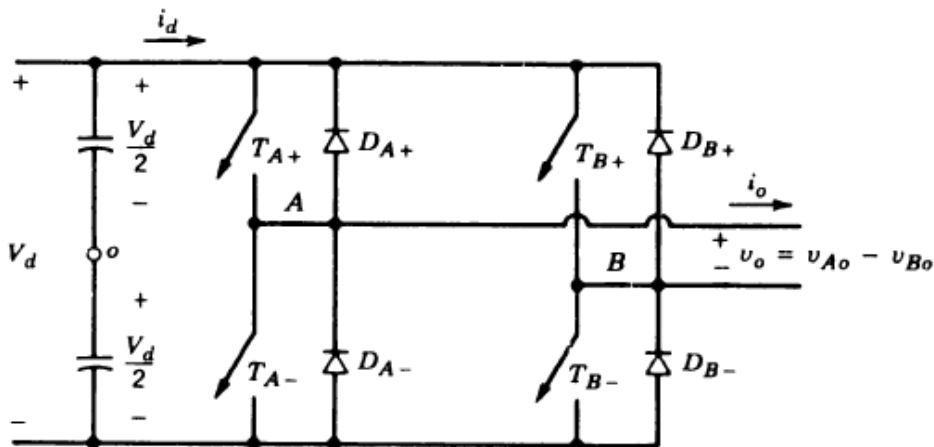
$$\frac{V_o}{V_d} = D \cdot \frac{1}{1-D}$$

$$V_o = \frac{D}{1-D} \cdot V_d$$

-Μονοφασικοί αντιστροφείς:

Ένας μονοφασικός αντιστροφέας πλήρους γέφυρας φαίνεται στο Σχήμα 6.8. Μία τεχνική ελέγχου που χρησιμοποιείται συχνά είναι η διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM) κατά την οποία συγκρίνονται μια τριγωνική κυματομορφή πλάτους V_{tri} , με μία ημιτονοειδή κυματομορφή ελέγχου $V_{control}$. Η συχνότητα με την οποία αλλάζουν κατάσταση οι διακόπτες του αντιστροφέα είναι η συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής και ονομάζεται φέρουσα συχνότητα ή συχνότητα μετάβασης. Η επιθυμητή θεμελιώδης συχνότητα της τάσης εξόδου του αντιστροφέα είναι η συχνότητα του σήματος ελέγχου f_1 η οποία χρησιμεύει στη διαμόρφωση της σχετικής διάρκειας αγωγής των διακοπών. Ο λόγος της φέρουσας συχνότητας προς τη συχνότητα διαμόρφωσης ονομάζεται συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας mf και ο λόγος του πλάτους του σήματος ελέγχου προς το πλάτος της τριγωνικής κυματομορφής ονομάζεται συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους ma . Η μέση τάση εξόδου V_o στο διάστημα μιας περιόδου μετάβασης αγωγής – αποκοπής ($T_s = 1/f_s$) για τάση εισόδου V_d και για κυματομορφή ελέγχου $V_{control} \leq V_d$ ισούται με [23]:

$$V_o = \frac{V_{control}}{V_{tri}} \cdot V_d = ma \cdot V_d$$



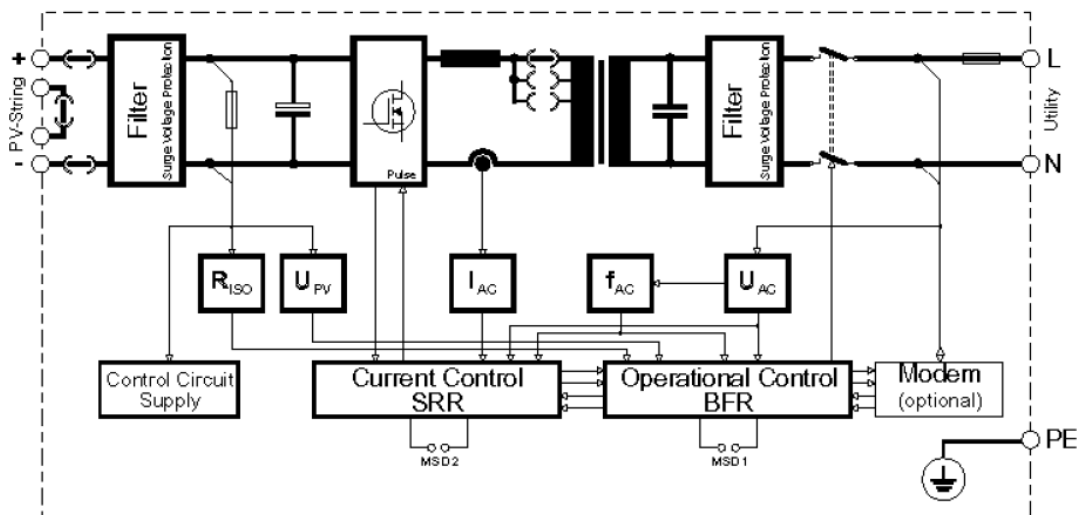
Σχήμα 6.8: Κύκλωμα μονοφασικού αντιστροφέα πλήρους γέφυρας.

Για τη σύνδεση μικρών ανεμογεννητριών σε ζυγό AC ένας αντιστροφέας που χρησιμοποιείται ευρέως είναι ο windy boy. Ο windy boy αποτελείται από έναν DC/DC μετατροπέα για τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος από την ανεμογεννήτρια και

από έναν μονοφασικό αντιστροφέα που επιτρέπει μονόδρομη ροή ισχύος. Είναι υπεύθυνος για το συγχρονισμό με το μικροδίκτυο ή το δίκτυο χαμηλής τάσης στο οποίο παρέχει ισχύ με συντελεστή ισχύος $\cos\phi=1$. Ο windy boy είναι πανομοιότυπος με τον sunny boy που παριστάνεται στο Σχήμα 6.9 για τη σύνδεση φωτοβολταϊκών με τη μόνη διαφορά να βρίσκεται στον τρόπο μεγιστοποίησης της αποδιδόμενης ισχύος (MPPT) στη διαδικασία ελέγχου του DC/DC converter.

Η DC τάση αρχικά περνάει από ένα φίλτρο προστασίας από υπερτάσεις και έναν πυκνωτή για την εξομάλυνση του εισερχόμενου ρεύματος και την μείωση της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής. Στην συνέχεια εισέρχεται στον DC/DC μετατροπέα που διαθέτει διακοπτικό υλικό IGBT που προσαρμόζει την DC τάση εισόδου στην χαρακτηριστική καμπύλη της ανεμογεννήτριας ώστε να επιτυγχάνεται μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος. Έπειτα, η DC τάση εισέρχεται στον αντιστροφέα ο οποίος αποτελείται από μία πλήρη γέφυρα με τρανζίστορ IGBT που λειτουργούν σε φέρουσα συχνότητα $f_s=16$ KHz [23]. Χρησιμοποιώντας την τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM) το ρεύμα μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο ημιτονοειδές με συχνότητα 50Hz. Το εναλλασσόμενο ρεύμα περνάει από έναν τοροειδή μετασχηματιστή εξασφαλίζοντας ηλεκτρική απομόνωση της DC με την AC πλευρά. Τέλος, περνώντας από έναν βαθυπερατό φίλτρο για τη μείωση των αρμονικών και ένα φίλτρο προστασίας από τις υπερτάσεις του δικτύου η εναλλασσόμενη τάση φτάνει στο ζυγό του μικροδικτύου ή του δικτύου χαμηλής τάσης.

Μία σειρά από ψηφιακά κυκλώματα είναι υπεύθυνα για τον έλεγχο της γέφυρας του αντιστροφέα και του IGBT του DC/DC μετατροπέα. Το ρεύμα εισόδου μετριέται για την επίτευξη του MPPT, η τάση εισόδου η αντίσταση μεταξύ αγωγών ρεύματος και γείωσης η τάση και η συχνότητα του δικτύου μετρώνται για την επίτευξη συγχρονισμού κ.α.



Σχήμα 6.9: Κύκλωμα του αντιστροφέα Sunny Boy που είναι πανομοιότυπος με τον Windy Boy.

6.2.1.2: Λειτουργία μεταβλητών στροφών και μέθοδοι μεγιστοποίησης της αποδιδόμενης ισχύος (MPPT)

Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες παράγουν εναλλασσόμενη τάση η τιμή της οποίας εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, άρα και από την ταχύτητα του ανέμου. Ομοίως, από την ταχύτητα του ανέμου εξαρτάται και η συχνότητα της εναλλασσόμενης τάσης.

Σε μεγάλες ανεμογεννήτριες υπάρχουν αρκετές εφαρμογές σύνδεσης απευθείας στο δίκτυο. Σε αυτή τη περίπτωση η ταχύτητα περιστροφής παραμένει σταθερή και καθορίζεται από τη συχνότητα του δικτύου όπως και η τάση. Τέτοιες εφαρμογές υλοποιούνται συνήθως με μηχανές επαγωγής όπου μια μεταβολή στην ολίσθηση μπορεί να επιτρέψει μικρές μεταβολές στην ταχύτητα περιστροφής. Η ανάπτυξη όμως της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών ισχύος και το μειωμένο κόστος τους οδήγησε σε ένα πλήθος εφαρμογών όπου η ανεμογεννήτρια συνδέεται στο δίκτυο μέσω ηλεκτρονικών ισχύος, ώστε η παραγόμενη ισχύς να μεγιστοποιείται.

Όσον αφορά τις μικρές ανεμογεννήτριες οι περισσότερες διαθέτουν γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος, ενώ κάποιες διαθέτουν γεννήτρια συνεχούς ρεύματος. Η σύνδεση στον ζυγό AC γίνεται μέσω ηλεκτρονικών ισχύος ενώ η απευθείας σύνδεση είναι σπάνια.

Η ισχύς μίας ποσότητας ανέμου επιφάνειας A που κινείται με ταχύτητα V_w ισούται με:

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_w^3$$

Από αυτή την ισχύ μία έλικα μπορεί να λάβει μόνο ένα μέρος της. Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος c_p εκφράζει το λόγο της ισχύος της έλικας προς την ισχύ του ανέμου.

$$c_p = \frac{P_{turbine}}{P_{wind}}$$

οπότε η αεροδυναμική ισχύς της έλικας προκύπτει:

$$P_{turbine} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c_p \cdot V_w^3 \quad (6.3)$$

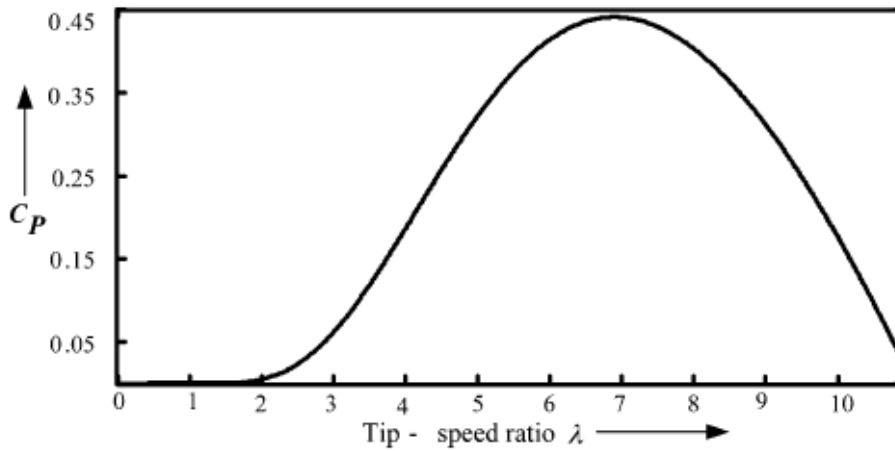
Σύμφωνα με το κριτήριο του Betz η μέγιστη τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή c_p είναι 0.593 [21]

Ορίζεται ο λόγος ταχύτητας ακροπερυγίου που εκφράζει το πόσο γρήγορα στρέφεται η άκρη των πτερύγων μίας έλικας προς την ταχύτητα του ανέμου.

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{V_w} \quad (6.4)$$

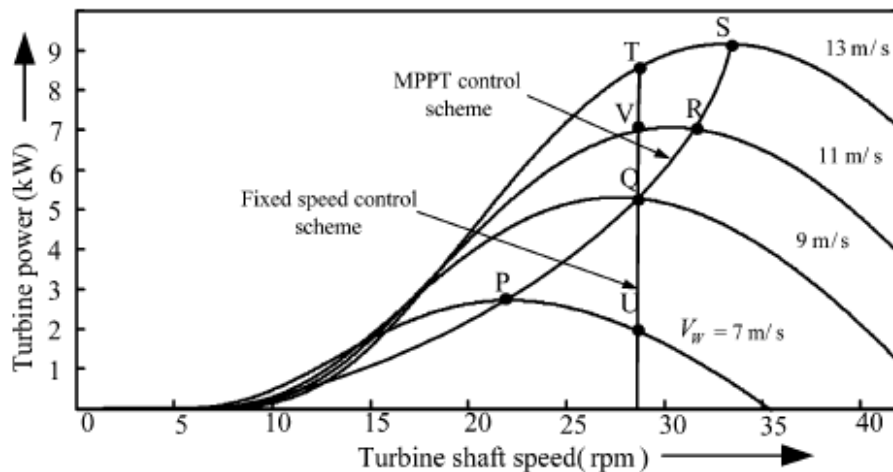
Ο αεροδυναμικός συντελεστής εξαρτάται από τον λόγο ταχύτητας ακροπερυγίου λ με μία σχέση της μορφής που φαίνεται στο Σχήμα 6.10. Παρατηρούμε πως υπάρχει μία τιμή

του λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου για την οποία ο αεροδυναμικός συντελεστής παίρνει την μέγιστη τιμή.



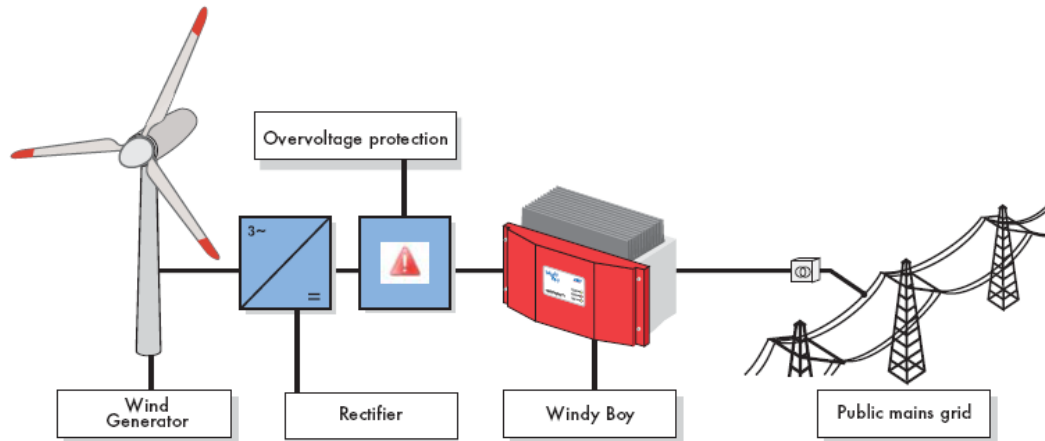
Σχήμα 6.10: Τυπική σχέση του αεροδυναμικού συντελεστή c_p με τον λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου λ .

Εισάγοντας στη σχέση (6.3) τη σχέση μεταξύ c_p και λ προκύπτουν οι καμπύλες του Σχήματος 6.11 που δίνουν την αεροδυναμική ισχύ της έλικας σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου. Υπάρχει μία καμπύλη που διέρχεται από τα σημεία όπου η αεροδυναμική ισχύς μεγιστοποιείται για κάθε τιμή της ταχύτητας ανέμου. Όταν ακολουθείται αυτή η καμπύλη σε κάθε ταχύτητα ανέμου παρουσιάζεται ο βέλτιστος λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου και ο μέγιστος αεροδυναμικός συντελεστής. Από το ίδιο σχήμα είναι φανερό πως για λειτουργία σταθερών στροφών η αεροδυναμική ισχύς παίρνει χαμηλότερες τιμές εφόσον η έλικα δεν περιστρέφεται με τον μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή.



Σχήμα 6.11: Αεροδυναμική ισχύς της έλικας σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου και η βέλτιστη καμπύλη ελέγχου.

Ο συνηθέστερος τύπος γεννητριών στις μικρές ανεμογεννήτριες είναι η σύγχρονη τριφασική γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη. Η σύνδεση της στον AC ζυγό γίνεται περνώντας πρώτα από μία τριφασική μη ελεγχόμενη ανόρθωση πλήρους γέφυρας και στη συνέχεια από έναν μονοφασικό αντιστροφέα όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.12.. Στη ίδια συσκευή με τον αντιστροφέα συνήθως είναι ενσωματωμένος ένας DC/DC μετατροπέας που κάνει εφικτή τη μέγιστη παραγωγή ισχύος.



Σχήμα 6.12: Σύνδεση ανεμογεννήτριας που διαθέτει τριφασική σύγχρονη γεννήτρια σε ζυγό AC.

Στην ίδια συσκευή με τον ανορθωτή συνήθως τοποθετείται ένα απορριπτικό φορτίο (dump load) καθώς και ένα ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου του. Η βασική του αποστολή είναι η προστασία του αντιστροφέα από υπέρταση καθώς και η προστασία της έλικας από ανάπτυξη υπερβολικής ταχύτητας περιστροφής. Σε περίπτωση που η DC τάση στην είσοδο του αντιστροφέα υπερβεί μία συγκεκριμένη τιμή (για τον windy boy 1700 είναι τα 400V) υπάρχει κίνδυνος σοβαρής βλάβης. Η ΗΕΔ που αναπτύσσεται στη γεννήτρια είναι ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα οπότε και η ανορθωμένη τάση αυξάνεται με την ταχύτητα περιστροφής λαμβάνοντας υπόψη την πτώση τάσης. Όταν η ανεμογεννήτρια παρέχει ισχύ και η ανορθωμένη τάση της υπερβεί μία προκαθορισμένη τιμή η γεννήτρια δίνει ισχύ στο απορριπτικό φορτίο με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ηλεκτρομαγνητική ροπή στον άξονα περιστροφής που είναι αντίθετη με την κινητήρια ροπή και να μειώνεται η ταχύτητα περιστροφής της φροντίζοντας η ανορθωμένη τάση να μένει στα επιτρεπτά όρια και η έλικα να μην αναπτύσσει υπερβολική ταχύτητα [25]. Επίσης, υπάρχει αυξημένη πιθανότητα δημιουργίας υπέρτασης κατά το διάστημα που χρειάζεται ο αντιστροφέας για να συγχρονιστεί με το δίκτυο, όπου υπάρχει ικανή ταχύτητα ανέμου και η γεννήτρια λειτουργεί ανοιχτοκυκλωμένη χωρίς δηλαδή να ασκείται στον άξονα περιστροφής ηλεκτρομαγνητική ροπή. Και σε αυτή τη περίπτωση μόλις ξεπεραστεί η προκαθορισμένη τιμή η γεννήτρια δίνει ρεύμα στο απορριπτικό φορτίο οπότε αναπτύσσεται ηλεκτρομαγνητική ροπή που μειώνει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα και προστατεύει τον αντιστροφέα αλλά και την έλικα από την ανάπτυξη πολύ υψηλής ταχύτητας περιστροφής. Επιπλέον, το απορριπτικό φορτίο είναι χρήσιμο στην περίπτωση

που η ανεμογεννήτρια δίνει ισχύ στο δίκτυο και για κάποιο λόγο υπάρξει απώλεια του δικτύου. Η ανεμογεννήτρια τότε δίνει ισχύ στο απορριπτικό φορτίο με αποτέλεσμα να αποφεύγεται η ανεξέλεγκτη επιτάχυνση της που μπορεί να προκαλέσει βλάβη στην έλικα και στον αντιστροφέα. Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα σταδιακής πέδησης της ανεμογεννήτριας δίνοντας ισχύ στο απορριπτικό φορτίο και τελικά βραχυκυκλώνοντας την ώστε να σταματήσει η περιστροφή της.

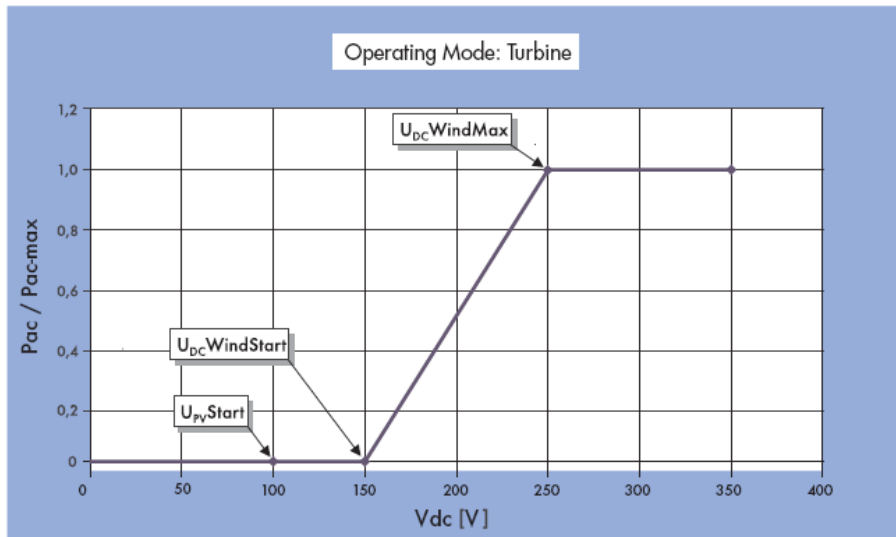
Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι για την ανίχνευση της μέγιστης ισχύος MPPT (Maximum Power Point Tracking) η οποία γίνεται ελέγχοντας κατάλληλα έναν DC/DC μετατροπέα ανύψωσης-υποβιβασμού τάσης. Η τάση εξόδου του μετατροπέα παραμένει σταθερή και η τάση εισόδου παίρνει τις απαιτούμενες τιμές για τη μεγιστοποίηση της αποδιδόμενης ισχύος. Ένα κύκλωμα ελέγχου με βάση τις εισόδους του και τη στρατηγική ελέγχου που ακολουθεί καθορίζει την αγωγή και τη σβέση του διακοπτικού υλικού του DC/DC μετατροπέα.

Αρχικά θα αναφερθούμε στους μετατροπείς φωτοβολταϊκών όπου υπάρχει μεγαλύτερη εξοικείωση με την μέθοδο της ανίχνευσης μέγιστης ισχύος. Το συνεχές ρεύμα εξόδου του φωτοβολταϊκού μειώνεται με την αύξηση της τάση του. Για κάθε τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας υπάρχει ένα ζεύγος τάσης-έντασης στο οποίο η ισχύς του φωτοβολταϊκού μεγιστοποιείται. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα το κύκλωμα ελέγχου στέλνει σήμα στον μετατροπέα να προκαλέσει μία μεταβολή στην τάση του φωτοβολταϊκού και υπολογίζει την αποδιδόμενη ισχύ στο νέο σημείο λειτουργίας. Αν η ισχύς είναι μεγαλύτερη συνεχίζει να μεταβάλλει την τάση με τον ίδιο τρόπο μέχρι η ισχύς να πάρει στιγμιαία μικρότερη τιμή ή υπολογίζοντας την παράγωγο dP/dV μέχρι να μηδενιστεί. Έτσι, ανιχνεύεται το σημείο απόδοσης μέγιστης ισχύος για τη συγκεκριμένη τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.

Στις μικρές ανεμογεννήτριες το βασικό κύκλωμα του μετατροπέα μπορεί να είναι το ίδιο με των φωτοβολταϊκών, αλλά αυτό που αλλάζει είναι η στρατηγική ελέγχου του. Οι γρήγορες μεταβολές και η αστάθεια στην ταχύτητα του ανέμου έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη μίας διαφορετικής μεθόδου που έχει ως στόχο η ανεμογεννήτρια να λειτουργεί με το βέλτιστο λόγο ταχύτητας ακροπερυγίου και το μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή για κάθε ταχύτητα ανέμου. Για να γίνει αυτό ο μετατροπέας πρέπει να φροντίζει η ανεμογεννήτρια να ακολουθεί την βέλτιστη καμπύλη αεροδυναμικής ισχύος-ταχύτητας περιστροφής που φαίνεται στο Σχήμα 6.11, δηλαδή για κάθε ταχύτητα να ανέμου μικρότερης της ονομαστικής να λειτουργεί με την κατάλληλη ταχύτητα περιστροφής που προκύπτει από τη σχέση (6.4) για βέλτιστο λόγο ταχύτητας ακροπερυγίου.

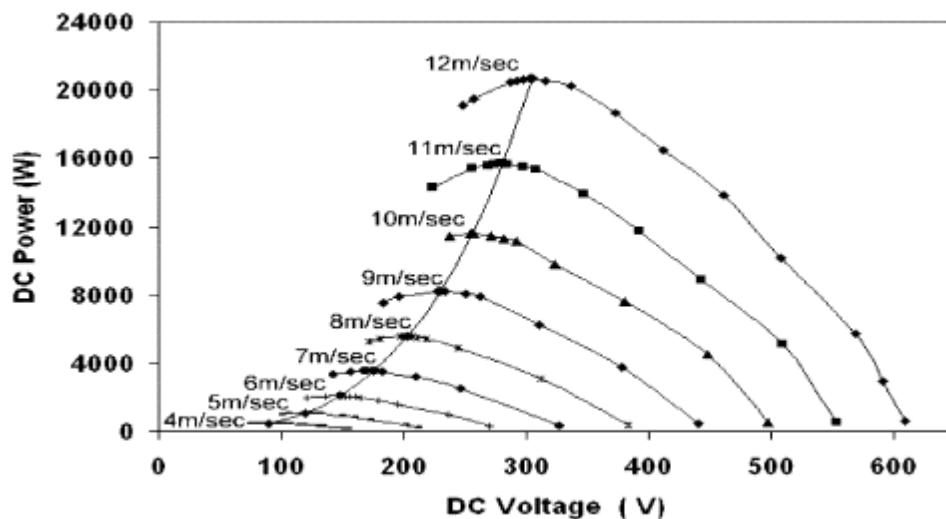
Κάθε μετατροπέας ανάλογα με τον σχεδιαστή του μπορεί να χρησιμοποιεί διαφορετική στρατηγική ελέγχου και μετρούμενα μεγέθη απαιτώντας να μεγιστοποιείται η αεροδυναμική ισχύς για κάθε ταχύτητα ανέμου. Για παράδειγμα ο DC/DC μετατροπέας του windy boy χρησιμοποιεί την βέλτιστη καμπύλη ισχύος εισόδου του μετατροπέα P_{dc} με την τάση εισόδου του V_{dc} . Ο windy boy έχει στη μνήμη του μία ευθύγραμμη χαρακτηριστική καμπύλη (Σχήμα 6.13) αλλά ο χρήστης έχει τη δυνατότητα και ενδείκνυται να εισάγει την χαρακτηριστική καμπύλη της συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας που θα συνδεθεί, μέσω υπολογιστή και της συσκευής sunny boy control

[26]. Για μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου από την ονομαστική εκτός από το αεροδυναμικό σύστημα ελέγχου (stall, pitch, furling), ο αντιστροφέας προσπαθεί να επιβάλλει σταθερή παραγόμενη ισχύ για την προστασία της έλικας και της γεννήτριας.



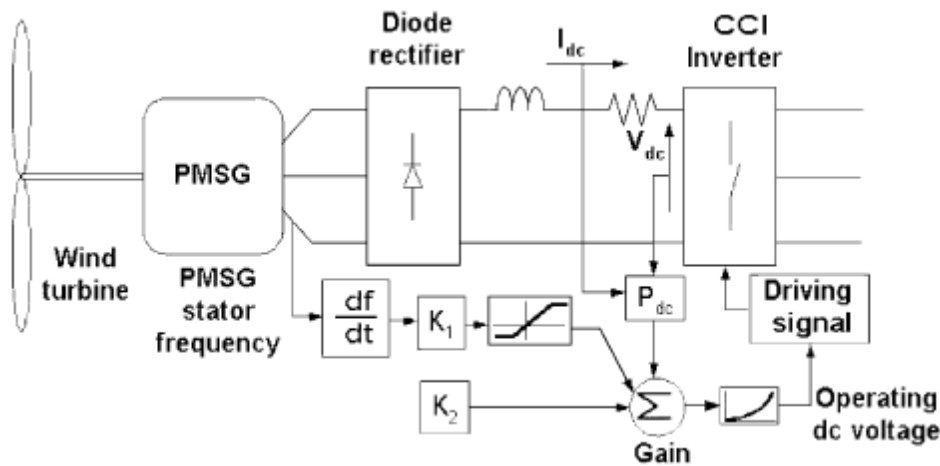
Σχήμα 6.13: Χαρακτηριστική ελέγχου του μετατροπέα windy boy.

Η μέθοδος με γνωστή τη χαρακτηριστική ελέγχου P_{dc} - V_{dc} παρουσιάζεται στο [27]. Από την αεροδυναμική ισχύ αφαιρώντας τις απώλειες στη γεννήτρια και στον ανορθωτή προκύπτει η ισχύς εισόδου του μετατροπέα P_{dc} . Από την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα προκύπτει η ΗΕΔ της γεννήτριας, η τερματική της τάση και η συνεχής τάση μετά τον ανορθωτή V_{dc} . Έτσι, από την αντίστοιχη γραφική παράσταση της μορφής του Σχήματος 6.11 προκύπτει το Σχήμα 6.14 που χρησιμοποιείται από τον μετατροπέα για τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος.



Σχήμα 6.14: Ηλεκτρική ισχύς εξόδου του ανορθωτή σε σχέση με την τάση εξόδου του ανορθωτή για διάφορες ταχύτητες ανέμου.

Το κύκλωμα ελέγχου δέχεται την συνεχή τάση V_{dc} και το συνεχές ρεύμα I_{dc} εισόδου του μετατροπέα και υπολογίζει την ισχύ εισόδου P_{dc} . Με βάση την χαρακτηριστική ελέγχου με δεδομένη την ισχύ και την τάση βρίσκεται η καμπύλη της ταχύτητας ανέμου που αντιστοιχεί στο σημείο λειτουργίας. Για την συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου από την χαρακτηριστική βρίσκεται η βέλτιστη τάση λειτουργίας και η μέγιστη ισχύς. Με κατάλληλα σήματα στον DC/DC μετατροπέα η τάση εισόδου παίρνει την βέλτιστη τιμή προσαρμόζοντας την ταχύτητα περιστροφής, με μεταβολή του ρεύματος άρα και της ηλεκτρομαγνητικής ροπής με αποτέλεσμα η ισχύς να μεγιστοποιείται. Επίσης, στο κύκλωμα ελέγχου εισέρχεται και η χρονική παράγωγος της συχνότητας του στάτη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.15, που οδηγεί σε βελτίωση της ευαισθησίας και της χρονικής απόκρισης του μετατροπέα.



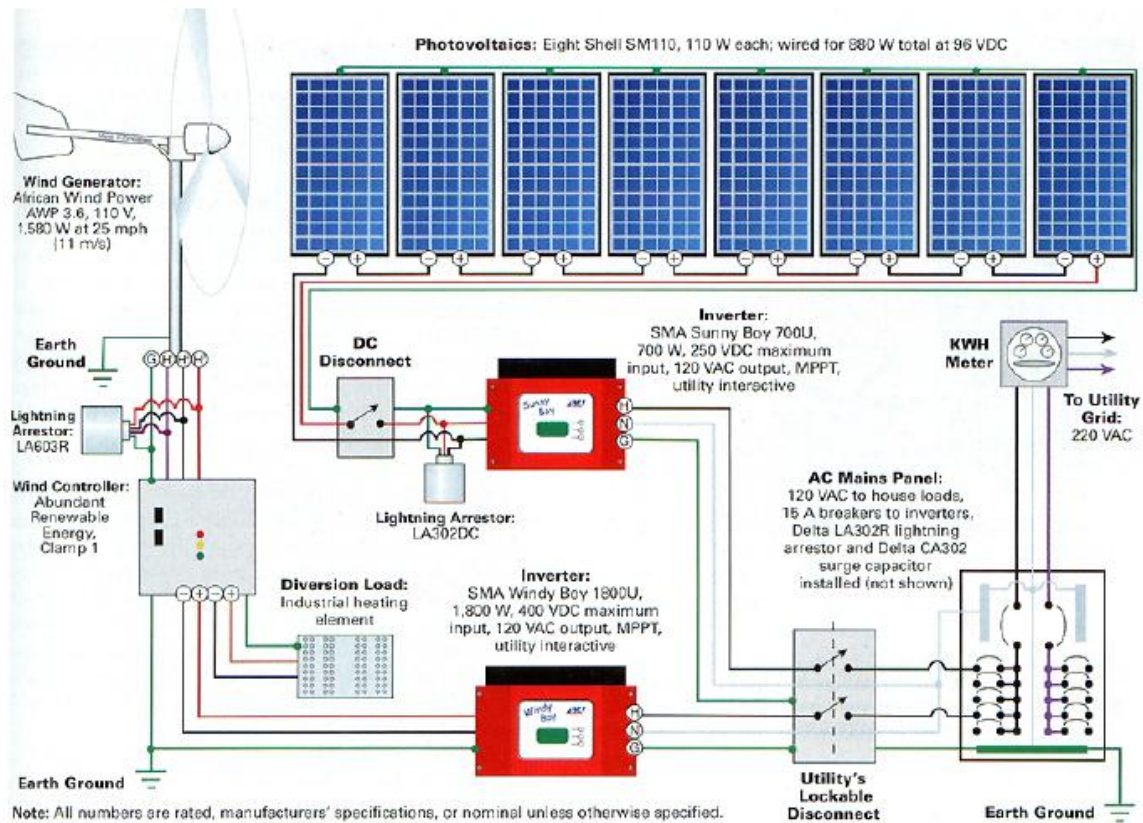
Σχήμα 6.15: Κύκλωμα ελέγχου συστήματος MPPT για ανεμογεννήτρια με σύγχρονη γεννήτρια.

Μία άλλη μέθοδος ελέγχου χρησιμοποιεί μετρήσεις από ανεμόμετρο [27]. Με βάση την μετρούμενη ταχύτητα του ανέμου υπολογίζεται η επιθυμητή τιμή της αεροδυναμικής ισχύος και συγκρίνεται με την μετρούμενη ισχύ στην είσοδο του μετατροπέα. Από τη σύγκριση αυτή προκύπτει η επιθυμητή dc τάση εισόδου του μετατροπέα η οποία επιβάλλεται στέλνοντας κατάλληλα σήματα στο διακοπτικό υλικό του μετατροπέα. Η μέθοδος αυτή έχει το μειονέκτημα πως απαιτεί την ύπαρξη του ανεμόμετρου το οποίο έχει και κόστος και οι μετρήσεις του συχνά εμπεριέχουν σφάλμα.

Μία μέθοδος ελέγχου που δεν χρησιμοποιεί ανεμόμετρο είναι η μέθοδος με πρόβλεψη του ανέμου. Σε αυτή τη μέθοδο με βάση τη συχνότητα της παραγόμενης τάσης από τη γεννήτρια, την ισχύ εισόδου του μετατροπέα, στατιστικά μοντέλα και ιστορικά δεδομένα γίνεται πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου από την οποία προκύπτει η επιθυμητή dc τάση εισόδου του μετατροπέα.

Τέλος στο Σχήμα 6.16 παρουσιάζεται μία τοπολογία για σύνδεση μικρής ανεμογεννήτριας και φωτοβολταϊκών στο δίκτυο χαμηλής τάσης για πώληση ηλεκτρικής

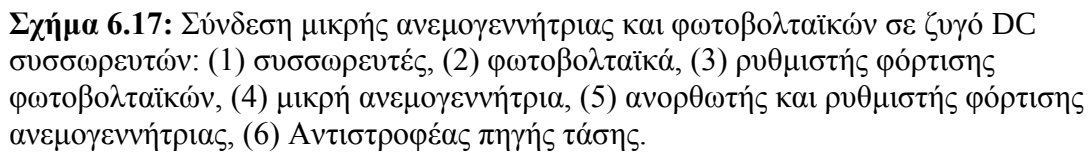
ενέργειας σε αυτό στην οποία επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση ισχύος μέσω των αντιστροφών windy boy και sunny boy.

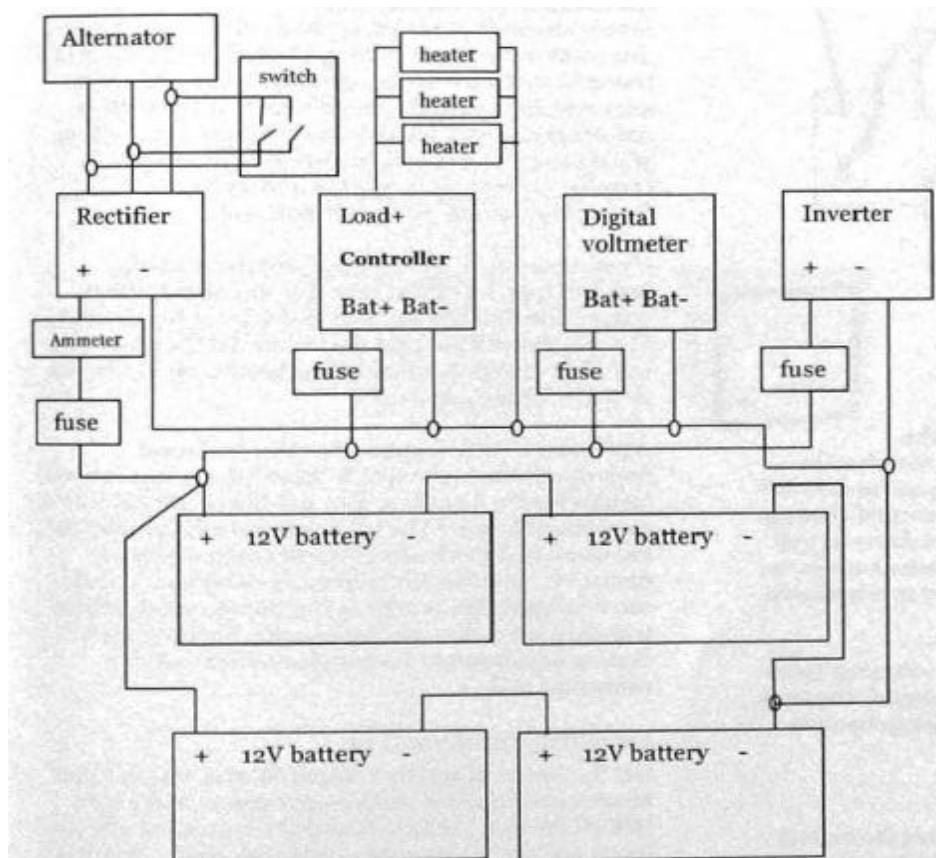


Σχήμα 6.16: Σύνδεση μικρής ανεμογεννήτριας και φωτοβολταϊκών με λειτουργία MPPT στο δίκτυο χαμηλής τάσης για πώληση ηλεκτρικής ενέργειας.

6.2.2: Σύνδεση σε ζυγό DC

Οι μικρές ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται συχνά σε αυτόνομες εφαρμογές σε περιοχές που δεν υπάρχει σύνδεση με το κεντρικό δίκτυο. Τα αυτόνομα συστήματα κάποιες φορές είναι της μορφής του Σχήματος 6.2, όπου η σύνδεση των πηγών που είναι συνήθως φωτοβολταϊκά και μικρές ανεμογεννήτριες γίνεται στον ζυγό AC. Αυτός ο τρόπος αν και παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα δεν είναι ο πιο διαδεδομένος σε μικρές εγκαταστάσεις μέχρι σήμερα εξαιτίας του υψηλού κόστους αγοράς δύο τουλάχιστον αντιστροφών. Στις περισσότερες εφαρμογές μικρών αυτόνομων συστημάτων η σύνδεση της μικρής ανεμογεννήτριας γίνεται στον DC ζυγό των συσσωρευτών. Στη συνέχεια ένας μονοφασικός αντιστροφάς πηγής τάσης μετατρέπει την συνεχή τάση των μπαταριών σε εναλλασσόμενη καθορίζοντας την τάση και τη συχνότητα λειτουργίας. Παράλληλα με την ανεμογεννήτρια μπορούν να συνδεθούν φωτοβολταϊκά στον ζυγό DC (Σχήμα 6.17). Όταν η παρεχόμενη ισχύς από τις πηγές είναι μεγαλύτερη από την ισχύ που καταναλώνεται αποθηκεύεται ενέργεια στους συσσωρευτές, ενώ όταν η παρεχόμενη ισχύς δεν επαρκεί για να καλύψει την



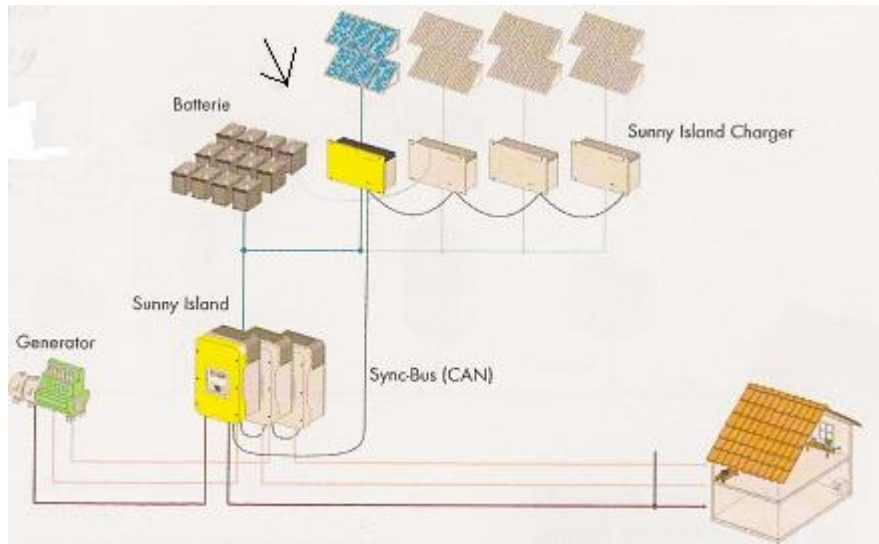


Σχήμα 6.18: Τοπολογία για σύνδεση μικρής ανεμογεννήτριας στον ζυγό DC.

Απαραίτητη για τη σύνδεση της ανεμογεννήτριας στους συσσωρευτές είναι η ύπαρξη ενός ηλεκτρονικού ρυθμιστή φόρτισης. Η αποστολή του ρυθμιστή φόρτισης είναι η προστασία των συσσωρευτών και η αποδοτική λειτουργία τους. Όταν ο βαθμός φόρτισης των συσσωρευτών φτάνει κάτω από μία ορισμένη τιμή και υπάρχει ζήτηση ισχύος από τα φορτία, ο ρυθμιστής φόρτισης ανοίγει έναν διακόπτη και σταματά η παροχή ισχύος. Αντίστοιχα, όταν ο βαθμός φόρτισης των συσσωρευτών είναι υψηλός και η ανεμογεννήτρια παράγει ισχύ, τροφοδοτείται με ισχύ ένα απορριπτικό φορτίο ώστε να αποφευχθεί υπερφόρτιση των συσσωρευτών. Το απορριπτικό φορτίο είναι μία ωμική αντίσταση η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση νερού. Ανάλογα με την ποιότητα του ρυθμιστή φόρτισης, μπορούν να ακολουθηθούν αλγόριθμοι για την φόρτιση και την εκφόρτιση των συσσωρευτών, ώστε να γίνεται πιο αποδοτική η λειτουργία τους και να αυξηθεί η διάρκεια ζωής τους. Συνήθως ο ανορθωτής με τον ρυθμιστή φόρτισης και το απορριπτικό φορτίο είναι ενσωματωμένα σε μία συσκευή.

Όσον αφορά τον τρόπο σύνδεσης της μικρής ανεμογεννήτριας στους συσσωρευτές μπορεί να γίνει είτε «απευθείας» είτε παρεμβάλλοντας σύστημα μεγιστοποίησης της ισχύος (MPPT). Περιγραφή των δύο αυτών δυνατοτήτων ακολουθεί στις επόμενες παραγράφους.

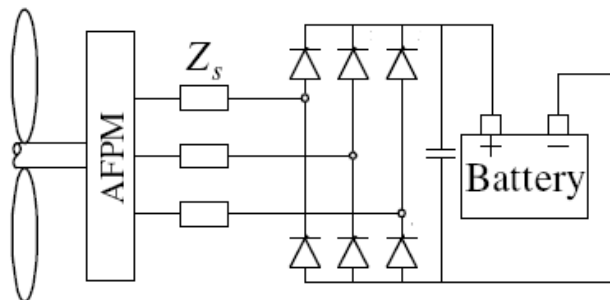
Τέλος, σημειώνουμε πως υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσης μικρής ανεμογεννήτριας απευθείας στο DC ζυγό των συσσωρευτών ενός τυπικού μικροδικτύου, όπου ένας sunny island ρυθμίζει την τάση και τη συχνότητα, με αντίστοιχο τρόπο που γίνεται με τα φωτοβολταϊκά στο Σχήμα 6.19. Αυτός ο τρόπος σύνδεσης απαιτεί μικρότερο κόστος, αλλά η απόδοση του συστήματος είναι χαμηλότερη.



Σχήμα 6.19: Σύνδεση φωτοβολταϊκών στον ζυγό DC ενός τυπικού μικροδικτύου.

6.2.2.1: Σύνδεση απευθείας σε συσσωρευτές

Η ανεμογεννήτρια συνδέεται «απευθείας» στους συσσωρευτές σημαίνει πως ανάμεσα στον ανορθωτή και τους συσσωρευτές δεν παρεμβάλλεται άλλη συσκευή (Σχήμα 6.20). Τέτοιες είναι και οι περιπτώσεις σύνδεσης που είδαμε στα Σχήματα 6.17 και 6.18. Ο ρυθμιστής φόρτισης αγνοείται εφόσον εξετάζουμε την κανονική λειτουργία του συστήματος.

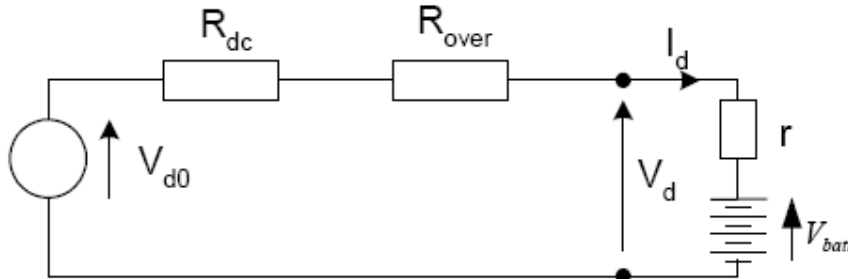


Σχήμα 6.20: Σύνδεση μικρής ανεμογεννήτριας απευθείας στους συσσωρευτές.

Σε αυτή τη περίπτωση η τάση των συσσωρευτών καθορίζει την τερματική τάση της γεννήτριας η οποία μένει σχεδόν σταθερή. Όταν αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής άρα και η ΗΕΔ της γεννήτριας. Για το διάστημα που η ανορθωμένη ΗΕΔ είναι μικρότερη από την τάση ανοιχτού κύκλου των συσσωρευτών

το κύκλωμα δεν διαρρέεται από ρεύμα οπότε δεν υπάρχει έγχυση ισχύος στους συσσωρευτές και στο φορτίο.

Ο ανορθωτής επιβάλλει μοναδιαίο συντελεστή ισχύος στην είσοδο του. Έτσι, ο ανορθωτής με τους συσσωρευτές φαίνεται από την γεννήτρια ως μία μεταβλητή ωμική αντίσταση με σταθερή τάση στα άκρα της. Για να μελετήσουμε το σύστημα φτιάχνουμε το απλοποιημένο ισοδύναμο dc κύκλωμα (Σχήμα 6.21) όπως φαίνεται από την dc πλευρά του ανορθωτή θεωρώντας πως όλη η ισχύς από την ανεμογεννήτρια αποδίδεται στους συσσωρευτές.



Σχήμα 6.21: Απλοποιημένο ισοδύναμο DC κύκλωμα της ανεμογεννήτριας συνδεδεμένης με ανορθωτή και συσσωρευτές.

Για έναν τριφασικό ανορθωτή πλήρους γέφυρας η dc αντίσταση (effective) ισούται περίπου με το διπλάσιο της αντίστασης ανά φάση της γεννήτριας [15].

$$R_{dc} \approx 2R_s \quad (6.5)$$

όπου R_s η ωμική αντίσταση της γεννήτριας ανά φάση

Επίσης:

$$R_{aver} = \frac{3}{\pi} \cdot \omega \cdot L_s \quad (6.6)$$

όπου L_s η σύγχρονη αυτεπαγωγή ανά φάση.

Η τάση της dc πηγής ισούται την ανορθωμένη φασική ΗΕΔ:

$$V_{do} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot E_f = 2,34 \cdot E_f \quad (6.7)$$

Εφαρμόζοντας τον νόμο τάσεων του Kirchhoff στο κύκλωμα προκύπτει το dc ρεύμα:

$$I_d = \frac{V_{do} - V_{batt}}{R_{dc} + R_{aver} + r} \quad (6.8)$$

όπου V_{batt} η τάση ανοιχτοκύκλωσης των συσσωρευτών και r η εσωτερική αντίσταση τους.

Έτσι, η τάση των ακροδεκτών των συσσωρευτών ισούται με:

$$V_d = V_{do} - I_d \cdot R_{dc} - I_d \cdot R_{aver} \quad (6.9)$$

Η τάση των ακροδεκτών των συσσωρευτών αυξάνεται λίγο όταν αυξάνεται το ρεύμα της γραμμής κατά τη φόρτιση τους:

$$V_d = V_{batt} + I_d \cdot r \quad (6.10)$$

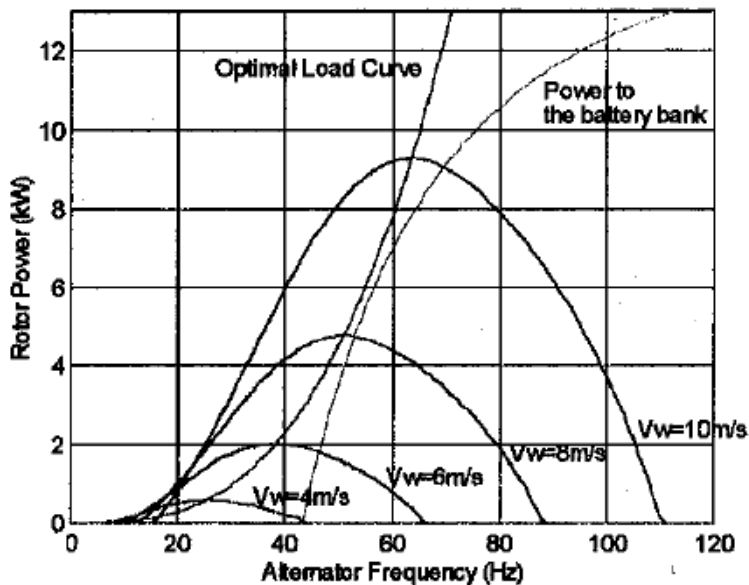
Η ισχύς που απορροφάται από τους συσσωρευτές είναι:

$$P_{dc} = P_{batt} = V_d \cdot I_d \quad (6.11)$$

Στο παραπάνω μοντέλο θεωρήσαμε πως η εσωτερική αντίσταση των συσσωρευτών είναι σταθερή το οποίο δεν ισχύει εφόσον μεταβάλλεται με τον βαθμό φόρτισης. Επίσης, αναφερόμαστε στην κατάσταση στην οποία οι συσσωρευτές φορτίζονται και δεν δίνεται ισχύς σε φορτίο. Παρόλα, αυτά η προσέγγιση αυτή δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Από το επιλεγμένο μοντέλο συμπεραίνουμε πως το ρεύμα μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά με την ΗΕΔ, άρα και με την ταχύτητα περιστροφής και η αποδιδόμενη ισχύς στους συσσωρευτές για σχεδόν σταθερή τάση μεταβάλλεται επίσης κατά προσέγγιση γραμμικά με την ταχύτητα περιστροφής.

Εφόσον η τερματική τάση της γεννήτριας είναι σχεδόν σταθερή για όλες τις ταχύτητες περιστροφής είναι προφανές πως δεν ακολουθείται η βέλτιστη καμπύλη αεροδυναμικής ισχύος και ταχύτητας περιστροφής. Αυτό φαίνεται καθαρά στο Σχήμα 6.22, όπου παριστάνεται η αεροδυναμική ισχύς της έλικας σε σχέση με την συχνότητα του στάτη για διάφορες ταχύτητες ανέμου και παρουσιάζεται απόκλιση μεταξύ των σημείων της βέλτιστης καμπύλης και της καμπύλης της απευθείας σύνδεσης. Αυτό σημαίνει πως δεν αξιοποιείται με τον καλύτερο τρόπο η έλικα της ανεμογεννήτρια. Η αποδιδόμενη ισχύς εξαρτάται από το κατάλληλο ταίριασμα των χαρακτηριστικών της έλικας με τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας και την επιλεγμένη dc τάση των συσσωρευτών από όπου δεν μπορεί να προκύψει η μέγιστη απόδοση ισχύος.



Σχήμα 6.22: Αεροδυναμική ισχύς της έλικας σε σχέση με την συχνότητα του στάτη για διάφορες ταχύτητες ανέμου. Χαράσσεται η βέλτιστη καμπύλη και η καμπύλη της απευθείας σύνδεσης σε συσσωρευτές.

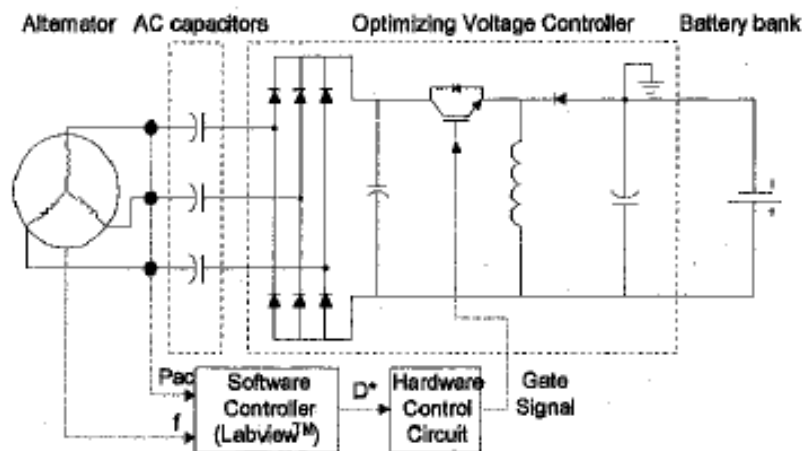
Σε ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες από την ονομαστική για τον περιορισμό της παραγόμενης ισχύος, εκτός από το αεροδυναμικό σύστημα έλεγχου stall, pitch ή furling

συμβάλλει και το γεγονός πως η σύγχρονη αντίδραση της γεννήτριας αυξάνεται με την ταχύτητα περιστροφής οπότε περιορίζεται η τιμή του ρεύματος άρα και της ισχύος.

Σημειώνουμε εδώ πως η λειτουργία της ανεμογεννήτριας απευθείας συνδεδεμένη σε συσσωρευτές είναι εντελώς διαφορετική από τη λειτουργία σταθερών στροφών συνδεδεμένης στο δίκτυο, γιατί η τερματική τάση μόνο πρέπει να είναι σταθερή, ενώ η συχνότητα άρα και η ταχύτητα περιστροφής μεταβάλλονται.

6.2.2.2: Σύνδεση με σύστημα μεγιστοποίησης της ισχύος (MPPT)

Η απευθείας σύνδεση της ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές έχει το μειονέκτημα πως η τερματική τάση της γεννήτριας παραμένει σχεδόν σταθερή. Τοποθετώντας έναν DC/DC μετατροπέα ανύψωσης-υποβιβασμού ανάμεσα στον ανορθωτή και στους συσσωρευτές η τάση εισόδου του μετατροπέα άρα και η τερματική τάση της γεννήτριας δεν καθορίζεται από την τάση των συσσωρευτών, αλλά από τον DC/DC μετατροπέα (Σχήμα 6.23). Η τάση εξόδου του μετατροπέα παραμένει σταθερή και ίση με την τάση των συσσωρευτών, ενώ η τάση εισόδου του μεταβάλλεται ώστε να λειτουργεί η ανεμογεννήτρια με βέλτιστο λόγο ταχύτητας ακροπερυγίου και μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή για ταχύτητες ανέμου μικρότερες από την ονομαστική. Για μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου από την ονομαστική η παραγόμενη ισχύς περιορίζεται από το αεροδυναμικό σύστημα και τον μετατροπέα.



Σχήμα 6.23: Σύνδεση ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές με DC/DC μετατροπέα για λειτουργία MPPT.

Υπάρχουν αρκετές διαφορετικές μέθοδοι επίτευξης του MPPT οι οποίες είναι παρόμοιες με τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση σε AC ζυγό. Ο συνηθέστερος τρόπος μεγιστοποίησης της αποδιδόμενης ισχύος βασίζεται σε μια γνωστή στον μετατροπέα βέλτιστη χαρακτηριστική καμπύλη. Στην μέθοδο που ακολουθείται στο [28] χρησιμοποιείται η χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος εξόδου της γεννήτριας P_{ac} με τη συχνότητα του στάτη f , η οποία είναι ευθέως ανάλογη με την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Από την μέτρηση της ισχύος της γεννήτριας και την βέλτιστη χαρακτηριστική καμπύλη $P_{ac}-f$ προκύπτει η επιθυμητή συχνότητα λειτουργίας για δεδομένη ταχύτητα

ανέμου (Σχήμα 6.24). Αυτή συγκρίνεται με την μετρούμενη συχνότητα και περνώντας από έναν ελεγκτή PID καθορίζεται το duty cycle (D) από όπου προκύπτει το σήμα ελέγχου για τον διακόπτη του DC/DC μετατροπέα. Ο μετατροπέας με αυτό τον τρόπο θα επιβάλλει την βέλτιστη συνεχή τάση στην είσοδο του, άρα και τη βέλτιστη συχνότητα για την συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου.

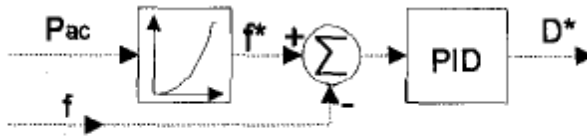


Fig. 4 Peak Power Tracker controller block diagram

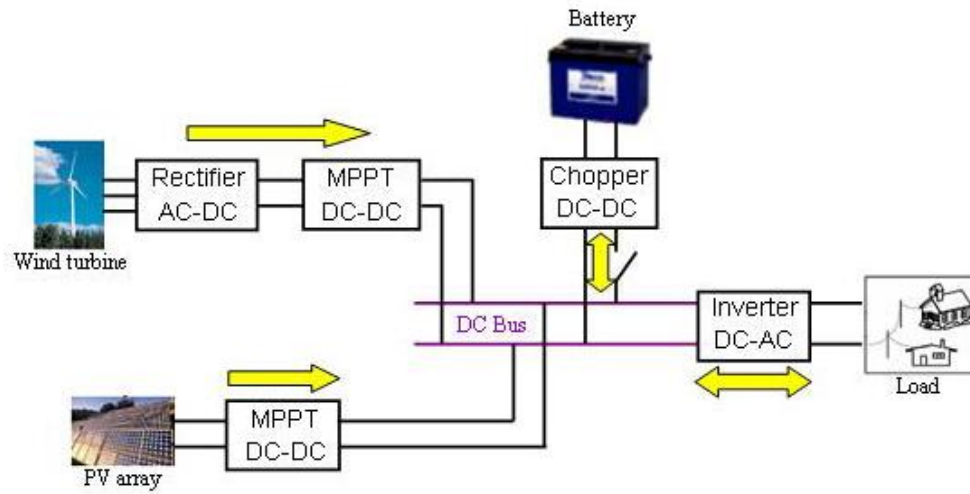
Σχήμα 6.24: Κύκλωμα ελέγχου του DC/DC μετατροπέα.

Ένας άλλος τρόπος αύξησης της αποδιδόμενης ισχύος μιας ανεμογεννήτριας, χωρίς να αποτελεί μέθοδο MPPT, είναι η τοποθέτηση πυκνωτών σε κάθε φάση ώστε η τερματική τάση της γεννήτριας να μην αναγκάζεται να παραμένει σταθερή και ίση με την τάση των συσσωρευτών [29]. Με τη σύνδεση των πυκνωτών η σύνθετη αντίσταση ανά φάση μειώνεται με αποτέλεσμα για την ίδια ταχύτητα περιστροφής να ρέει περισσότερο ρεύμα. Επίσης, θεωρώντας πως η τάση των ακροδεκτών των συσσωρευτών παραμένει σχεδόν σταθερή, η αποδιδόμενη ισχύς από την ανεμογεννήτρια θα αυξάνεται για κάθε ταχύτητα περιστροφής. Μεγαλύτερη επίδραση των πυκνωτών θα υπάρχει σε υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής εφόσον η χωρητική αντίδραση αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητας του στάτη.

Συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα από τις δύο διαφορετικές μεθόδους προκύπτει η διάταξη του Σχήματος 6.23 [28]. Οι πυκνωτές συνδέονται σε σειρά πριν τον ανορθωτή και τον DC/DC μετατροπέα, ώστε να γίνει μία πρώτη προσέγγιση της βέλτιστης χαρακτηριστικής καμπύλης, και ο μετατροπέας προσαρμόζει την τάση εισόδου του για να επιτευχθεί ταύτιση με τη βέλτιστη καμπύλη.

Η εφαρμογή του MPPT σε περιοχές με ταχύτητα ανέμου από 5.5m/sec μέχρι 7m/sec μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της παραγόμενης ενέργειας από 30 μέχρι 50 της εκατό σε σχέση με την απευθείας σύνδεση [28]. Επίσης, η χαμηλότερη ταχύτητα ανέμου στην οποία η ανεμογεννήτρια ξεκινά να δίνει ισχύ δίνει την δυνατότητα στην παραγωγή ισχύος σε χαμηλότερους ανέμους. Τα μειονεκτήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι η αύξηση της πολυπλοκότητας και του κόστους καθώς και η μείωση της αξιοπιστίας του συστήματος.

Τέλος, στο Σχήμα 6.25 παρουσιάζεται ένα αυτόνομο σύστημα όπου μία μικρή ανεμογεννήτρια και φωτοβολταϊκά είναι συνδεδεμένα σε κοινό ζυγό DC και το καθένα διαθέτει σύστημα MPPT.



Σχήμα 6.25: Σύνδεση μικρής ανεμογεννήτριας και φωτοβολταϊκών σε κοινό DC ζυγό με λειτουργία MPPT σε αυτόνομο σύστημα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΙΚΡΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗΣ ΣΕ ΖΥΓΟ DC

Αντικείμενο αυτής της παραγράφου είναι η προσομοίωση της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας που κατασκευάστηκε για διαφορετικούς τρόπους σύνδεσης και η σύγκριση μεταξύ αυτών. Για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων χρησιμοποιούνται δεδομένα από την προσομοίωση της γεννήτριας που έγινε στο κεφάλαιο 4 καθώς και μεγέθη που μετρήθηκαν στο εργαστήριο.

Τα προγράμματα γράφονται στη γλώσσα προγραμματισμού του λογισμικού Matlab και προσομοιώνουν τη συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας συνδεδεμένη απευθείας στον DC ζυγό μικροδικτύου και συνδεδεμένη με σύστημα μεγιστοποίησης της ισχύος. Παρουσιάζεται η λογική της κάθε μεθόδου και οι γραφικές παραστάσεις των ηλεκτρικών και μηχανικών μεγεθών που παρουσιάζουν ενδιαφέρον. Επίσης, με το ίδιο λογισμικό πραγματοποιείται πρόγραμμα που υπολογίζει και χαράσσει τις καμπύλες της αεροδυναμικής ισχύος της έλικας σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα για διάφορες ταχύτητες ανέμου. Τέλος, δημιουργείται πρόγραμμα που υπολογίζει την ενεργειακή απόδοση της ανεμογεννήτριας για διάφορες μέσες ταχύτητες ανέμου από την καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας και τη στατιστική κατανομή της ταχύτητας του ανέμου.

Η ανεμογεννήτρια που κατασκευάστηκε είναι σχεδιασμένη για σύνδεση σε ζυγό DC. Επομένως, η λειτουργία της ανεμογεννήτριας σε ζυγό AC με μεταβλητές στροφές δεν προσομοιώνεται εδώ, αλλά είναι πανομοιότυπη με τη σύνδεση στον ζυγό DC με λειτουργία MPPT. Τα προγράμματα που πραγματοποιήθηκαν μπορούν με λίγες τροποποιήσεις να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση της συμπεριφοράς άλλων ανεμογεννητριών. Τα πλήρη προγράμματα βρίσκονται στα Παραρτήματα Γ, Δ, Ε, Ζ.

7.1: Σύνδεση απευθείας σε συσσωρευτές

Η απευθείας σύνδεση της ανεμογεννήτριας στους συσσωρευτές έχει ως αποτέλεσμα η τερματική τάση της γεννήτριας να παραμένει σχεδόν σταθερή με αποτέλεσμα να μην απορροφάται η μέγιστη δυνατή ισχύς από την έλικα.

Στο πρόγραμμα του Παραρτήματος Γ χρησιμοποιείτε το απλοποιημένο ισοδύναμο dc κύκλωμα όπως φαίνεται από την dc πλευρά του ανορθωτή που περιγράφεται στην παράγραφο 6.2.2.1. Θεωρούμε πως η ανεμογεννήτρια απέχει απόσταση 60 μέτρων από τον ανορθωτή όπως συμβαίνει σε αρκετές περιπτώσεις, οπότε προσθέτουμε και μία επιπλέον αντίσταση ανά φάση για καλώδιο διατομής 6mm²:

$$R_{cable} = 2\rho \frac{l}{s} \approx 0.35\Omega$$

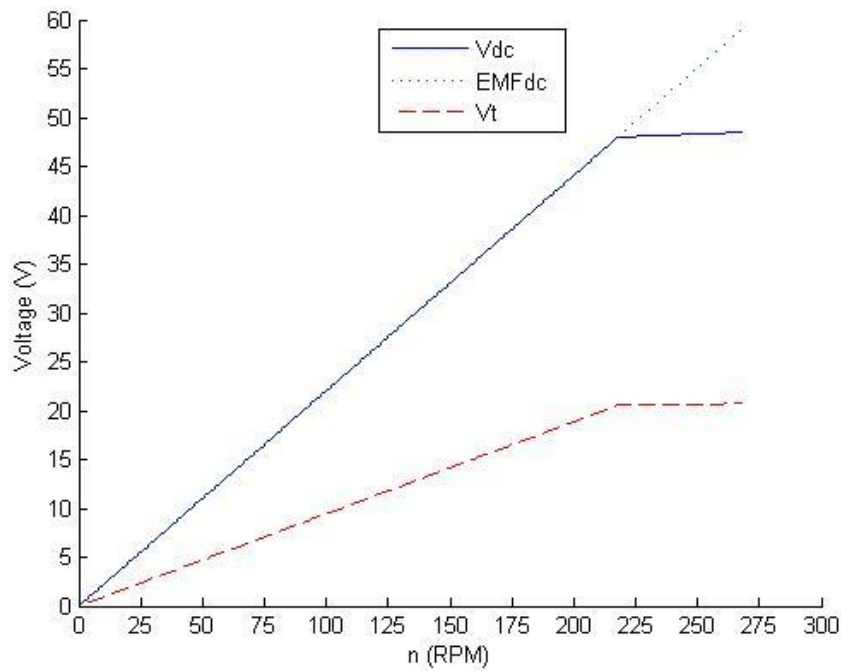
Για λόγους απλότητας θεωρούμε πως η εσωτερική αντίσταση των συσσωρευτών είναι σταθερή, ενώ στην πραγματικότητα μεταβάλλεται με τον βαθμό φόρτισης. Επίσης,

αναφερόμαστε στην κατάσταση στην οποία οι συσσωρευτές φορτίζονται και δεν δίνεται ισχύς σε φορτίο. Επιπλέον, οι σχέσεις (6.5), (6.6), (6.7) δεν είναι απόλυτα ακριβείς. Παρόλα αυτά το μοντέλο κρίνεται ικανοποιητικό για την παρούσα εργασία.

Θέλοντας να μελετήσουμε μόνο το κομμάτι της σύνδεσης, κρίθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθούν οι μετρούμενες τιμές για την αντίσταση και την πεπλεγμένη ροή σε κενό φορτίο ώστε να μην υπεισέλθουν επιπλέον σφάλματα λόγω της προσομοίωσης της γεννήτριας στο FEMM, και των αναλυτικών υπολογισμών. Οπότε $R_{gen}=0.614\Omega$. Η πεπλεγμένη ροή σε κενό φορτίο ισούται με: $Fluxoc=0.15Wb$. Η σύγχρονη αυτεπαγωγή $L_s=1.793mH$ υπολογίζεται με αναλυτικό τρόπο στην παράγραφο 4.1.3 εφόσον η μικρή τιμή της καθιστά δύσκολη την ακριβή μέτρηση. Η τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο $B_p=0.4$ υπολογίζεται εφαρμόζοντας ανάλυση Fourier στα αποτελέσματα από το FEMM όπως κάναμε στην παράγραφο 4.2.1. Η τάση ανοιχτοκύκλωσης των συσσωρευτών για την οποία έγινε η σχεδίαση είναι $V_{battery}=48V$. Θεωρούμε πως η εσωτερική αντίσταση των συσσωρευτών είναι $r_{battery}=0.1\Omega$ και πως η πτώση τάση στις διόδους είναι $V_d=0.7V$. Επίσης, χρησιμοποιούμε τις σχέσεις από το κεφάλαιο τέσσερα για τον υπολογισμό των απωλειών περιστροφής *Protation* και των απωλειών δινορευμάτων του τυλίγματος *Peddy*.

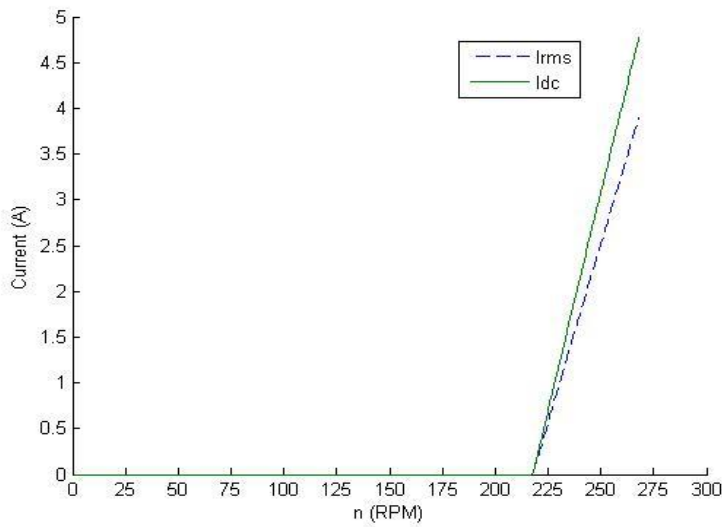
Η λογική που ακολουθείται είναι η εξής: Όσο η ανορθωμένη ΗΕΔ είναι μικρότερη από την τάση ανοιχτοκύκλωσης των συσσωρευτών δεν υπάρχει έγχυση ηλεκτρικής ισχύος. Η αεροδυναμική ισχύς τότε ισούται με τις απώλειες περιστροφής και τις απώλειες δινορευμάτων. Όταν η ανορθωμένη ΗΕΔ γίνει ίση ή μεγαλύτερη από την ανοιχτοκυκλωμένη τάση των συσσωρευτών χρησιμοποιούνται οι σχέσεις (6.5) μέχρι (6.11) θέτοντας την αντίσταση του καλωδίου σε σειρά με την αντίσταση ανά φάση της γεννήτριας. Από την ισχύ εξόδου του ανορθωτή χρησιμοποιώντας τις βασικές σχέσεις που ισχύουν για το AC κύκλωμα υπολογίζεται η διερχόμενη ισχύς στην είσοδο του ανορθωτή. Εφόσον η αντίσταση του καλωδίου είναι σε σειρά με την αντίσταση της γεννήτριας για κάθε φάση, δεν έχει νόημα ο υπολογισμός της ισχύος που διέρχεται από τους ακροδέκτες της γεννήτριας, αλλά η ισχύς που φτάνει στην AC πλευρά του ανορθωτή. Έτσι, από εδώ και πέρα όταν αναφερόμαστε στη ισχύ της γεννήτριας θα συμπεριλαμβάνουμε και την αντίσταση του καλωδίου στην αντίσταση της γεννήτριας. Στη συνέχεια προσθέτοντας τις ωμικές απώλειες στο καλώδιο και στην αντίσταση της γεννήτριας και τις απώλειες δινορευμάτων βρίσκουμε την ηλεκτρομαγνητική ισχύ της γεννήτριας από όπου προκύπτει η ηλεκτρομαγνητική ροπή. Αθροίζοντας και τις απώλειες περιστροφής υπολογίζεται η μηχανική ισχύς της γεννήτριας που ισούται με την αεροδυναμική ισχύ της έλικας, καθώς και η αεροδυναμική(μηχανική) ροπή. Έτσι, μπορεί να υπολογιστεί η απόδοση της ανεμογεννήτριας για διάφορες ταχύτητες περιστροφής.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στις ακόλουθες γραφικές παραστάσεις:



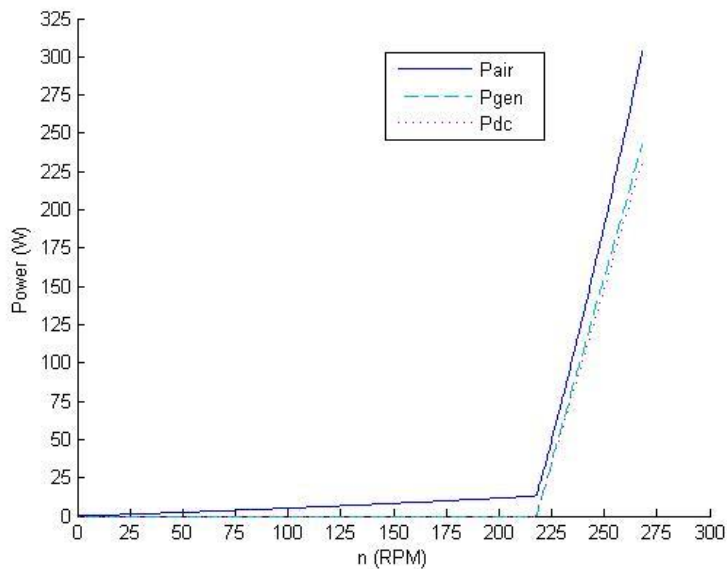
Σχήμα 7.1: Dc τάση, ανορθωμένη ΗΕΔ και φασική τερματική τάση της γεννήτριας σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής.

Η ανορθωμένη ΗΕΔ ως γνωστόν είναι ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.1. Προκύπτει από την προσομοίωση πως η ανορθωμένη ΗΕΔ ισούται με την τάση ανοιχτοκύκλωσης των συσσωρευτών για $n_{cutin}=218RPM$. Για μεγαλύτερες τιμές της ταχύτητας περιστροφής η dc τάση μετά τον ανορθωτή σταθεροποιείται στην τάση της μπαταρίας και αυξάνεται ανεπαίσθητα όσο αυξάνεται το ρεύμα που διέρχεται από την εσωτερική αντίσταση των συσσωρευτών. Η φασική τερματική τάση V_t που είναι η τάση στην είσοδο του ανορθωτή προκύπτει άμεσα από την dc τάση χρησιμοποιώντας τη σχέση (6.1).



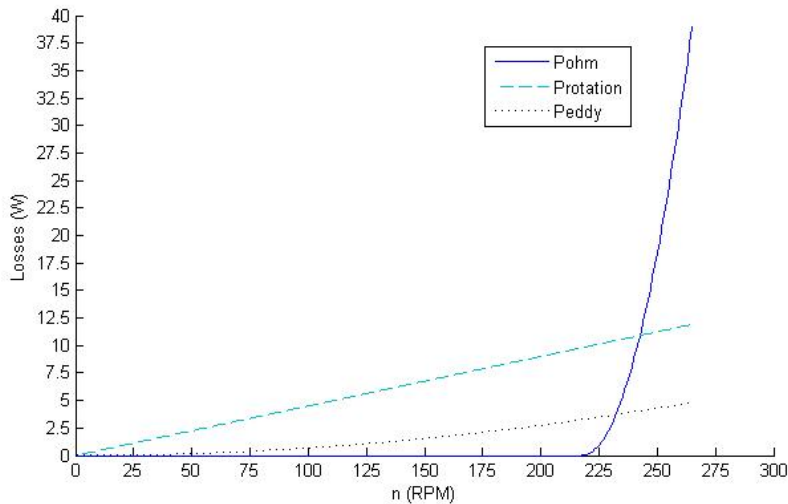
Σχήμα 7.2: Dc ρεύμα και ρεύμα γραμμής της γεννήτριας σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής.

Η μεταβολή του dc ρεύματος και του ρεύματος γραμμής της γεννήτριας σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα παριστάνεται στο Σχήμα 7.2. Παρατηρούμε πως ξεκινά η ροή ρεύματος στο κύκλωμα μόλις $n \geq n_{cutin}$, όπου η dc τάση παραμένει σχεδόν σταθερή. Η ανορθωμένη ΗΕΔ αυξάνεται γραμμικά με την ταχύτητα περιστροφής. Το dc ρεύμα ισούται με τη διαφορά της ανορθωμένης ΗΕΔ με την τάση ανοιχτοκύκλωσης των συσσωρευτών προς την συνολική σύνθετη αντίσταση του ισοδύναμου κυκλώματος (σχέση (6.8)). Έτσι, αύξηση της ταχύτητας περιστροφής οδηγεί σε μεγαλύτερη ΗΕΔ, και εφόσον η τιμή της αυτεπαγωγής είναι μικρή και οι ταχύτητες περιστροφής λειτουργίας είναι σχετικά χαμηλές, το ρεύμα θα αυξάνεται γραμμικά.



Σχήμα 7.3: Αεροδυναμική ισχύς της έλικας, ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας και ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο του ανορθωτή σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής.

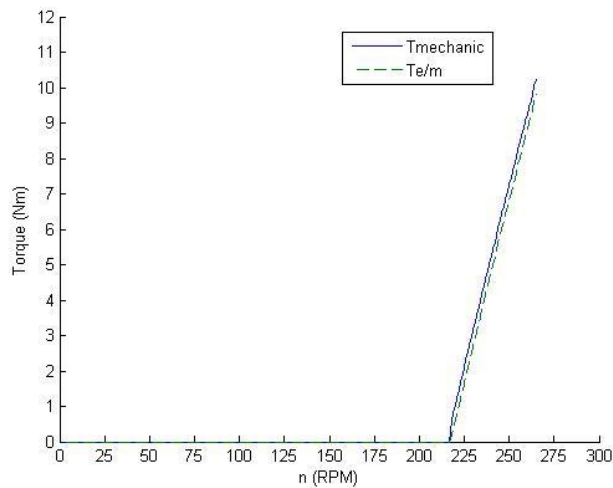
Η εξάρτηση της αεροδυναμικής ισχύος της έλικας, της ηλεκτρικής ισχύος της γεννήτριας και της ηλεκτρική ισχύος στην έξοδο του ανορθωτή με την ταχύτητα περιστροφής παριστάνεται στο Σχήμα 7.3. Εφόσον η dc τάση είναι σχεδόν σταθερή και το ρεύμα αυξάνεται γραμμικά με την ταχύτητα περιστροφής, η ισχύς στην έξοδο του ανορθωτή θα μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά με την ταχύτητα περιστροφής. Πολλαπλασιάζοντας την με την απόδοση του ανορθωτή προκύπτει η ισχύς της γεννήτριας οπότε και αυτή μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά. Η αεροδυναμική ισχύς υπολογίζεται προθέτοντας τις συνολικές απώλειες της γεννήτριας η εξάρτηση των οποίων με την ταχύτητα περιστροφής φαίνεται στο Σχήμα 7.4.



Σχήμα 7.4: Ωμικές απώλειες χαλκού, απώλειες δινορευμάτων του στάτη, και απώλειες περιστροφής της γεννήτριας σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής.

Οι απώλειες περιστροφής και οι απώλειες δινορευμάτων του τυλίγματος σχετίζονται με την ταχύτητα περιστροφής με τις σχέσεις (3.20) και (3.18) αντίστοιχα και είναι υπαρκτές για ταχύτητες περιστροφής μικρότερες από την ταχύτητα έναρξης, οπότε και η αεροδυναμική ισχύς δεν είναι μηδενική. Οι ωμικές απώλειες χαλκού που είναι η πιο σημαντική συνιστώσα απωλειών εμφανίζονται όταν ξεκινά η ροή ρεύματος στο κύκλωμα και εξαρτώνται από το τετράγωνο του ρεύματος άρα περίπου από το τετράγωνο της ταχύτητας περιστροφής.

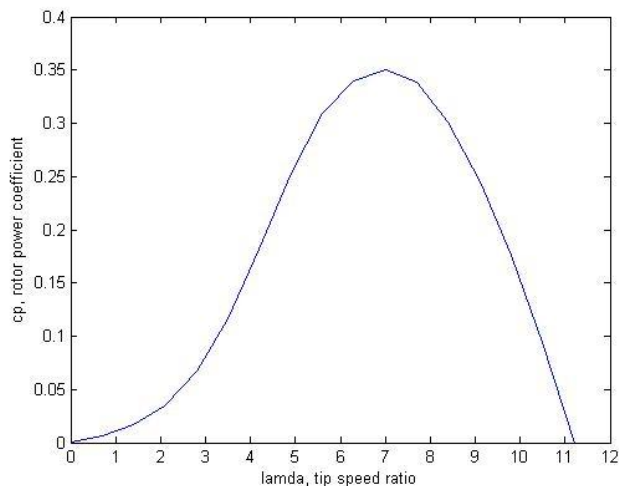
Η ηλεκτρομαγνητική ροπή στον άξονα περιστροφής υπολογίζεται διαιρώντας την ηλεκτρομαγνητική ισχύ με την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής και αντίστοιχα η μηχανική ροπή στον άξονα που ισούται με την αεροδυναμική ροπή στην έλικα προκύπτει διαιρώντας την αεροδυναμική ισχύ με την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 7.5



Σχήμα 7.5: Αεροδυναμική ροπή και ηλεκτρομαγνητική ροπή σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής.

Η παραγόμενη ισχύς για μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου από την ονομαστική περιορίζεται μέσω του συστήματος furling. Η ονομαστική ταχύτητα ανέμου στην οποία ξεκινά ο περιορισμός της ισχύος είναι σύμφωνα με τη σχεδίαση η ταχύτητα 10m/sec.

Μέχρι στιγμής ασχοληθήκαμε με το σύστημα της γεννήτριας με τους συσσωρευτές. Στη συνέχεια θα μελετήσουμε τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά της έλικας. Ο σχεδιαστής διαθέτει σημεία της καμπύλης $cp-\lambda$ από όπου προκύπτει η γραφική παράσταση του Σχήματος 7.6. Ο βέλτιστος λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου είναι 7 και ο μέγιστος αεροδυναμικός συντελεστής 0,35.



Σχήμα 7.6: Σχέση αεροδυναμικού συντελεστή του δρομέα με τον λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου.

Στη διάθεση μας δεν έχουμε την ακριβή σχέση $cp(\lambda)$. Το πρόγραμμα Matlab μπορεί να προσεγγίσει την καμπύλη με πολυωνυμικές εξισώσεις. Μετά από δοκιμές προκύπτει μία πολυωνυμική εξίσωση δεκάτου βαθμού που προσεγγίζει ικανοποιητικά την καμπύλη:

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

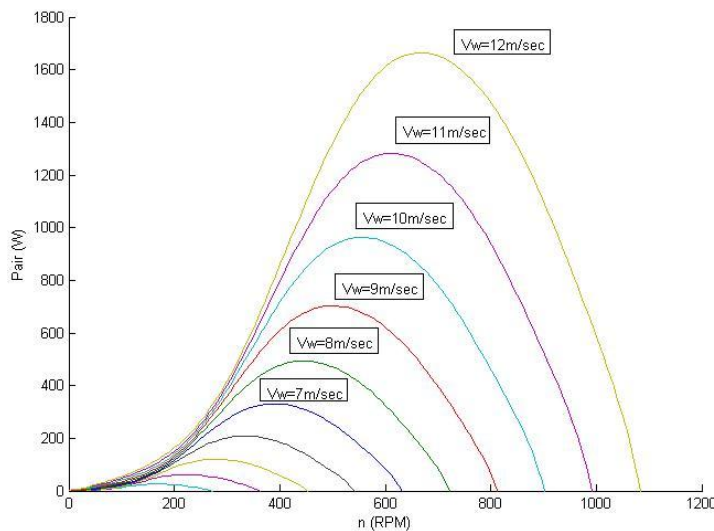
όπου:

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

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

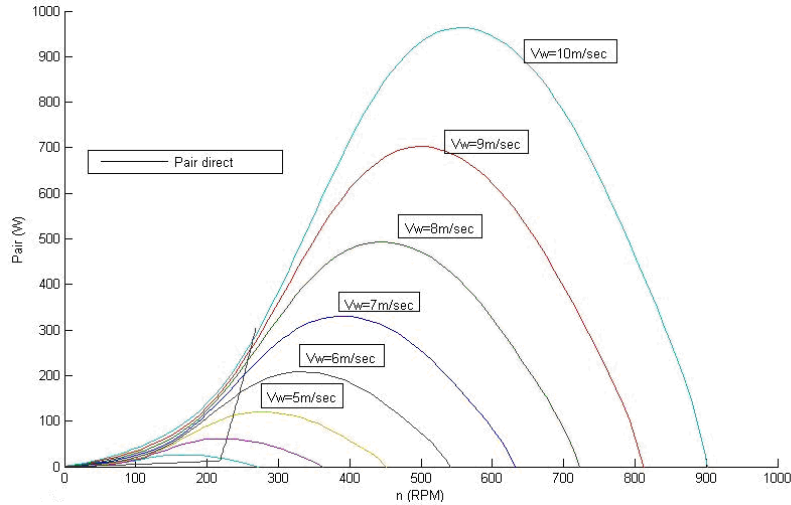
$$p10 = 0.0092843, p11 = 3.2532e-005$$

Για τον υπολογισμό της αεροδυναμικής ισχύος σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα για διάφορες ταχύτητες ανέμου υλοποιείται η παρακάτω μέθοδος στο Παράρτημα Δ. Για δεδομένη ταχύτητα ανέμου, μεταβάλλουμε την ταχύτητα περιστροφής, οπότε από την σχέση (6.4) υπολογίζεται το λ , από τη σχέση $cp(\lambda)$ υπολογίζεται το cp και τελικά προκύπτει η αεροδυναμική ισχύς από την σχέση (6.3). Στη συνέχεια η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται για διάφορες ταχύτητες ανέμου και χαράσσονται οι καμπύλες του Σχήματος 7.7:



Σχήμα 7.7: Αεροδυναμική ισχύς της έλικας σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής για διάφορες ταχύτητες ανέμου.

Το επόμενο βήμα είναι να συνδυάσουμε τις καμπύλες αεροδυναμικής ισχύος της έλικας με την αεροδυναμική ισχύ που προκύπτει με βάση το ηλεκτρικό κύκλωμα την οποία ονομάζουμε *Pairdirect*. Παρατηρούμε πως η καμπύλη της αεροδυναμικής ισχύος απέχει σημαντικά από την βέλτιστη καμπύλη. Αυτό σημαίνει πως αξιοποιείται μόνο ένα μέρος της δυνατότητας παραγωγής ισχύος της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 7.8: Αεροδυναμική ισχύς σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής για την απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές σε κοινό διάγραμμα με τις καμπύλες αεροδυναμικής ισχύος της έλικας σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής για διάφορες ταχύτητες ανέμου.

Εν συνεχεία θα χαράξουμε την καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας βρίσκοντας τη σχέση μεταξύ της ταχύτητας του ανέμου και της ταχύτητας περιστροφής. Για να γίνει αυτό θα εξισώσουμε την αεροδυναμική ισχύ της έλικας με την αεροδυναμική ισχύ που προκύπτει από το ηλεκτρικό κύκλωμα.

$$Pair = Pairedirect \Leftrightarrow$$

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot cp(\lambda) \cdot A \cdot Vw^3 = Pairedirect$$

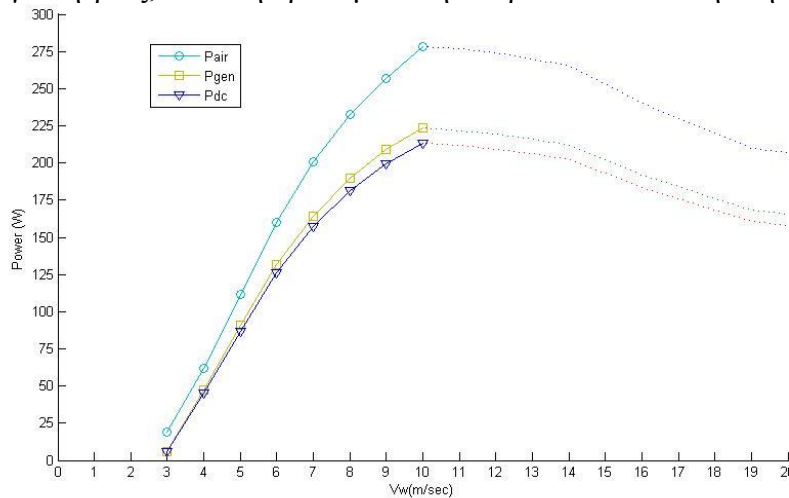
Αντικαθιστώντας στη σχέση $cp(\lambda)$ την ταχύτητα του ανέμου και την ταχύτητα περιστροφής προκύπτει η πολυωνμική εξίσωση που παρουσιάζεται παρακάτω και επιλύεται στο πρόγραμμα του Παραρτήματος Γ. Η ταχύτητα του ανέμου υπολογίζεται από την πραγματική ρίζα κατάλληλης τιμής της πολυωνμικής εξίσωσης για κάθε ταχύτητα περιστροφής. V είναι η ταχύτητα του ανέμου και w η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής.

$$const = 1/2 * density * pi * Radius^2$$

$$p1 * const * (w * Radius)^{10} + p2 * const * (w * Radius)^9 * V + p3 * const * (w * Radius)^8 * V^2 + p4 * const * (w * Radius)^7 * V^3 + p5 * const * (w * Radius)^6 * V^4 + p6 * const * (w * Radius)^5 * V^5 + p7 * const * (w * Radius)^4 * V^6 + p8 * const * (w * Radius)^3 * V^7 + p9 * const * (w * Radius)^2 * V^8 + p10 * const * (w * Radius)^1 * V^9 + p11 * const * V^{10} - Pairedirect(i) * V^7 = 0$$

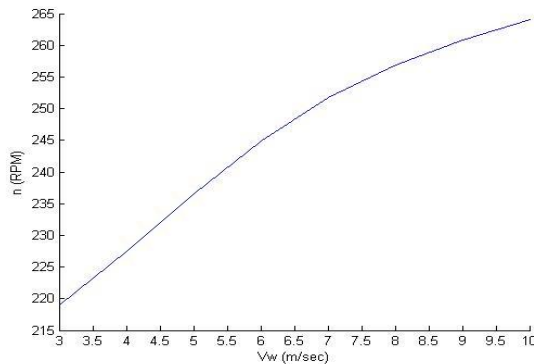
Έτσι, προκύπτει η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας δηλαδή η σχέση ηλεκτρικής ισχύος της γεννήτριας με την ταχύτητα του ανέμου (Σχήμα 7.9). Η ονομαστική ισχύς της γεννήτριας ισούται με $P_{gen_{nom}} = 224W$. Κατά την έναρξη της λειτουργίας η ταχύτητα του ανέμου είναι $V_{wcutin} = 3m/sec$ και η ταχύτητα περιστροφής $n_{cutin} = 219RPM$. Για

ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες από την ονομαστική, όπου ενεργοποιείται στο σύστημα furling, δεν υπήρχε η δυνατότητα ακριβούς προσομοίωσης της συμπεριφοράς της ανεμογεννήτριας. Με βάση μία μικρή ανεμογεννήτρια του εμπορίου που χρησιμοποιεί το σύστημα περιορισμού της ισχύος furling χαράσσονται σχετικά αυθαίρετα τα τμήματα των καμπύλων του Σχήματος 7.9 για μεγαλύτερες ταχύτητες από 10m/sec . Για περιοχές που δεν παρουσιάζουν υψηλό αεροδυναμικό η παραγόμενη ισχύς για ταχύτητες μεγαλύτερες της ονομαστικής συμβάλλει λιγότερο στη ενεργειακή απόδοση της ανεμογεννήτριας, οπότε η προσομοίωση θεωρείται ικανοποιητική.



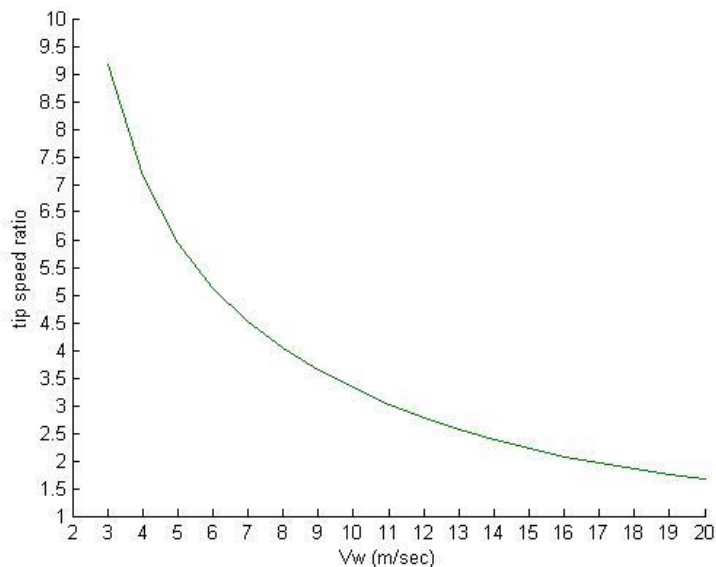
Σχήμα 7.9: Καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας για την απευθείας σύνδεση. Στο ίδιο διάγραμμα παριστάνονται οι αντίστοιχες καμπύλες της αεροδυναμικής ισχύος και της ισχύος εξόδου του ανορθωτή.

Η γραφική παράσταση του Σχήματος 7.10 δείχνει την εξάρτηση της ταχύτητας περιστροφής από την ταχύτητα του ανέμου που υπολογίστηκε με το προηγούμενο πρόγραμμα. Για ταχύτητες περιστροφής μεγαλύτερες της ονομαστικής και μικρότερες της ταχύτητας έναρξης η σχέση δεν υπολογίζεται με ακρίβεια αλλά ούτε έχει ιδιαίτερη αξία για την μελέτη για αυτό και δεν παριστάνεται στο διάγραμμα. Για ονομαστική ταχύτητα ανέμου $V_{wnom}=10\text{m/sec}$ η ονομαστική ταχύτητα περιστροφής ισούται με $n_{nom}=265\text{RPM}$. Αυτή η τιμή χρησιμοποιήθηκε ως το άνω όριο στα Σχήματα 7.1 μέχρι 7.5.



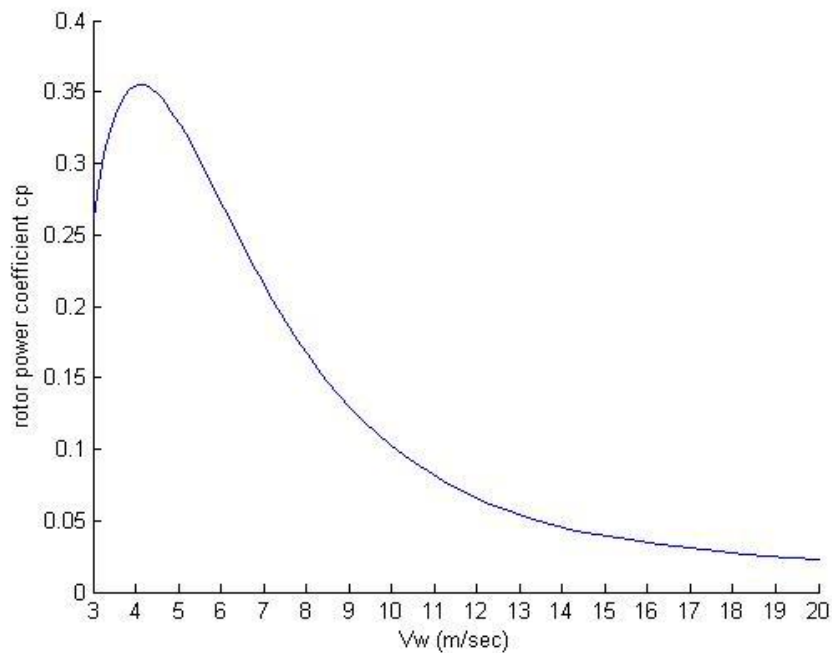
Σχήμα 7.10: Εξάρτηση της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα από την ταχύτητα του ανέμου.

Με βάση τη σχέση μεταξύ της ταχύτητας περιστροφής και της ταχύτητας ανέμου υπολογίζεται ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου από την εξίσωση (6.4) και η εξάρτηση του από την ταχύτητα του ανέμου χαράσσεται στο Σχήμα 7.11. Παρατηρούμε πως κατά την ένταξη της ανεμογεννήτριας η τιμή του λόγου είναι υψηλότερη από την βέλτιστη τιμή. Η βέλτιστη τιμή 7 αποκτάται για ταχύτητα ανέμου περίπου 4 m/sec . Στη συνέχεια ο λόγος μειώνεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου. Για ταχύτητες μεγαλύτερες της ονομαστικής τα αποτελέσματα δεν είναι ακριβή, αλλά δίνεται μία ποιοτική αναπαράσταση. Για να υπάρχει μέγιστη απορρόφηση ισχύος ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου πρέπει να παίρνει την βέλτιστη τιμή για κάθε ταχύτητα ανέμου το οποίο δεν ισχύει στην περίπτωση της απευθείας σύνδεσης σε συσσωρευτές.



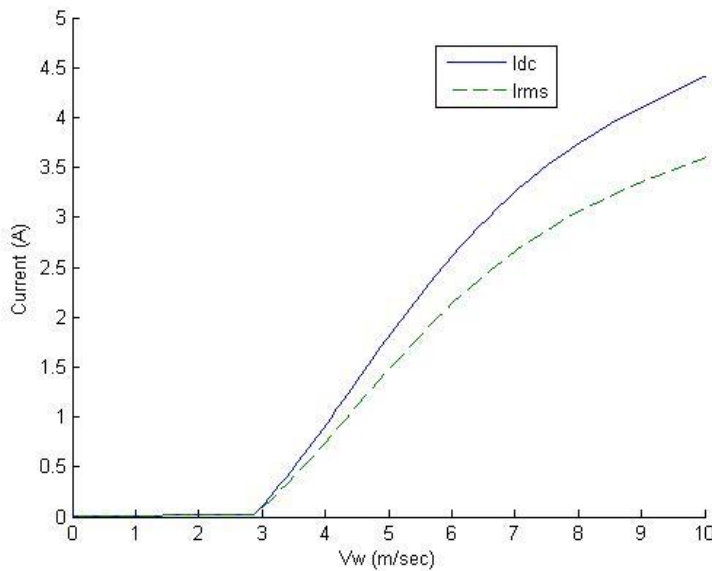
Σχήμα 7.11: Λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου.

Στο διάγραμμα του Σχήματος 7.12 φαίνεται η τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή του δρομέα για διαφορές ταχύτητες ανέμου. Παρατηρούμε πως για χαμηλές ταχύτητες ανέμου η απορρόφηση ισχύος από τον άνεμο θα είναι μεγαλύτερη από ότι στις υψηλότερες.



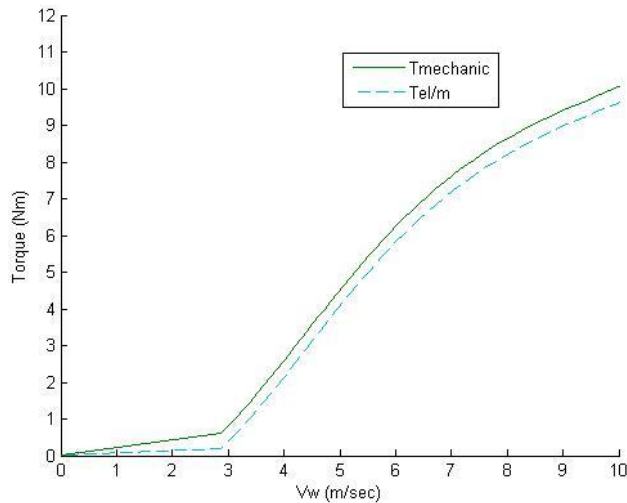
Σχήμα 7.12: Αεροδυναμικός συντελεστής σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου.

Στη συνέχεια γνωρίζοντας τη σχέση μεταξύ ταχύτητας περιστροφής και ταχύτητας του ανέμου χαράσσονται οι σχέσεις του ρεύματος γραμμής και του dc ρεύματος σε σχέση με τη ταχύτητα του ανέμου για τιμές χαμηλότερες της ονομαστικής (Σχήμα 7.13) ώστε να έχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα. Το ονομαστικό ρεύμα της γεννήτριας προκύπτει $I_{rms_{nom}}=3,6A$.



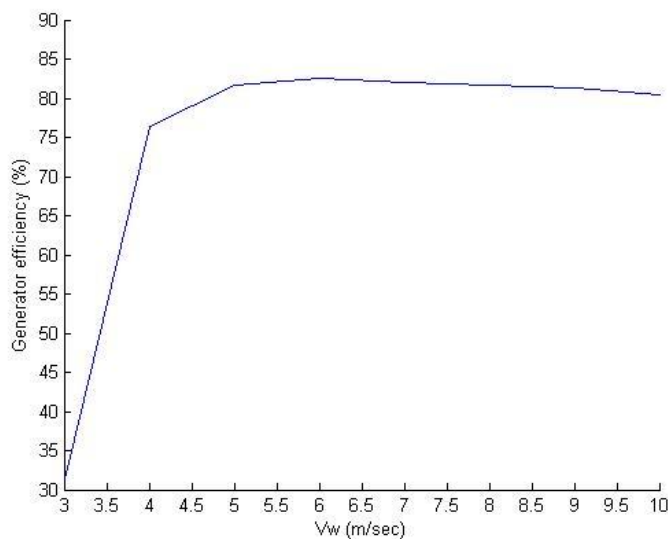
Σχήμα 7.13: Ρεύμα γραμμής και dc ρεύμα σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου.

Ομοίως χαράσσεται η σχέση της μηχανικής ροπής της γεννήτριας ή αλλιώς της αεροδυναμικής ροπής της έλικας καθώς και της ηλεκτρομαγνητικής ροπής της γεννήτριας σε σχέση με τη ταχύτητα του ανέμου (Σχήμα 7.14). Η ονομαστική τιμή της ηλεκτρομαγνητικής ροπής ισούται με $T_{el}/m_{nom}=9.6Nm$.



Σχήμα 7.14: Αεροδυναμική ροπή της έλικας και ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου.

Τέλος, υπολογίζεται η απόδοση της γεννήτριας για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου (Σχήμα 7.15). Η απόδοση είναι ιδιαίτερα χαμηλή κατά την έναρξη της λειτουργίας, παίρνει την μέγιστη τιμή 82.4% για ταχύτητα ανέμου περίπου 5m/sec, και στη συνέχεια μειώνεται με χαμηλό ρυθμό μέχρι την τιμή 80%.



Σχήμα 7.15: Απόδοση της γεννήτριας για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου.

Λαμβάνοντας υπόψη κυρίως τον αεροδυναμικό συντελεστή του δρομέα και την απόδοση της γεννήτριας σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου, συμπεραίνουμε πως η ανεμογεννήτρια αποδίδει καλύτερα σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου.

7.2: Σύνδεση με σύστημα μεγιστοποίησης της ισχύος (MPPT)

Στην παράγραφο αυτή προσομοιώνεται η λειτουργία της ανεμογεννήτριας συνδεδεμένης σε ζυγό DC όταν κατάλληλος μετατροπέας εξασφαλίζει την μεγιστοποίηση της αποδιδόμενης ισχύος (MPPT). Γίνεται περιγραφή του προγράμματος που υλοποιήθηκε στο πρόγραμμα Matlab και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

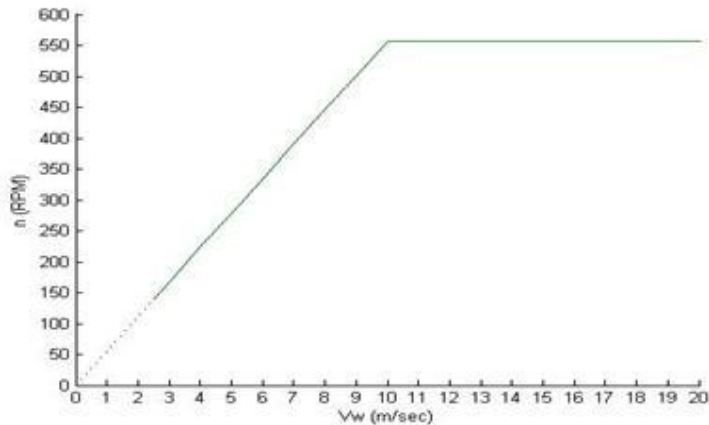
Σε αντίθεση με την απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές, όπου το ηλεκτρικό κύκλωμα «επιβάλλεται» στα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά της έλικας, στη λειτουργία με MPPT η βέλτιστη αεροδυναμική συμπεριφορά της έλικας καθορίζει τα ηλεκτρικά μεγέθη. Για κάθε ταχύτητα ανέμου η ανεμογεννήτρια λειτουργεί με το βέλτιστο λόγο ταχύτητας ακροπερυγίου $\lambda=7$ και τον μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή $c_p=0.35$ για την δεδομένη έλικα.

Το πλήρες πρόγραμμα που υλοποιήθηκε βρίσκεται στο Παράρτημα Ε και αφορά μόνο τις ταχύτητες ανέμου μεταξύ της ταχύτητας έναρξης λειτουργίας και της ονομαστικής. Για μικρότερες και μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου η λειτουργία προβλέπεται με δυσκολία και δεν έχει σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα. Τα δεδομένα του προγράμματος είναι τα ίδια με της απευθείας σύνδεσης με πρόσθετο δεδομένο τη σχέση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής με το ρεύμα γραμμής της γεννήτριας που προσομοιώθηκε στην παράγραφο 4.2.3. Θέτουμε επίσης αντίσταση καλωδίου $60m$, διατομής $6mm^2$ μεταξύ της γεννήτριας και του ανορθωτή, που θεωρούμε πως συμπεριλαμβάνεται στην αντίσταση της γεννήτριας.

Για κάθε ταχύτητα ανέμου υπολογίζεται η ταχύτητα περιστροφής για βέλτιστο λόγο ταχύτητας ακροπερυγίου καθώς και η αεροδυναμική ισχύς για μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή. Αφαιρώντας τις απώλειες περιστροφής υπολογίζεται η ηλεκτρομαγνητική ισχύς της γεννήτριας οπότε και η ηλεκτρομαγνητική ροπή στον άξονα. Γνωρίζοντας από προηγούμενη προσομοίωση τη σχέση ηλεκτρομαγνητικής ροπής με το ρεύμα γραμμής, προκύπτει το ρεύμα γραμμής της γεννήτριας. Από την ταχύτητα περιστροφής και τη πεπλεγμένη ροή σε κενό φορτίο υπολογίζεται η ΗΕΔ της γεννήτριας. Με γνωστή την σύγχρονη αυτεπαγωγή της γεννήτριας υπολογίζεται από την σχέση (4.21) η γωνία ισχύος δ και από την σχέση (4.20) η τερματική τάση της γεννήτριας. Έτσι, με γνωστό το ρεύμα γραμμής και μοναδιαίο συντελεστή ισχύος λόγω του ανορθωτή, υπολογίζεται η ηλεκτρική ισχύς εξόδου της γεννήτριας. Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (6.1) και (6.2) υπολογίζονται τα dc μεγέθη μετά την ανόρθωση.

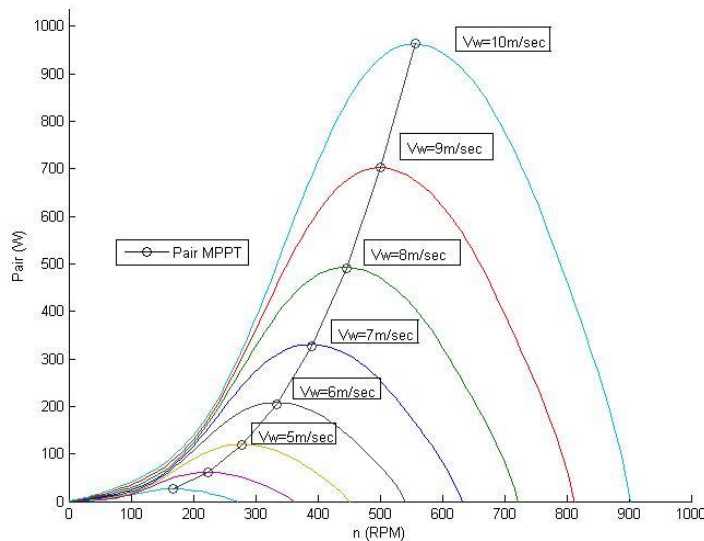
Η ταχύτητα έναρξης λειτουργίας στην οποία η αεροδυναμική ισχύς ξεπερνά τις απώλειες είναι $V_{wcutin}=2.5m/sec$. Για τους ίδιους λόγους με την απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές θα μελετηθεί η λειτουργία της ανεμογεννήτριας για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ταχύτητας έναρξης λειτουργίας και μικρότερες της ονομαστικής, όπου η ανεμογεννήτρια λειτουργεί με MPPT.

Ο λόγος ταχύτητας ακροπερυγίου είναι ο βέλτιστος, οπότε η ταχύτητα περιστροφής είναι ευθέως ανάλογη της ταχύτητας του ανέμου (σχέση (6.4)) και παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.16. Η ταχύτητα περιστροφής εκκίνησης είναι $n_{cutin}=139\text{ RPM}$ και η ονομαστική ταχύτητα περιστροφής είναι $n_{nom}=557\text{ RPM}$. Η ονομαστική συχνότητα προκύπτει $f_{nom}=55.7\text{ Hz}$. Για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής η ταχύτητα περιστροφής παραμένει σταθερή χάρη στο σύστημα περιορισμού της ισχύος.



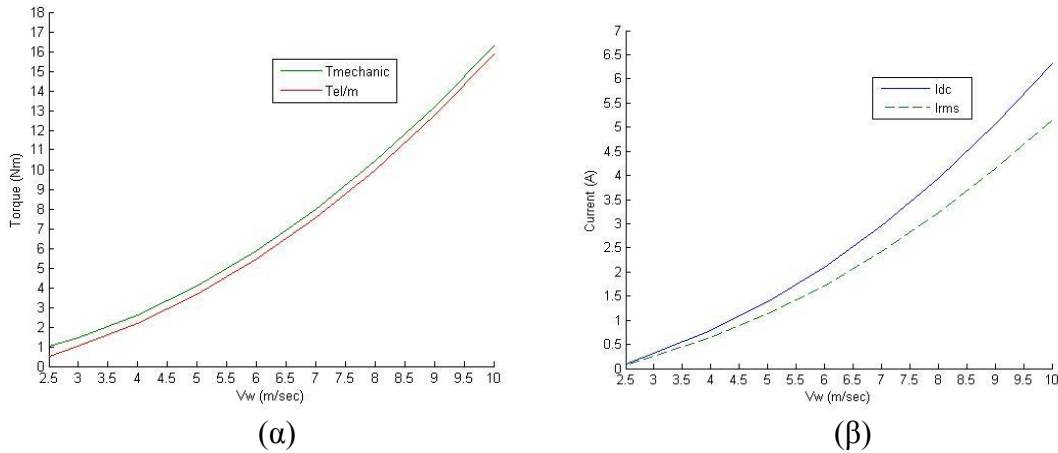
Σχήμα 7.16: Χαρακτηριστική μεταβολής των στροφών.

Η αεροδυναμική ισχύς λειτουργίας σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής για μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.17. Στο ίδιο διάγραμμα παριστάνεται η σχέση της αεροδυναμικής ισχύος της έλικας με την ταχύτητα περιστροφής για διάφορες ταχύτητες ανέμου με βάση τα αεροδυναμικά της χαρακτηριστικά. Είναι φανερό πως για λειτουργία με MPPT η αεροδυναμική ισχύς της έλικας ακολουθεί την βέλτιστη καμπύλη και παρουσιάζεται μέγιστη απόδοση ισχύος.



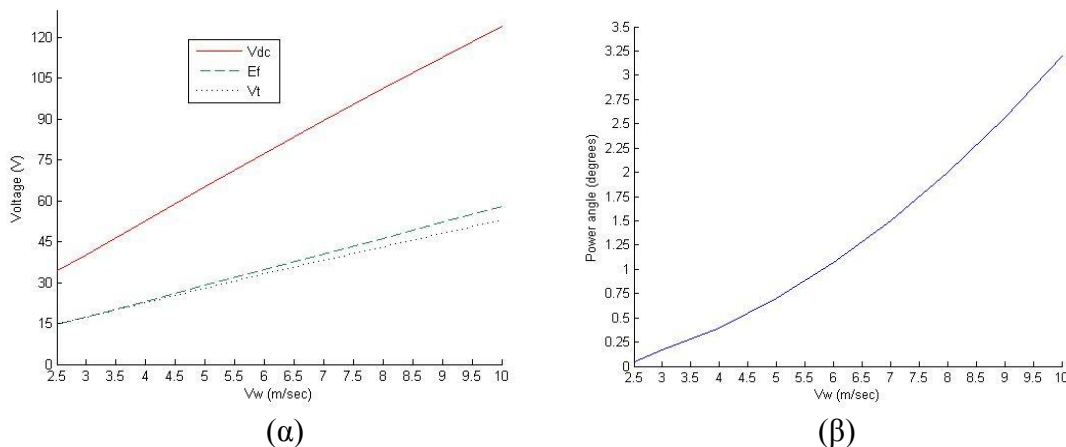
Σχήμα 7.17: Χαρακτηριστική ελέγχου της ανεμογεννήτριας.

Η μεταβολή της μηχανικής και της ηλεκτρομαγνητικής ροπής με την ταχύτητα του ανέμου παριστάνεται στο Σχήμα 7.18α από όπου προκύπτουν οι σχέσεις ρεύματος γραμμής και dc ρεύματος με την ταχύτητα του ανέμου που αναπαρίστανται στο Σχήμα 7.18β. Η ονομαστική ηλεκτρομαγνητική ροπή και το ονομαστικό ρεύμα γραμμής υπολογίζονται $T_{el}/m_{nom}=15,9Nm$ και $I_{rms_{nom}}=5,2A$.



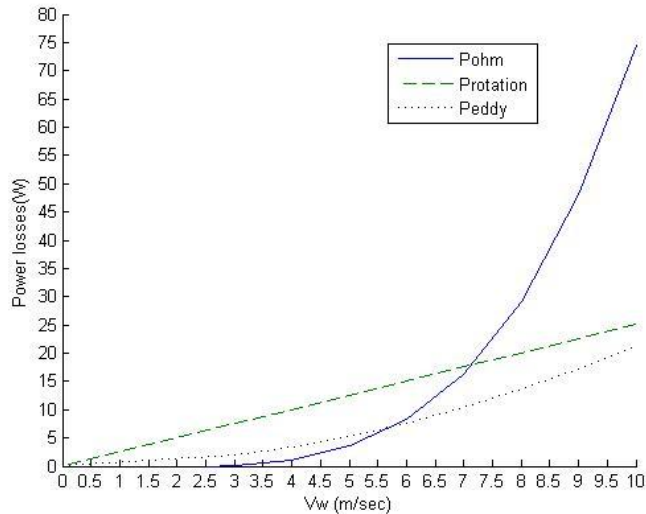
Σχήμα 7.18: (α) Αεροδυναμική ροπή και ηλεκτρομαγνητική ροπή σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου. (β) Dc ρεύμα και ρεύμα γραμμής σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου.

Στα επόμενα σχήματα παριστάνεται η σχέση της ΗΕΔ, της τερματικής τάσης της γεννήτριας και της τάσης μετά τον ανορθωτή (Σχήμα 7.19α) καθώς και της γωνίας ισχύος δ της γεννήτριας σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής (Σχήμα 7.19β). Η ΗΕΔ είναι ευθέως ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής άρα και της ταχύτητας του ανέμου οπότε διέρχεται από την αρχή των αξόνων. Η γωνία ισχύος αυξάνεται όσο αυξάνεται το ρεύμα της γεννήτριας, αλλά παίρνει μικρές τιμές εξαιτίας της μικρής σύγχρονης αυτεπαγωγής της γεννήτριας. Η τερματική τάση της γεννήτριας προκύπτει από την πτώση τάσης στη σύνθετη αντίσταση της γεννήτριας και παίρνει λίγο μικρότερες τιμές από την ΗΕΔ. Για ονομαστική ταχύτητα ανέμου η ονομαστική τάση της γεννήτριας ισούται με $V_{tnom}=53V$.



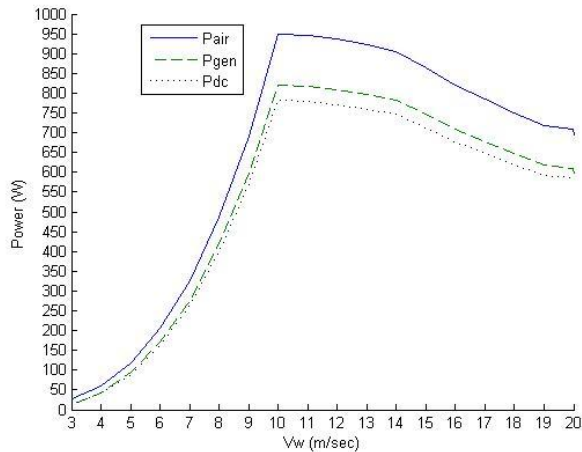
Σχήμα 7.19: (α) Dc τάση, ΗΕΔ, τερματική τάση της γεννήτριας σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου. (β) Γωνία ισχύος δ σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου.

Οι μηχανικές και ηλεκτρικές απώλειες παριστάνονται στο Σχήμα 7.20. Οι απώλειες περιστροφής είναι ευθέως ανάλογες της ταχύτητας περιστροφής άρα και της ταχύτητας του ανέμου, οι απώλειες δινορευμάτων εξαρτώνται από το τετράγωνο της ταχύτητας περιστροφής και οι ωμικές απώλειες χαλκού από το τετράγωνο του ρεύματος γραμμής. Η πιο σημαντική συνιστώσα απωλειών είναι οι ωμικές απώλειες χαλκού στον στάτη, ενώ οι απώλειες δινορευμάτων του τυλίγματος αποκτούν μεγαλύτερη σημασία εξαιτίας των αυξημένων τιμών της ταχύτητας περιστροφής.



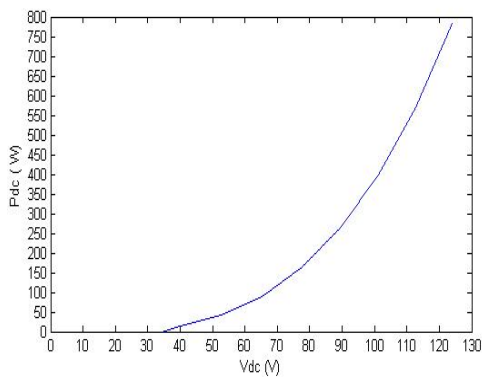
Σχήμα 7.20: Ωμικές απώλειες χαλκού, απώλειες δινορευμάτων του στάτη και απώλειες περιστροφής σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου.

Η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας δηλαδή η σχέση της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου της γεννήτριας με την ταχύτητα του ανέμου παριστάνεται στο Σχήμα 7.21. Αφαιρώντας από την αεροδυναμική ισχύ της έλικας τις αντίστοιχες απώλειες βρίσκεται η ηλεκτρική ισχύς εξόδου της γεννήτριας και του ανορθωτή. Για ονομαστική ταχύτητα ανέμου $V_{w_{nom}}=10\text{m/sec}$ η ονομαστική ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας $P_{gen_{nom}}=820\text{W}$. Για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής ενεργοποιείται το σύστημα furling και γίνεται μία ποιοτική αναπαράσταση της μεταβολής.

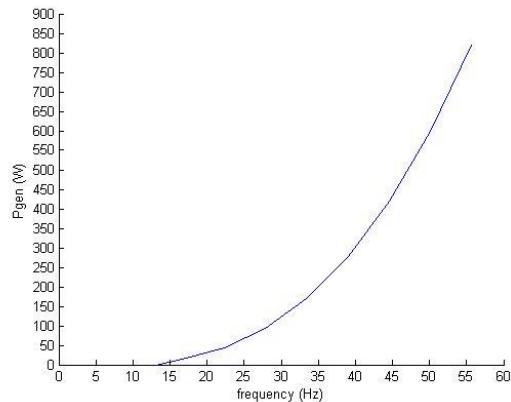


Σχήμα 7.21: Καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας και οι αντίστοιχες σχέσεις αεροδυναμικής ισχύος και ισχύος μετά τον ανορθωτή με την ταχύτητα του ανέμου.

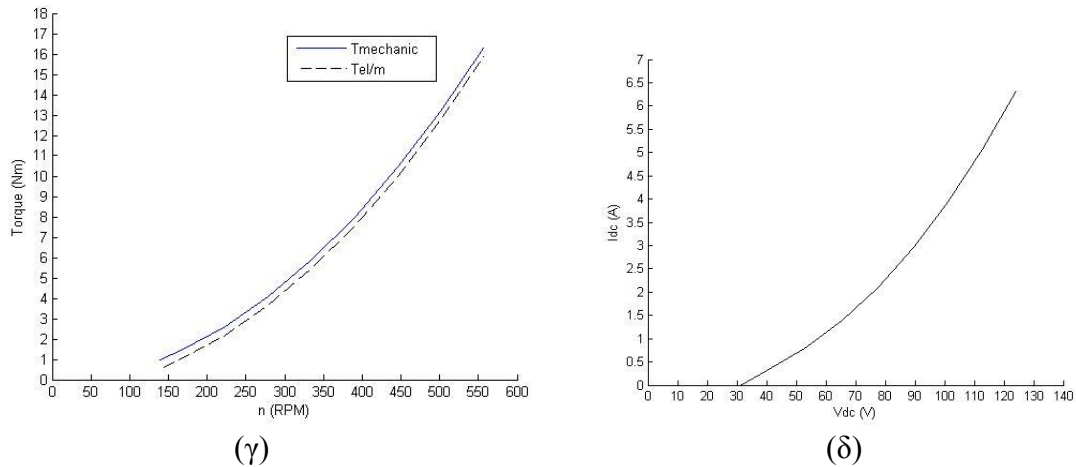
Στη συνέχεια παριστάνονται διαφορετικές χαρακτηριστικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη επίτευξη της λειτουργίας MPPT. Στο προηγούμενο κεφάλαιο είδαμε να χρησιμοποιούνται οι σχέσεις: ηλεκτρικής ισχύος στην έξοδο του ανορθωτή σε σχέση με την τάση εξόδου του (Σχήμα 7.22α), ηλεκτρικής ισχύος της γεννήτριας με την συχνότητα του στάτη (Σχήμα 7.22β), αεροδυναμικής ισχύος με την ταχύτητα περιστροφής για διάφορες ταχύτητες ανέμου (Σχήμα 7.17). Σε άλλες μεθόδους ο έλεγχος γίνεται με την χαρακτηριστική ροπής στρωφών (Σχήμα 7.22γ) ή την σχέση dc ρεύματος με dc τάση (Σχήμα 7.22δ). Πριν τον DC/DC μετατροπέα δεν τοποθετούνται πυκνωτές, όπως γίνεται στην διάταξη της παραγράφου (6.2.2.2), επειδή η μείωση της σύνθετης αντίστασης του κυκλώματος θα οδηγήσει την καμπύλη *Pair-n* του Σχήματος 7.8 στο να γίνει πιο απότομη.



(α)

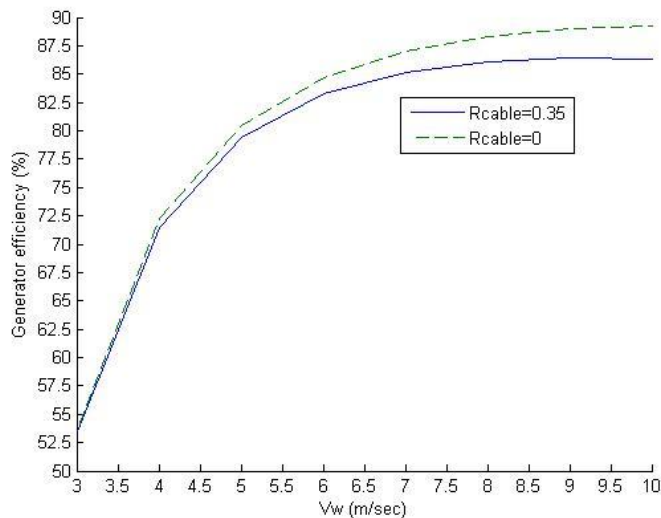


(β)



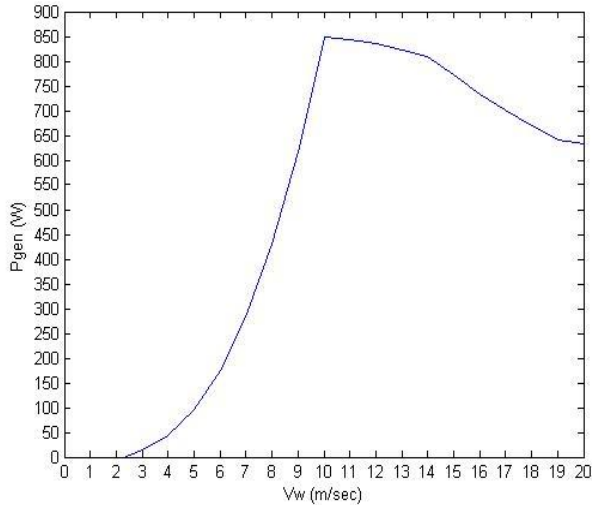
Σχήμα 7.22: Διαφορετικές χαρακτηριστικές για τον έλεγχο της ανεμογεννήτριας: (α) Ισχύς εξόδου του ανορθωτή σε σχέση με την dc τάση. (β) Ισχύς εξόδου της γεννήτριας σε σχέση με την συχνότητα του στάτη. (γ) Ροπή σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής. (δ) Dc ρεύμα σε σχέση με την dc τάση.

Έπειτα, υπολογίζεται η απόδοση της γεννήτριας για διάφορες ταχύτητες ανέμου (Σχήμα 7.23) η οποία ξεκινά από χαμηλές τιμές γίνεται 80% σε ταχύτητα 5m/sec και παίρνει την μέγιστη τιμή 86.4% για ταχύτητα 9m/sec δηλαδή κοντά στην ονομαστική. Στο ίδιο διάγραμμα παριστάνεται η απόδοση της γεννήτριας θεωρώντας πως βρίσκεται πολύ κοντά στον ανορθωτή και η αντίσταση του καλωδίου αγνοείται, ώστε να υπάρξει καλύτερη εικόνα της λειτουργίας της γεννήτριας απομονωμένη. Η μέγιστη τιμή προκύπτει για ονομαστική ταχύτητα ανέμου και είναι 89.3%



Σχήμα 7.23: Απόδοση της γεννήτριας σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου με αντίσταση καλωδίου ανάμεσα στη γεννήτρια και στον ανορθωτή και χωρίς αντίσταση καλωδίου.

Τέλος, στο Σχήμα 7.24 παριστάνεται η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας χωρίς αντίσταση καλωδίου που θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της ενεργειακής της απόδοσης. Η ονομαστική ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας ισούται με $P_{gen_{nom}}=848W$



Σχήμα 7.24: Καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας χωρίς αντίσταση καλωδίου μεταξύ της γεννήτριας και του ανορθωτή.

7.3: Εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης της ανεμογεννήτριας και πραγματοποίηση συγκρίσεων

Για την εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης μίας ανεμογεννήτριας είναι απαραίτητη η γνώση της καμπύλης ισχύος καθώς και της στατιστικής κατανομής της ταχύτητας του ανέμου στην περιοχή που πρόκειται να τοποθετηθεί.

Η στατιστική κατανομή της ταχύτητας του ανέμου περιγράφεται γενικά από την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Weibull [30]:

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

όπου k είναι η παράμετρος μορφής της κατανομής και c η παράμετρος κλίμακας. Συνηθέστερη τιμή του k είναι η τιμή 2 από όπου προκύπτει η κατανομή Rayleigh:

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

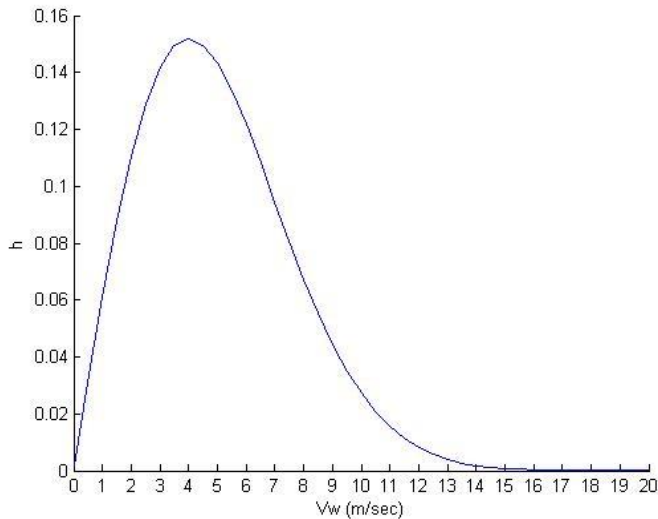
Η παράμετρος κλίμακας c για δεδομένη παράμετρο μορφής, καθορίζει την μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου με την ακόλουθη σχέση:

$$\overline{V_w} \approx 0,886 \cdot c$$

Έτσι, η κατανομή Rayleigh προκύπτει:

$$h(V_w) = \frac{1,57 \cdot V_w}{\overline{V_w}^2} e^{-0,785 \left(\frac{V_w}{\overline{V_w}}\right)^2} \quad (7.1)$$

όπου $\overline{V_w}$ η μέση ταχύτητα του ανέμου στο χρονικό διάστημα που εξετάζεται. Με βάση την σχέση (7.1) χαράσσεται η στατιστική κατανομή του ανέμου για κατανομή Rayleigh και μέση ταχύτητα ανέμου 5m/sec (Σχήμα 7.25).



Σχήμα 7.25: Στατιστική κατανομή του ανέμου για κατανομή Rayleigh και μέση ταχύτητα ανέμου 5m/sec.

Με γνωστή την συνάρτηση της καμπύλης ισχύος της ανεμογεννήτριας $P(V_w)$ υπολογίζεται η συνολική παραγόμενη ενέργεια από την ανεμογεννήτρια σε χρονικό διάστημα T :

$$E = T \int_0^{\infty} h(V_w) \cdot P(V_w) \cdot dV_w \quad (7.2)$$

Συνήθως το χρονικό διάστημα που εξετάζεται είναι ένα έτος οπότε $T=8760$ ώρες.

Ο συντελεστής χρησιμοποίησης ορίζεται ως το πηλίκο της παραγόμενης ενέργειας προς την ενέργεια που θα είχε παραχθεί στον ίδιο χρόνο αν η ανεμογεννήτρια παρήγαγε διαρκώς την ονομαστική της ισχύ:

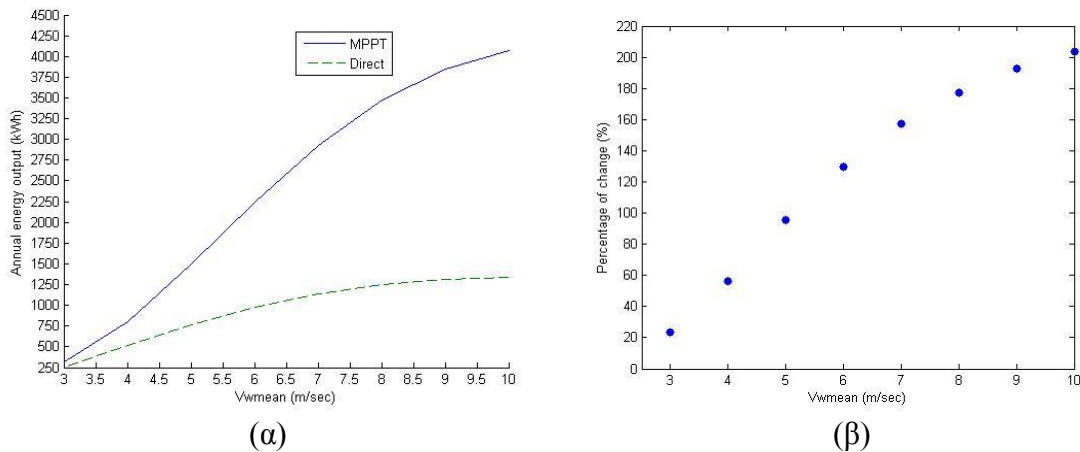
$$CF = \frac{E}{T \cdot P_{gen_{nom}}} \quad (7.3)$$

Ο συντελεστής χρησιμοποίησης σχετίζεται άμεσα με τη βιωσιμότητα μίας ενεργειακής επένδυσης.

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις αναπτύσσεται πρόγραμμα στο Matlab που υπολογίζει την ενεργειακή απόδοση μίας ανεμογεννήτριας δεδομένης της καμπύλης ισχύος της για περιοχές με διάφορες μέσες ταχύτητες ανέμου χρησιμοποιώντας την κατανομή Rayleigh. Από τα σημεία των γραφικών παραστάσεων των καμπύλων ισχύος που προέκυψαν, υπολογίζονται στο πρόγραμμα Matlab δύο πολυωνυμικές εξισώσεις που προσεγγίζουν τις πραγματικές καμπύλες, πρώτα για ταχύτητες ανέμου από 2,5-10m/sec και μετά από 10-20m/sec ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα. Η διαδικασία

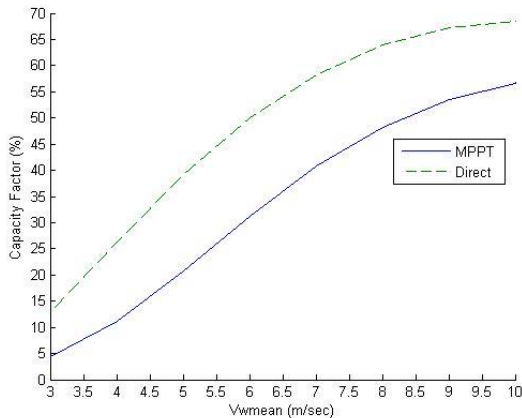
επαναλαμβάνεται για όλες τις μελετώμενες περιπτώσεις. Το πλήρες πρόγραμμα βρίσκεται στο Παράρτημα Ζ.

Η ενεργειακή απόδοση της ανεμογεννήτριας στη διάρκεια ενός έτους σε διάφορες ταχύτητες ανέμου για σύνδεση απευθείας σε συσσωρευτές και με λειτουργία MPPT παριστάνεται στο Σχήμα 7.26α. Η ποσοστιαία αύξηση της ενεργειακής απόδοσης με τη λειτουργία MPPT φαίνεται στο Σχήμα 7.26β. Όπως ήταν αναμενόμενο η ενεργειακή απόδοση αυξάνεται όσο αυξάνεται η μέση ταχύτητα του ανέμου και στις δύο περιπτώσεις για ταχύτητες μικρότερες των 10m/sec . Η αύξηση της ενεργειακής απόδοσης για συνηθισμένες μέσες ταχύτητες ανέμου κυμαίνεται από 55% μέχρι 155% και γίνεται εντονότερη όσο αυξάνεται η μέση ταχύτητα του ανέμου. Για μέση ταχύτητα ανέμου 5m/sec , που είναι η χαρακτηριστικότερη ταχύτητα ανέμου για τοποθέτηση μικρής ανεμογεννήτριας, η ετήσια ενεργειακή απόδοση για απευθείας σύνδεση είναι 767 kWh , δηλαδή μέση ισχύς 88W , ενώ για λειτουργία MPPT είναι 1498 kWh , δηλαδή μέση ισχύς 171W . Έτσι, με την λειτουργία MPPT παρουσιάζεται αύξηση στην παραγόμενη ενέργεια κατά 95%. Σημειώνουμε πως στην πραγματικότητα η χαρακτηριστική καμπύλη που προκαλείται από το σύστημα MPPT δεν ταυτίζεται ακριβώς με τη βέλτιστη καμπύλη κάθε χρονική στιγμή, οπότε η πραγματική ενεργειακή απόδοση της ανεμογεννήτριας θα είναι λίγο μικρότερη.



Σχήμα 7.26: (α) Ετήσια ενεργειακή απόδοση της ανεμογεννήτριας για διάφορες μέσες ταχύτητες ανέμου για την απευθείας σύνδεση και τη σύνδεση με MPPT. (β) Ποσοστιαία αύξηση της ετήσιας ενεργειακής απόδοσης με τη λειτουργία MPPT.

Ο συντελεστής χρησιμοποίησης και για τους δύο τρόπους σύνδεσης παριστάνεται στο Σχήμα 7.27. Για την απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές ο συντελεστής χρησιμοποίησης παίρνει υψηλές τιμές που οφείλονται στην χαμηλή ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας, εξαιτίας του χαμηλού αεροδυναμικού συντελεστή κατά την ονομαστική ταχύτητα. Σε μέση ταχύτητα 5m/sec ο συντελεστής χρησιμοποίησης ισούται με 39% που είναι υψηλός. Οι τιμές του συντελεστή χρησιμοποίησης για σύνδεση με MPPT κυμαίνονται σε συνηθισμένες τιμές. Σε ταχύτητα 5m/sec ο συντελεστής ισούται με 20,8%.

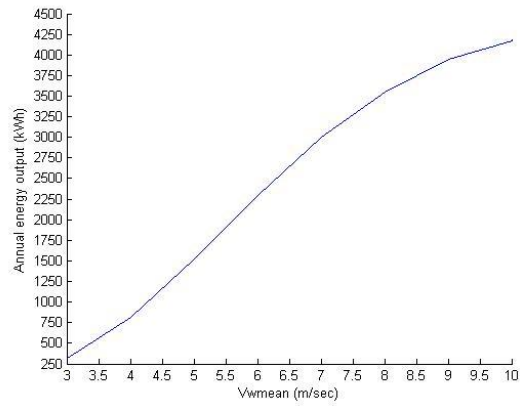


Σχήμα 7.27: Συντελεστής χρησιμοποίησης σε σχέση με την μέση ταχύτητα του ανέμου για την απευθείας σύνδεση και τη σύνδεση με MPPT.

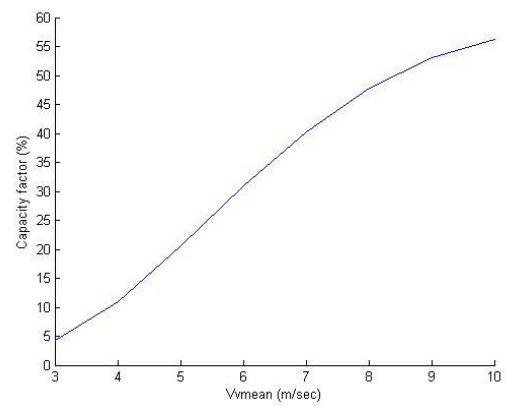
Συγκρίνοντας συνολικότερα τους δύο τρόπους σύνδεσης επισημαίνουμε πως η ταχύτητα έναρξης λειτουργίας της ανεμογεννήτριας για απευθείας σύνδεση είναι υψηλότερη $V_{wcutin}=3m/sec$, ενώ για σύνδεση με MPPT είναι χαμηλότερη $V_{wcutin}=2,5m/sec$. Η απόδοση της γεννήτριας δεν παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις στους δύο τρόπους σύνδεσης, αλλά αυτό που καθορίζει την παραγωγή ενέργειας είναι ο αεροδυναμικός συντελεστής που στην πρώτη περίπτωση είναι χαμηλός για πολλές ταχύτητες ανέμου, ενώ στην δεύτερη είναι ο βέλτιστος για κάθε ταχύτητα ανέμου πριν την ονομαστική. Όσο αυξάνεται η μέση ταχύτητα του ανέμου η διαφορά στην παραγωγή ενέργειας αυξάνεται οπότε η απευθείας σύνδεση σε περιοχή με χαμηλές ταχύτητες ανέμου θα έχει περισσότερο νόημα. Με βάση την αυξημένη ενεργειακή απόδοση κρίνεται σκόπιμη η σύνδεση με σύστημα MPPT λαμβάνοντας υπόψη τα μειονεκτήματα του μεγαλύτερου κόστους, της αύξησης της πολυπλοκότητας και της μείωσης της αξιοπιστίας του συστήματος.

Από τον σχεδιαστή γίνεται μία εκτίμηση της ετήσιας ενεργειακής απόδοσης κοντά στις $900kWh$ για απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές σε μέση ταχύτητα ανέμου $5m/sec$ [1], δηλαδή παρουσιάζεται μία απόκλιση 15% σε σχέση με την εκτίμηση της εργασίας. Τα λίγα σημεία για τη χάραξη της καμπύλης $cp-\lambda$, η πολυωνυμική συνάρτηση που δεν προσεγγίζει τέλεια την σχέση $cp-\lambda$, οι απλουστεύσεις της DC ανάλυσης της παραγράφου 6.2.2.1, το μήκος και η διατομή του καλωδίου μεταξύ της γεννήτριας και του ανορθωτή που επιλέχθηκε, καθώς και πιθανές διαφορετικές παραδοχές και μέθοδοι υπολογισμού του σχεδιαστή δικαιολογούν αυτή τη διαφορά.

Τέλος, παριστάνεται η ετήσια ενεργειακή απόδοση (Σχήμα 7.28α) και ο συντελεστής χρησιμοποίησης (Σχήμα 7.28β) για λειτουργία MPPT χωρίς την αντίσταση καλωδίου μεταξύ γεννήτριας και ανορθωτή ώστε να υπάρχει μία εκτίμηση μόνο για την ανεμογεννήτρια. Χάρη στην καλύτερη απόδοση της γεννήτριας σε αυτή την περίπτωση η ενεργειακή απόδοση αυξάνεται στην τιμή $1530kWh$, η μέση ισχύς γίνεται $175W$ και ο συντελεστής χρησιμοποίησης 20,6% για μέση ταχύτητα ανέμου $5m/sec$.



(α)



(β)

Σχήμα 7.28: Ετήσια ενεργειακή απόδοση(α) και συντελεστής χρησιμοποίησης(β) για λειτουργία MPPT, χωρίς αντίσταση καλωδίου μεταξύ γεννήτριας και ανορθωτή.

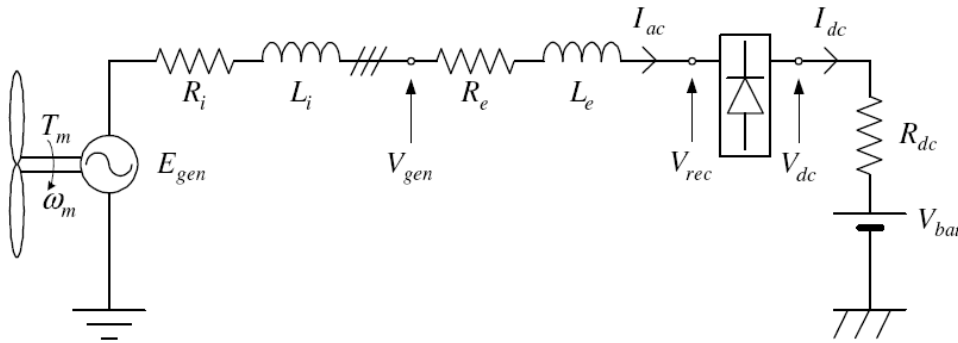
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

8.1: Βελτίωση του DC συστήματος με τη σύνδεση αυτεπαγωγής

Στο προηγούμενο κεφάλαιο φάνηκαν τα πλεονεκτήματα της σύνδεσης με ηλεκτρονικό MPPT σε DC συστήματα αντί της απευθείας σύνδεσης σε συσσωρευτές. Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξετάσουμε έναν τρόπο αύξησης της παραγόμενης ισχύος από την ανεμογεννήτρια με τη σύνδεση μίας αυτεπαγωγής σε σειρά με την γεννήτρια πριν τον ανορθωτή. Αυτή η μέθοδος αναφέρεται ως «ταίριασμα σημείου μέγιστης ισχύος» (Maximum power point matching) και αναπτύσσεται στο [20]. Βασικό πλεονέκτημα της είναι πως δεν χρησιμοποιείται ηλεκτρονικός μετατροπέας που αυξάνει την πολυπλοκότητα και το κόστος του συστήματος και μειώνει την αξιοπιστία του.

Κατά την απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές, η τάση των συσσωρευτών επιβάλλει σχεδόν σταθερή τάση στα άκρα της γεννήτριας. Η σύνδεση μίας κατάλληλης αυτεπαγωγής επιτρέπει στην τερματική τάση να μεταβάλλεται με τέτοιο τρόπο ώστε να αυξάνεται η απορροφώμενη αεροδυναμική ισχύς από τον άνεμο. Η γεννήτρια που μελετήθηκε έχει μικρή τιμή σύγχρονης αυτεπαγωγής, εξαιτίας της απουσίας πυρήνα στον στάτη, οπότε αυτός ο τρόπος μεγιστοποίησης της ισχύος είναι κατάλληλος.

Ένα τέτοιο σύστημα παριστάνεται στο Σχήμα 8.1. L_e είναι η αυτεπαγωγή ανά φάση που συνδέεται σε σειρά με την γεννήτρια και R_e η ωμική αντίσταση της αυτεπαγωγής. Για την πραγματοποίηση της μελέτης, ο ανορθωτής με τους συσσωρευτές αντικαθίστανται και προκύπτει το AC ισοδύναμο κύκλωμα που φαίνεται στο Σχήμα 8.2.



Σχήμα 8.1: Ισοδύναμο κύκλωμα ανά φάση με σύνδεση αυτεπαγωγής ανάμεσα στην γεννήτρια και τον ανορθωτή.

Η εσωτερική αντίσταση των συσσωρευτών στο AC σύστημα ισούται με [20]:

$$R_{ac} = \frac{6R_{dc}}{\pi^2} \quad (8.1)$$

ώστε οι απώλειες χαλκού στην εσωτερική αντίσταση να είναι οι ίδιες.

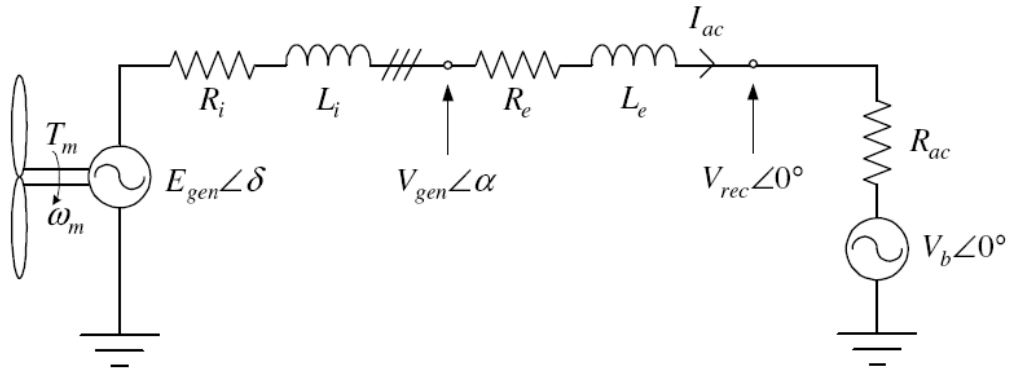
Η τάση ανοιχτοκύκλωσης των συσσωρευτών εξαιτίας της μη ημιτονοειδούς τάσης της γεννήτριας που προκαλείται από τους συσσωρευτές προκύπτει:

$$V_b = \frac{\sqrt{2}(V_{bat} + 2V_d)}{\pi} \quad (8.2)$$

όπου V_d είναι η πτώση τάσης σε μία διόδο του ανορθωτή.

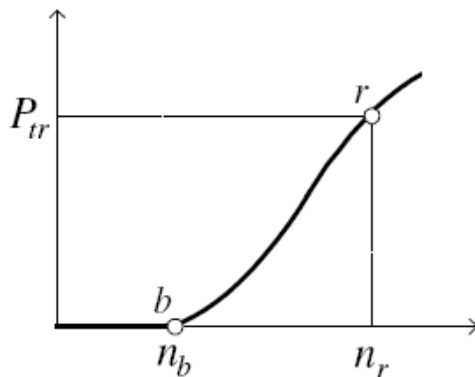
Η συχνότητα της V_b είναι η συχνότητα της αναπτυσσόμενης ΗΕΔ.

Ο ανορθωτής επιβάλλει μοναδιαίο συντελεστή ισχύος στην είσοδο του, οπότε το ρεύμα γραμμής είναι συμφασικό με την τάση V_{rec} .



Σχήμα 8.2: AC ισοδύναμο κύκλωμα ανά φάση του συστήματος.

Ένα απλοποιημένο διάγραμμα της βέλτιστης καμπύλης της αεροδυναμικής ισχύος σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής παριστάνεται στο Σχήμα 8.3. Η ταχύτητα n_b είναι η ταχύτητα έναρξης λειτουργίας, δηλαδή η ταχύτητα στην οποία η ανορθωμένη ΗΕΔ ισούται με την τάση των συσσωρευτών, η ταχύτητα n_r είναι η βέλτιστη ταχύτητα περιστροφής στην ονομαστική ταχύτητα ανέμου και P_{tr} είναι η μέγιστη αεροδυναμική ισχύς στην ονομαστική ταχύτητα ανέμου. Η τιμή της αυτεπαγωγής πρέπει να είναι αυτή για την οποία η καμπύλη διέρχεται κατά το δυνατόν από τα δύο σημεία b , r .



Σχήμα 8.3: Απλοποιημένο διάγραμμα της βέλτιστης καμπύλης της αεροδυναμικής ισχύος σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής.

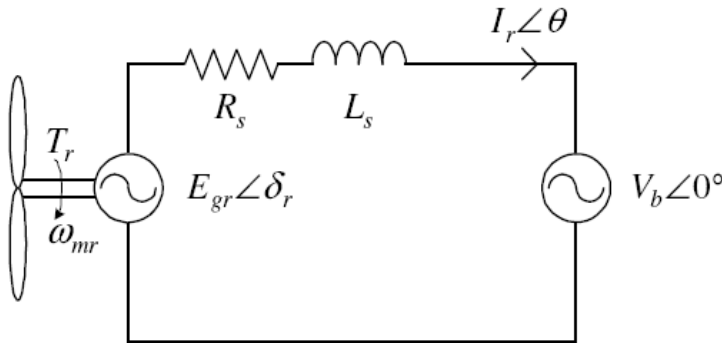
Αθροίζοντας όλες τις αντιστάσεις και τις αυτεπαγωγές ανά φάση προκύπτουν η συνολική ωμική αντίσταση γραμμής και η συνολική αυτεπαγωγή γραμμής.

$$R_s = R_i + R_{cc} + R_{ac} \quad (8.3)$$

$$L_s = L_i + L_{cc} + L_e \quad (8.4)$$

όπου R_{cc} είναι η αντίσταση του καλωδίου από την ανεμογεννήτρια μέχρι τον ανορθωτή και L_{cc} η αντίστοιχη αυτεπαγωγή του καλωδίου.

Για να υπολογίζουμε την αυτεπαγωγή που θα εισαχθεί θεωρούμε το σύστημα κατά την ονομαστική του λειτουργία και υπολογίζουμε την αυτεπαγωγή που απαιτείται ώστε στην ονομαστική ταχύτητα περιστροφής η αεροδυναμική ισχύς να είναι η μέγιστη δυνατή. Το ισοδύναμο κύκλωμα κατά την ονομαστική λειτουργία παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.4



Σχήμα 8.4: Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του συστήματος κατά την ονομαστική λειτουργία.

Για το κύκλωμα αυτό ισχύει το διανυσματικό διάγραμμα που είδαμε στην παράγραφο 4.2.2 και οι σχέσεις:

$$\cos \delta_r = \frac{V_b + I_r \cdot R_s}{E_{gr}} \quad (8.5)$$

$$\sin \delta_r = \frac{I_r \cdot \omega_e \cdot L_s}{E_{gr}} \quad (8.6)$$

Αγνοώντας τις απώλειες δινορευμάτων:

$$P_{H/M} = 3V_b \cdot I_r + 3I_r^2 \cdot R_s \Rightarrow$$

$$I_r = \frac{\sqrt{V_b^2 + \frac{4}{3} R_s \cdot P_{HM}} - V_b}{2R_s} \quad (8.7)$$

Λύνοντας την (8.6) ως προς L_s και αντικαθιστώντας το στην σχέση (8.4) προκύπτει:

$$L_e = \left(\frac{60E_{gr}}{\pi \cdot p \cdot n_r} \right) \frac{\sin \delta_r}{I_r} - L_{cc} - L_i \quad (8.8)$$

που είναι η τιμή της αυτεπαγωγής για την οποία η καμπύλη αεροδυναμικής ισχύος-ταχύτητας περιστροφής θα διέρχεται από το σημείο μέγιστης απόδοσης ισχύος στην ονομαστική λειτουργία.

Όσο αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής η επαγωγική αντίδραση αυξάνεται, οπότε η αεροδυναμική ισχύς αυξάνεται με μικρότερο ρυθμό. Έτσι, η ύπαρξη της αυτεπαγωγής συμβάλλει στον περιορισμό της ισχύος μαζί με το αεροδυναμικό σύστημα.

8.1.1: Εφαρμογή στην κατασκευασθείσα ανεμογεννήτρια και σύγκριση των διαφορετικών τρόπων σύνδεσης

Για την ανεμογεννήτρια που μελετήθηκε και κατασκευάστηκε γνωρίζουμε τα εξής:
Η μετρούμενη ωμική αντίσταση της γεννήτριας είναι $R_i = 0,614\Omega$ και η υπολογισμένη τιμή της σύγχρονης αυτεπαγωγής $L_i = 1,793mH$

Η εσωτερική αντίσταση των συσσωρευτών τίθεται:

$$R_{dc} = 0,1\Omega$$

Από την σχέση (8.1) προκύπτει η αντίσταση των συσσωρευτών στο AC κύκλωμα:

$$R_{ac} = 0,06\Omega$$

Θεωρούμε όπως και στο κεφάλαιο 7 μήκος καλωδίου $60m$, διατομής $6mm^2$

$$R_{cc} = 2\rho \frac{l}{s} \approx 0,35\Omega$$

και πως η αντίσταση της αυτεπαγωγής είναι $R_e = 0,05\Omega$

Η συνολική αντίσταση γραμμής υπολογίζεται από τη σχέση (8.3):

$$R_s = 1,074\Omega$$

Η ταχύτητα έναρξης λειτουργίας στην οποία η ανορθωμένη ΗΕΔ ισούται με την τάση ανοιχτοκύκλωσης των συσσωρευτών είναι:

$$n_{cutin} = nb = 218RPM$$

όπως και στην απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές.

Η ΗΕΔ κατά την έναρξη της λειτουργίας ισούται με την AC τάση των συσσωρευτών.

$$Efb = Vb = 22,25V$$

Στην ονομαστική ταχύτητα ανέμου η ονομαστική ταχύτητα περιστροφής για βέλτιστο λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου είναι:

$$n_{nom} = 557RPM$$

και η μέγιστη αεροδυναμική ισχύς για μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή είναι:

$$P_{tr} = P_{air_{nom}} = 950W$$

Αφαιρώντας από την αεροδυναμική τις απώλειες περιστροφής και δινορευμάτων προκύπτει η ισχύς P_s :

$$P_s = P_{air} - P_{rot} - P_{eddy} = 904W$$

Επιλύοντας την σχέση (8.7) θέτοντας για μεγαλύτερη ακρίβεια την P_s στη θέση της ηλεκτρομαγνητικής ισχύος προκύπτει:

$$I_r = 9,34A$$

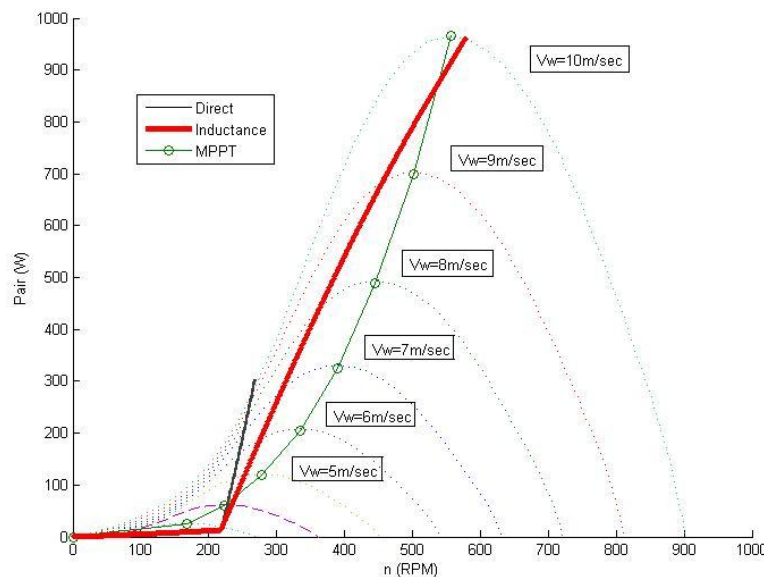
Από την (8.5)

$$\cos \delta_r = 0,62 \Rightarrow \delta_r = 52^\circ$$

και από την (8.8) υπολογίζεται η ζητούμενη τιμή της αυτεπαγωγής:

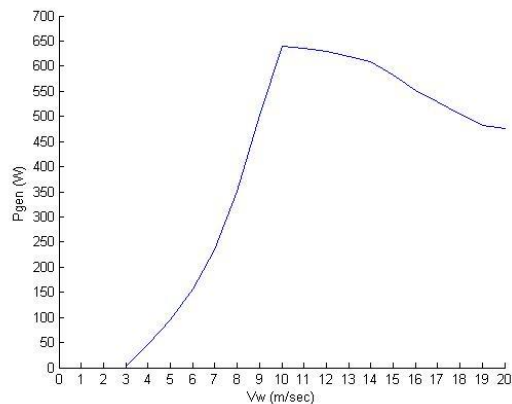
$$L_e = 10,86mH \approx 10,9mH$$

Στη συνέχεια η αυτή η τιμή της αυτεπαγωγής εισάγεται στο πρόγραμμα της προσομοίωσης του Παραρτήματος Γ και προκύπτει το Σχήμα 8.5. Στο ίδιο διάγραμμα παριστάνεται και η σχέση αεροδυναμικής ισχύος με ταχύτητα περιστροφής για τους δύο προηγούμενους τρόπους σύνδεσης. Είναι εμφανές πως η αεροδυναμική ισχύς παίρνει πολύ μεγαλύτερες τιμές από ότι στην απευθείας σύνδεση αλλά δεν ακολουθεί την βέλτιστη καμπύλη. Επίσης, παρατηρούμε πως η καμπύλη δεν διέρχεται ακριβώς από το σημείο μεγιστοποίησης της ισχύος για την ονομαστική ταχύτητα ανέμου, το οποίο οφείλεται σε διαφορά της AC ανάλυσης που έγινε σε αυτή την παράγραφο και της DC ανάλυσης που γίνεται στην προσομοίωση. Η διαφορά αυτή θεωρείται αμελητέα και αντισταθμίζεται από την επίτευξη μεγαλύτερης ισχύος σε μικρότερες ταχύτητες ανέμου.



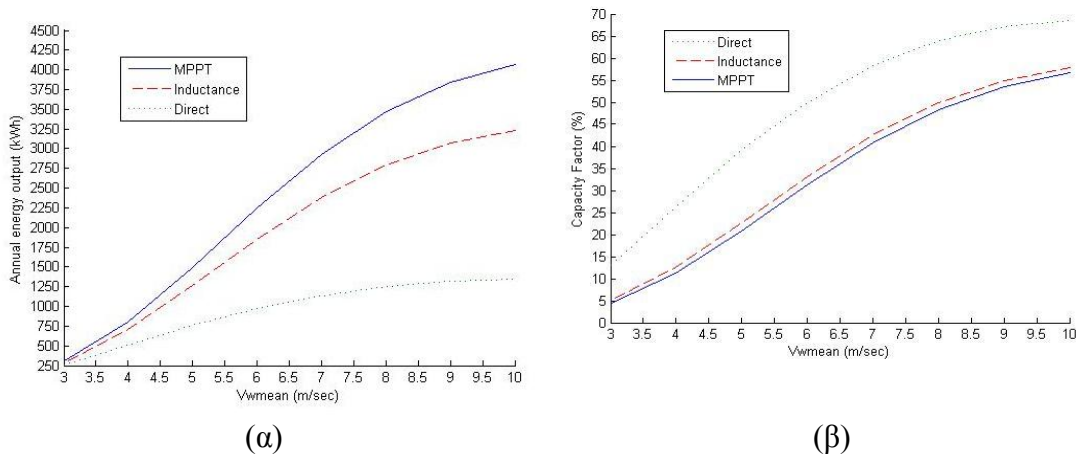
Σχήμα 8.5: Αεροδυναμική ισχύς σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής για τους τρεις διαφορετικούς τρόπους σύνδεσης σε κοινό διάγραμμα με τις καμπύλες αεροδυναμικής ισχύος της έλικας σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής για διάφορες ταχύτητες ανέμου.

Η νέα καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας φαίνεται στο Σχήμα 8.6. Η ονομαστική ηλεκτρική ισχύς της ανεμογεννήτριας είναι 639W. Ως ισχύ της γεννήτριας θεωρούμε την ισχύ που φτάνει στη είσοδο του ανορθωτή συμπεριλαμβάνοντας την προστιθέμενη αυτεπαγωγή.



Σχήμα 8.6: Καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας με τη σύνδεση αυτεπαγωγής.

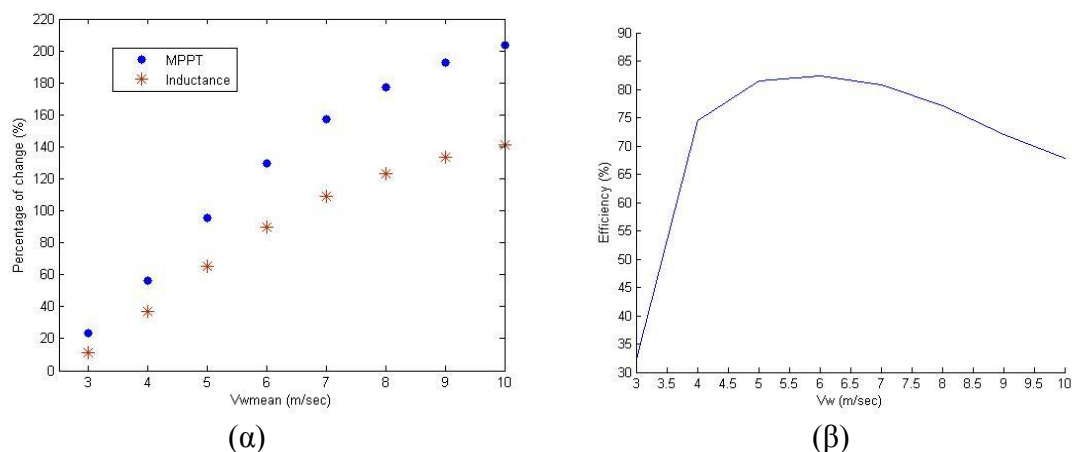
Στη συνέχεια υπολογίζεται η ετήσια παραγόμενη ενέργεια (Σχήμα 8.7α), ο συντελεστής χρησιμοποίησης (Σχήμα 8.7β) και γίνεται σύγκριση με τους δύο άλλους τρόπους σύνδεσης. Για μέση ταχύτητα ανέμου 5 m/sec η παραγόμενη ενέργεια προκύπτει 1267 kWh , ο συντελεστής χρησιμοποίησης $22,6\%$ και η μέση ισχύς 145 W .



Σχήμα 8.7: Ετήσια παραγόμενη ενέργεια(α) και συντελεστής χρησιμοποίησης(β) για τους τρεις διαφορετικούς τρόπους σύνδεσης.

Η ποσοστιαία αύξηση της παραγόμενης ενέργειας με την σύνδεση αυτεπαγωγής και με την λειτουργία MPPT σε σχέση με την απευθείας σύνδεση φαίνεται στο Σχήμα 8.8α. Για μέση ταχύτητα ανέμου 5 m/sec η αύξηση που προκύπτει με την σύνδεση αυτεπαγωγής είναι 65% ενώ με τη λειτουργία MPPT είναι 95%

Τέλος, από το Σχήμα 8.8β παρατηρούμε πως η απόδοση της γεννήτριας με τη σύνδεση αυτεπαγωγής είναι μικρότερη από ότι στους δύο προηγούμενους τρόπους εφόσον καταναλώνεται άεργος ισχύς στην αυτεπαγωγή.



Σχήμα 8.8: (α) Ποσοστιαία αύξηση της παραγόμενης ενέργειας με την σύνδεση αυτεπαγωγής και με την λειτουργία MPPT σε σχέση με την απευθείας σύνδεση. (β) Απόδοση της γεννήτριας σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής κατά τη σύνδεση αυτεπαγωγής.

Η μέθοδος της σύνδεσης αυτεπαγωγής οδηγεί σε σημαντική αύξηση της παραγόμενης ενέργειας με μικρό κόστος, απλά και χωρίς την χρήση ηλεκτρονικών που μειώνουν την αξιοπιστία του συστήματος. Παράλληλα, η προσθήκη της αυτεπαγωγής περιορίζει τις αρμονικές του ρεύματος που προκαλούνται από τον ανορθωτή με αποτέλεσμα να περιορίζεται ο παραγόμενος θόρυβος της ανεμογεννήτριας [20]. Παρόλα αυτά, δεν ακολουθείται η βέλτιστη καμπύλη αεροδυναμικής ισχύος όπως γίνεται με τη λειτουργία MPPT, η απόδοση της γεννήτριας είναι χαμηλότερη από ότι στη λειτουργία MPPT, η ταχύτητα έναρξης λειτουργίας δεν μειώνεται, και ο περιορισμός της ισχύος για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής δεν γίνεται με ακρίβεια.

8.2 Σχεδίαση βελτιωμένης γεννήτριας για σύνδεση σε ζυγό AC

Η ανεμογεννήτρια που θα σχεδιάσουμε θέλουμε να είναι κατάλληλη για σύνδεση στο δίκτυο ή στον ζυγό AC ενός μικροδικτύου με βάση τα πλεονεκτήματα της AC σύνδεσης που τέθηκαν στην παράγραφο 6.2.

Όσον αφορά τη σύνδεση στο δίκτυο το ισχύον θεσμικό πλαίσιο στην Ελλάδα δεν ευνοεί τις μικρές ανεμογεννήτριες. Μετά από έρευνα αγοράς στον Ελλαδικό χώρο διαπιστώθηκε πως λίγες εταιρείες εμπορεύονται μικρές ανεμογεννήτριες για σύνδεση στο δίκτυο και πως έχουν γίνει ελάχιστες εγκαταστάσεις. Σε χώρες του εξωτερικού όπου παρέχονται κίνητρα για τη σύνδεση μικρών ανεμογεννητριών στο δίκτυο σε μια λογική αντίστοιχη με τα φωτοβολταϊκά, πραγματοποιείται πλήθος εγκαταστάσεων. Έτσι, αν το θεσμικό πλαίσιο στην Ελλάδα πρόκειται να αλλάξει θα δημιουργηθεί ενδιαφέρον και για τη σύνδεση μικρών ανεμογεννητριών στο δίκτυο.

Μετά από παρατηρήσεις που έγιναν στο εργαστήριο σε ανεμογεννήτρια του εμπορίου και ανεμογεννήτρια ιδιοκατασκευής που είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο, διαπιστώθηκε πως το χρονικό διάστημα στο οποίο ξεκινά η περιστροφή της ανεμογεννήτριας μέχρι να αρχίσει να παρέχεται ισχύς στο δίκτυο είναι σημαντικό, με αποτέλεσμα σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου να μην αποδίδεται ισχύς. Η λειτουργία σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου είναι ιδιαίτερα σημαντική για τις μικρές ανεμογεννήτριες που τοποθετούνται συνήθως, σε αντίθεση με τα αιολικά πάρκα, σε περιοχές χωρίς ιδιαίτερα υψηλό αιολικό δυναμικό.

Έτσι, στόχος του κεφαλαίου αυτού είναι η σχεδίαση μίας βελτιωμένης γεννήτριας για μικρή ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 1kW, σε AC σύνδεση, κατάλληλη για λειτουργία σε χαμηλούς ανέμους.

Όσον, αφορά τη γεννήτρια γίνεται βελτιωμένη διαμόρφωση του τυλίγματος του στάτη και υπολογίζεται η ελάχιστη εξωτερική διάμετρος της γεννήτριας που απαιτείται για την παραγωγή της επιθυμητής ισχύος.

8.2.1: Ταχύτητα περιστροφής εκκίνησης, ΗΕΔ, αριθμός πόλων και πηνίων

Ο inverter windy boy που θα χρησιμοποιηθεί μπορεί να δώσει ισχύ για εύρος dc τάσεων από 140V μέχρι 400V [26].

Οπότε προκύπτει πως:

$$E_{fcutin} = \frac{140}{\sqrt{3} \cdot 1,35} = 60V \quad \text{και} \quad E_{fnom} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 1,35} = 171V$$

Για ονομαστική ηλεκτρική ισχύ 1kW σε ονομαστική ταχύτητα ανέμου 9m/sec και απόδοση 90% προκύπτει η ακτίνα της έλικας από τη σχέση (4.1):

$$Radius = 1,5m$$

Επιλέγουμε $V_{wcutin} = 2,5m/sec$ ώστε να αποδίδεται ισχύς για χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου. Από την σχέση (4.4):

$$n = \frac{60 \cdot V_w \cdot \lambda}{2\pi \cdot Radius} \Rightarrow$$

$$n_{cutin} = 110RPM$$

Ισχύει πως:

$$\frac{n_{cutin}}{n_{nom}} = \frac{E_{fcutin}}{E_{fnom}} \Rightarrow$$

$$n_{nom} = \frac{n_{cutin} \cdot E_{fnom}}{E_{fcutin}} \quad (8.1)$$

$$\text{οπότε: } n_{nom} = 315RPM$$

Επιλέγουμε συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσης για τους λόγους που εξηγήθηκαν στην παράγραφο 3.5.2.1.

Ο αριθμός των πόλων της γεννήτριας δίνεται από τη σχέση:

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

Σύμφωνα με το [18] όσο αυξάνεται ο αριθμός των πόλων αυξάνονται και οι επιδόσεις της γεννήτριας. Έτσι, επιλέγουμε $f_{nom}=60\text{Hz}$ από όπου προκύπτει: $p=24$

Έτσι, χρησιμοποιούνται 48 μαγνήτες, δηλαδή 24 σε κάθε δίσκο

Όπως είδαμε στην παράγραφο 3.5.2.1 για βέλτιστες επιδόσεις της γεννήτριας πρέπει:

$$\frac{2Q}{p \cdot 3} = 0,5 \Rightarrow Q = 18 \text{ πηνία συνολικά}$$

$$q = Q/3 = 6 \text{ πηνία ανά φάση}$$

Επιλέγουμε η μέγιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο να είναι $B_{mg}=0,62\text{Tesla}$. Επίσης, επιλέγουμε μαγνήτες NdFeB βαθμού 40 με αξονικό ύψος μαγνητών $h_m=10\text{mm}$ και τραπεζοειδές σχήμα. Ο λόγος του πλάτους του μαγνήτη προς το πολικό βήμα επιλέγεται $a_i=0,7$ οπότε η μέγιστη τιμή της θεμελιώδους αρμονικής στο διάκενο προκύπτει [20]:

$$B_p = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} B_{mg} = 0,68\text{T}$$

Με την διαδικασία που ακολουθήθηκε στην παράγραφο 4.1.3 το αξονικό πάχος του στάτη υπολογίζεται:

$$t_w=13\text{mm}$$

Η ονομαστική ισχύς της γεννήτριας είναι 1kW . Στιγμιαία όμως αυτή η τιμή μπορεί να ξεπεραστεί. Έτσι, θεωρούμε:

$$P_{el \max} = 1,1 \cdot P_{el \text{ nom}} = 1,1\text{kW}$$

Υποθέτοντας πως η απόδοση της γεννήτριας θα ισούται με $eff \approx 0,9$ αγνοώντας τις απώλειες περιστροφής προκύπτει:

$$eff = \frac{P_{el}}{P_{HM}} = 0,9$$

$$P_{H/M} = 1,1P_{el} \Rightarrow P_{H/M \max} = 1,1 \cdot P_{el \max} = 1210\text{W}$$

Για ονομαστική ταχύτητα περιστροφής $n = n_{nom} = 315\text{RPM}$ η μέγιστη ηλεκτρομαγνητική ροπή προκύπτει:

$$T_{dm} = \frac{P_{H/M}}{2 \cdot \pi \cdot n / 60} = \frac{60 \cdot P_{H/M}}{2 \cdot \pi \cdot n} \quad (8.2)$$

$$T_{dm} = 36,7\text{Nm}$$

8.2.2: Σχεδίαση του στάτη και του δρομέα

Στην παράγραφο αυτή θα σχεδιαστεί το τύλιγμα διπλής στρώσης του στάτη με βέλτιστο τρόπο.

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή Td ισούται με:

$$Td = \frac{P_{H/M}}{\omega_m} = \frac{P_{H/M}}{2\omega_e} \cdot p = \frac{3 \cdot Ef \cdot Ia \cdot p}{2\omega_e}$$

και η αναπτυσσόμενη ΗΕΔ προκύπτει από τη σχέση (3.7)

$$Ef = \frac{2\sqrt{2}}{p} qN_c \omega_e B_p k_w R_e l_a$$

Συνδυάζοντας τις δύο παραπάνω σχέσεις και τροποποιώντας τις κατάλληλα προκύπτει η σχέση [18]:

$$Td = kwc \cdot kec \cdot kr \cdot C1 \quad (8.3)$$

όπου

$$kwc = kp \cdot kd \sqrt{\theta re \cdot q / p} \quad (8.4)$$

είναι ένας συντελεστής τυλίγματος, kp είναι ο συντελεστής βήματος και kd ο συντελεστής πλάτους. θre είναι η ηλεκτρική γωνία που αντιστοιχεί στο πάχος της πλευράς πηνίου και από την σχέση (3.11) ισούται με:

$$\theta re = \left(\frac{rin - lg}{Ravg} \right) \frac{\pi}{3}$$

kec είναι ο συντελεστής ακρών τυλίγματος και ισούται με [18]:

$$k_{ec} = (2 + \delta c)^{-\frac{1}{2}} \quad (8.5)$$

όπου δc είναι ο λόγος του μήκους άκρων τυλίγματος προς το ενεργό μήκος της μηχανής

$$\delta c = \frac{lec}{la}$$

Σύμφωνα με την σχέση (3.13)

$$lec = 2(rout + rin) \frac{\theta m - 0.6\theta re}{p}$$

όπου:

$$\theta m = \frac{2\pi}{Q} \frac{p}{2} = \frac{\pi \cdot p}{Q} \quad \text{είναι η ηλεκτρική γωνία βήματος πηνίου}$$

οπότε:

$$\delta c = \frac{2}{p} \left(\frac{1 + kd}{1 - kd} \right) \cdot (\theta m - 0.6\theta re) \quad (8.6)$$

με $kd=rin/rout$

Ο συντελεστής ακτίνας kr ισούται με [18]:

$$kr = \sqrt{(1+kd)^3 \cdot (1-kd)} \quad (8.7)$$

Ο συντελεστής μηχανής $C1$ ισούται με [18]:

$$C1 = rout^2 \cdot Bp \cdot \sqrt{1,5 \cdot Pcu \cdot kf \cdot tw / \rho} \quad (8.8)$$

όπου Pcu οι συνολικές απώλειες χαλκού, ρ η ειδική αντίσταση του χαλκού, tw το αξονικό πάχος του στάτη, kf ο συντελεστής πλήρωσης των πηνίων.

Η βέλτιστη θεωρητική τιμή για το kd είναι: $\frac{1}{\sqrt{3}} = 0,57$

Σύμφωνα με το [16] το βέλτιστο κόστος προς ροπή παρουσιάζεται για kd από 0,75-0,80.

Μία τιμή που συνδυάζει τις δύο παραπάνω προδιαγραφές είναι:

$$kd=0,6$$

και επιλέγεται στη σχεδίαση.

Η βέλτιστη τιμή της γωνίας θre προέκυψε μετά από προσομοιώσεις [18]:

$$\theta reopt = \theta remax = \frac{rin}{2ravg} \cdot \theta m = \frac{kd}{1+kd} \cdot \theta m \quad (8.9)$$

Με βάση τα παραπάνω υπολογίζονται οι ακόλουθοι συντελεστές και τα μεγέθη για τη γεννήτρια που σχεδιάζεται:

$$\theta m = 240^\circ$$

$$\theta reopt = 90^\circ$$

Ο συντελεστής βήματος ισούται σύμφωνα με τη σχέση (3.10):

$$kp = \frac{2 \sin([\theta m - \theta re] / 2) \sin(\theta re / 2)}{\theta re} = 0,869$$

και ο συντελεστής πλάτους $kd=1$

$$\text{οπότε: } kwc = 0,545$$

Σύμφωνα με την σχέση (8.6): $\delta c = 1,08$

και ο συντελεστής ακρών τυλίγματος προκύπτει: $kec = 0,57$

Ο συντελεστής ακτίνας ισούται : $kr = 1,28$

Οι συντελεστές που προέκυψαν είναι οι βέλτιστοι με βάση τις επιλογές που έχουν γίνει.

Στη συνέχεια αναπτύσσεται μία μεθοδολογία για την εύρεση της ελάχιστης εξωτερικής ακτίνας της γεννήτριας για την ανάπτυξη της απαιτούμενης ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Για να γίνει αυτό εφικτό όλες οι σχέσεις θα εκφραστούν ως προς το kd το οποίο έχει ήδη επιλεγεί.

Το κριτήριο της σχεδίασης του τυλίγματος που θα χρησιμοποιήσουμε είναι η μέγιστη πυκνότητα ρεύματος να ισούται:

$$J_{max} = 6,5 A/mm^2$$

που σύμφωνα με το [4] είναι αποδεκτή τιμή για μηχανές αξονικής ροής μικρότερες των 10kW.

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (8.3) και (8.8) προκύπτει:

$$Td = kwc \cdot ke \cdot kr \cdot \sqrt{1,5 \cdot Pcu \cdot kf \cdot tw / \rho \cdot rout^2} \cdot Bp \quad (8.10)$$

Επίσης, ισχύουν οι παρακάτω γνωστές σχέσεις

$$Pcu = 3Ia^2 \cdot R\phi \quad (8.11)$$

$$Ia = J_{max} \cdot sc \quad (8.12)$$

$$R\phi = \rho \frac{N\phi \cdot lavg}{s_c} \quad (8.13)$$

$$kf = \frac{Nc \cdot sc}{tw \cdot w} = \frac{N\phi \cdot sc}{q \cdot tw \cdot w} \Leftrightarrow N\phi \cdot sc = kf \cdot q \cdot tw \cdot w \quad (8.14)$$

όπου $kf=0,42$ [20]

$$lavg = 2la + lec = 2 \cdot rout \cdot \left[(1 - kd) + \frac{(\theta m - 0,6\theta re)}{p} \cdot (1 + kd) \right] = 2 \cdot rout \cdot \Lambda \quad (8.15)$$

Όπου υπολογίζεται $\Lambda=0,616$

Επίσης ισχύει:

$$w = 2 \cdot Ravg \cdot \sin\left(\frac{\theta re}{p}\right) = rout \cdot (kd + 1) \cdot \sin\left(\frac{\theta re}{p}\right) \quad (8.16)$$

Αντικαθιστώντας τις (8.11) και (8.12) στην (8.10) προκύπτει:

$$Td = kwc \cdot ke \cdot kr \cdot \sqrt{4,5 \cdot J_{max}^2 \cdot sc^2 \cdot R\phi \cdot tw / \rho \cdot rout^2} \cdot Bp \Leftrightarrow (8.13)$$

$$Td = kwc \cdot ke \cdot kr \cdot J_{max} \cdot \sqrt{4,5 \cdot sc \cdot N\phi \cdot lavg \cdot kf \cdot tw \cdot rout^2} \cdot Bp \Leftrightarrow (8.14)$$

$$Td = kwc \cdot ke \cdot kr \cdot J_{max} \cdot tw \cdot kf \cdot \sqrt{4,5 \cdot q \cdot w \cdot lavg \cdot rout^2} \cdot Bp \quad (8.17)$$

Από τις σχέσεις (8.15) και (8.16) προκύπτει:

$$w \cdot lavg = (kd + 1) \cdot \sin\left(\frac{\theta re}{p}\right) \cdot 2 \cdot rout^2 \cdot \Lambda \quad (8.18)$$

Αντικαθιστώντας την (8.18) στην (8.17) και επιλύοντας ως προς την εξωτερική ακτίνα προκύπτει:

$$rout = \sqrt[3]{\frac{Td}{kwc \cdot ke \cdot kr \cdot J_{max} \cdot tw \cdot kf \cdot Bp \cdot \sqrt{4,5 \cdot q \cdot (kd + 1) \cdot \sin\left(\frac{\theta re}{p}\right) \cdot 2 \cdot \Lambda}}} \quad (8.19)$$

Όλα τα μεγέθη στη σχέση (8.19) είναι γνωστά οπότε η εξωτερική ακτίνα της γεννήτριας υπολογίζεται:

$$r_{out}=127mm$$

$$\text{και } r_{in} = r_{out} \cdot kd = 77mm$$

$$R_{avg}=102mm$$

Το ενεργό μήκος της μηχανής υπολογίζεται: $la=50,8mm$

Με βάση τη διαθεσιμότητα των μαγνητών επιλέγεται ενεργό μήκος μηχανής

$$la=50mm$$

Το πολικό βήμα στη μέση ακτίνα ισούται με:

$$\tau = \frac{2\pi \cdot R_{avg}}{p} = 26,7mm$$

το πλάτος των μαγνητών στη μέση ακτίνα ισούται με:

$$wm = ai \cdot \tau = 0,7 \cdot 26,7 = 18,69mm \approx 20mm$$

Έτσι, οι επιλεγόμενοι μαγνήτες είναι NdFeB βαθμού 40 και διαστάσεων: 50 x20x10 με τραπεζοειδές σχήμα όπου η τιμή 20mm είναι το πλάτος των μαγνητών στη μέση ακτίνα.

Με βάση τα παραπάνω προκύπτουν τα μεγέθη από τους τύπους που αναπτύχθηκαν παραπάνω:

$$w=13,13mm$$

$$l_{ec}=55,08mm$$

$$l_{avg}=155,08mm$$

Από τη σχέση (3.8):

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

για $n_{cutin}=110 \text{ RPM}$ και $E_{fcutin}=60V$ προκύπτει:

$$N_c=204 \text{ ελίγματα ανά πηνίο}$$

$$\text{και } N\phi=1224 \text{ ελίγματα ανά φάση}$$

οπότε:

$$sc=0,357mm^2$$

$$\text{και } dc = \sqrt{\frac{4 \cdot sc}{\pi}} = 0,674mm$$

Με βάση τις διαθέσιμες διαμέτρους καλωδίου επιλέγεται

$$dc' = 0,7mm \text{ και } sc' = 0,38mm^2$$

Η διαφορά στην διατομή δεν είναι αμελητέα οπότε πρέπει να τροποποιήσουμε κάποια μεγέθη.

Έτσι:

$$J_{\max}' = 6,1 \frac{A}{mm^2}$$

Από τις σχέσεις (3.8) (8.14) και (8.16) προκύπτει:

$$R_{avg}' = \sqrt{\frac{N_c \cdot R_{avg} \cdot sc'}{2 \cdot tw \cdot \sin\left(\frac{\theta_{re}}{p}\right) \cdot kf}}$$

οπότε:

$$R_{avg}' = 106mm, \quad r_{out}' = 131mm \quad \text{και} \quad r_{in}' = 81mm$$

Από την (3.8):

$$N_c' = 196 \text{ ελίγματα και } N\phi' = 1176 \text{ ελίγματα}$$

$$w' = 13,86mm$$

$$l_{ec}' = 57,24mm \quad \text{και} \quad l_{avg}' = 157,24$$

$$Rc' = 1,2\Omega \quad \text{και} \quad R\phi' = 8,45\Omega$$

Η μάζα χαλκού ενός πηνίου ισούται:

$$m_{cu}c = sc \cdot l_{avg} \cdot N_c \cdot \rho = 104g$$

Και η συνολική μάζα του τυλίγματος

$m_{cu}total = 1,872kg$ που είναι λιγότερη από τη μάζα τυλίγματος της προηγούμενης γεννήτριας.

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι εσωτερικές διαστάσεις των πηνίων που χρησιμεύουν στην κατασκευή τους με αντίστοιχο τρόπο με την παράγραφο 4.1.3

$$c_{in} \approx \frac{2\pi \cdot r_{in} - 2 \cdot Q \cdot w}{Q} = 0,54mm$$

$$c_{out} \approx \frac{2\pi \cdot r_{out} - 2 \cdot Q \cdot w}{Q} = 18mm$$

Η ελκτική δύναμη μεταξύ των δύο απέναντι δίσκων υπολογίζεται με βάση τις σχέσεις (3.23) και (3.22):

$$F_z = 3566N$$

από όπου με μηχανική ανάλυση βρίσκεται το πάχος των δύο δίσκων.

Ακριβής σύγκριση της γεννήτριας που σχεδιάστηκε στην παράγραφο αυτή με την προηγούμενη γεννήτρια δεν είναι εφικτή λόγω της διαφορετικής ονομαστικής τους ισχύος. Μετά από υπολογισμούς της συνολικής μάζας των δύο γεννητριών προκύπτει πως η βελτιωμένη γεννήτρια έχει μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος. Το κόστος των μαγνητών της είναι μεγαλύτερο, όμως αντισταθμίζεται από το χαμηλότερο κόστος χαλκού και σιδήρου. Η απόδοση και των δύο γεννητριών είναι παρόμοια. Η βελτιωμένη γεννήτρια λόγω της χαμηλότερης ταχύτητας περιστροφής και της μικρότερης μάζας του δρομέα της παρουσιάζει λιγότερες απώλειες περιστροφής.

Η γεννήτρια που σχεδιάστηκε έχει βελτιωμένη διαμόρφωση του τυλίγματος του στάτη. Για μικρότερη εξωτερική διάμετρο της γεννήτριας παράγεται η επιθυμητή ισχύς. Παράλληλα, γίνεται καλύτερη εκμετάλλευση των χαμηλών ανέμων και η σχεδίαση για σύνδεση σε ζυγό AC μικροδικτύου παρουσιάζει πλεονεκτήματα σε σχέση με την DC σύνδεση. Μειονέκτημα της είναι η πιο σύνθετη κατασκευή του τυλίγματος, επιτρέποντας όμως τη δυνατότητα ιδιοκατασκευής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Οι γεννήτριες αξονικής ροής μονίμων μαγνητών μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές ανεμογεννητριών μικρής κλίμακας. Η μεγάλη πυκνότητα ισχύος, η εύκολη τοποθέτηση μεγάλου αριθμού πόλων που εξαλείφει την ανάγκη ύπαρξης κιβώτιου ταχυτήτων, η δυνατότητα μηδενισμού της ροπής ευθυγράμμισης, καθώς και το εύρος των διαφορετικών τοπολογιών τις καθιστά κατάλληλες για εφαρμογές μικρών ανεμογεννητριών.

Οι γεννήτριες αξονικής ροής χωρίς πυρήνα στον στάτη, όπως είναι η ανεμογεννήτρια που μελετήθηκε και κατασκευάστηκε, παρουσιάζουν τα πλεονεκτήματα της υψηλής απόδοσης, της απλότητας στην κατασκευή και της μηδενικής ροπής ευθυγράμμισης που επιτρέπει την εκκίνηση της ανεμογεννήτριας σε χαμηλούς ανέμους.

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης της γεννήτριας στο FEMM με τα πειραματικά αποτελέσματα φαίνεται πως υπάρχει ικανοποιητική απόκλιση. Συνεπώς, η δισδιάστατη ευθύγραμμη αναπαράσταση που υλοποιήθηκε στο FEMM αποτελεί μία ικανοποιητική προσέγγιση της πραγματικής γεννήτριας.

Όσον αφορά τους διαφορετικούς τρόπους σύνδεσης της ανεμογεννήτριας, από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν συμπεραίνουμε πως η σύνδεση σε ζυγό DC με λειτουργία MPPT οδηγεί σε σημαντική αύξηση της αποδιδόμενης ισχύος. Με την σύνδεση αυτεπαγωγής πριν τους συσσωρευτές σημειώνεται σημαντική αύξηση της αποδιδόμενης ισχύος, μικρότερη όμως από την λειτουργία με MPPT, και αποφεύγεται η χρήση ηλεκτρονικών ισχύος που μειώνουν την αξιοπιστία και αυξάνουν το κόστος και την πολυπλοκότητα του συστήματος. Επιπλέον διερεύνηση αξίζει να πραγματοποιηθεί για την επίτευξη καλύτερης προσέγγισης της βέλτιστης καμπύλης ελέγχου με τη σύνδεση αυτεπαγωγής ή και άλλων απλών στοιχείων.

Μελλοντικά, η ανεμογεννήτρια που κατασκευάστηκε θα μπορούσε να συνδεθεί απευθείας σε συσσωρευτές, εν συνεχεία με ηλεκτρονικό MPPT και τέλος με την αυτεπαγωγή που υπολογίστηκε στην παράγραφο 8.1.1. Για κάθε μία περίπτωση, εγκαθιστώντας ανεμόμετρο και πολυόργανο για την μέτρηση της ισχύος και της συχνότητας στην έξοδο της γεννήτριας θα μπορούσαν να χαραχτούν η καμπύλη ισχύος και οι χαρακτηριστικές καμπύλες της ανεμογεννήτριας και να γίνει σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Επίσης, θα μπορούσε να προσομοιωθεί στο FEMM και να κατασκευαστεί μία καινούργια ανεμογεννήτρια για σύνδεση σε ζυγό AC, πιθανώς μεγαλύτερης ισχύος, με βάση τη βελτιωμένη σχεδίαση που έγινε στην παράγραφο 8.2. Προσομοίωση της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας με MPPT θα μπορούσε να γίνει με μικρές τροποποιήσεις του προγράμματος σε Matlab του Παραρτήματος Ε.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ: ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΕ MATLAB

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Μετακίνηση του δρομέα και υπολογισμός της πεπλεγμένης ροής και της ηλεκτρομαγνητικής ροπής για διάφορα φορτία

```
%Αρχικές συνθήκες
speed=500
P=12
Irms(1)=0.
R=0.195
Ls=1.793/1000
Bp=0.4
Edge=132.92
for j=1:12
    openfemm;
    opendocument('axialpiggottrealminimum21.FEM');
    mi_saveas('temp.fem');
    %Επιλέγουμε τιμή για το μήκος της κάθε μετακίνησης
    distance=1
    d=1;
    l=1;
    r=1
    x=0
    halfperiod=1
    detail=0.46
    step=1
    sumsquareA=0
    sumsquareB=0
    sumsquareC=0
    sumsquareT=0
    for i=0:136
        %Αλλάζει η φορά μαγνήτισης των μαγνητών που θέτουμε ανά ημπερίοδο
        if mod(halfperiod,2)==1
            magnet=90;
        else
            magnet=-90;
        end;
        %Μεταφέρουμε τους δεξιούς μαγνήτες όσο αριστερά γίνεται για την πρώτη
        %υποπερίπτωση
        if r==1
            mi_selectlabel(127.92,14.4);
            mi_selectlabel(127.92,-14.4);
            mi_deleteselectedlabels;
            mi_clearselected;
            mi_addblocklabel(Edge-15+0.5,14.4);
            mi_addblocklabel(Edge-15+0.5,-14.4);
            mi_selectlabel(Edge-15+0.5,14.4);
            mi_selectlabel(Edge-15+0.5,-14.4);
            mi_setblockprop('NdFeB 40 MG0e', 0, 2, '0', -magnet, 2,0);
            mi_clearselected;
        end;
        %Διαγράφουμε τους δεξιούς μαγνήτες μόλις ξεπεράσουν το δεξί σύνορο
        if r==16
            mi_selectlabel(133.42,14.4);
            mi_selectlabel(133.42,-14.4);
            mi_deleteselectedlabels;
        end;
        %Μεταφέρουμε τα labels pure iron πιο αριστερά
        if i==117
            mi_selectlabel(117,27.4);
            mi_selectlabel(117,-27.4);
```

```

mi_deleteselectedlabels;
mi_clearselected;
mi_addblocklabel(-Edge+1,23.4);
mi_addblocklabel(-Edge+1,-23.4);
mi_selectlabel(-Edge+1,23.4);
mi_selectlabel(-Edge+1,-23.4);
mi_setblockprop('Pure Iron', 0, 2, '0', 0, 2, 0);
mi_clearselected;
end;
%Μεταφέρουμε τους δεξιούς μαγνήτες όσο αριστερά γίνεται για την τρίτη
%υποπερίπτωση
if r==52
mi_selectlabel(127.92,14.4);
mi_selectlabel(127.92,-14.4);
mi_deleteselectedlabels;
mi_clearselected;
mi_addblocklabel(Edge-30+distance+0.5,14.4);
mi_addblocklabel(Edge-30+distance+0.5,-14.4);
mi_selectlabel(Edge-30+distance+0.5,14.4);
mi_selectlabel(Edge-30+distance+0.5,-14.4);
mi_setblockprop('NdFeB 40 MGoe', 0, 2, '0', magnet, 2,0);
mi_clearselected;
end;
%Μεταφέρουμε τα labels pure iron πιο αριστερά
if r==117
mi_selectlabel(117,14.4);
mi_selectlabel(117,-14.4);
mi_deleteselectedlabels;
mi_clearselected;
mi_addblocklabel(-Edge+1,27.4);
mi_addblocklabel(-Edge+1,-27.4);
mi_selectlabel(-Edge+1,27.4);
mi_selectlabel(-Edge+1,-27.4);
mi_setblockprop('Pure Iron', 0, 2, '0', 0, 2, 0);
mi_clearselected;
end;
%Διόρθωση ώστε να ολοκληρωθεί η ημιπερίοδος
if r==67
distance=detail;
else
distance=1;
end
%Θέση των συνόρων
mi_selectsegment(0,27.4);
mi_selectsegment(0,-27.4);
mi_setsegmentprop('A=0', 1, 1, 0, 2);
mi_clearselected;
mi_selectsegment(Edge,23.4);
mi_selectsegment(-Edge,23.4);
mi_setsegmentprop('per1', 0.5, 0, 0, 0);
mi_clearselected;
mi_selectsegment(Edge,14.4);
mi_selectsegment(-Edge,14.4);
mi_setsegmentprop('per2', 0.5, 0, 0, 2);
mi_clearselected;
mi_selectsegment(Edge,0);
mi_selectsegment(-Edge,0);
mi_setsegmentprop('per3', 0.5, 0, 0, 0);
mi_clearselected;
mi_selectsegment(Edge,-14.4);
mi_selectsegment(-Edge,-14.4);
mi_setsegmentprop('per4', 0.5, 0, 0, 2);
mi_clearselected;
mi_selectsegment(Edge,-23.4);
mi_selectsegment(-Edge,-23.4);
mi_setsegmentprop('per5', 0.5, 0, 0, 0);
mi_clearselected;
%ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ
if mod(r,2)==1
%Υπολογισμός τάσεων υπό ωμικό φορτίο

```



```

f=speed*P/120
angle(step)=x*2*pi/797.56;
%Σε μοίρες
angledeg(step)=angle(step)*360/(2*pi)
time(step)=60*angle(step)/(2*pi*speed);
%Γωνία ισχύος delta σε rad
if j==1
    delta(j)=0
else
    delta(j)=asin(Irms(j)*2*pi*f*Ls/Ef)
end
Ia(step)=Irms(j)*sqrt(2)*sin(2*pi*f*time(step)-delta(j));
Ib(step)=Irms(j)*sqrt(2)*sin(2*pi*f*time(step)+2*pi/3-delta(j));
Ic(step)=Irms(j)*sqrt(2)*sin(2*pi*f*time(step)-2*pi/3-delta(j));
mi_modifycircprop('A',1,Ia(step));
mi_modifycircprop('B',1,Ib(step));
mi_modifycircprop('C',1,Ic(step));
mi_analyze(1)
mi_loadsolution;
vectorA=mo_getcircuitproperties('A');
vectorB=mo_getcircuitproperties('B');
vectorC=mo_getcircuitproperties('C');
fluxlinkageA(step)=vectorA(3)
fluxlinkageB(step)=vectorB(3)
fluxlinkageC(step)=vectorC(3)
%ΓΙΑ ΝΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΟΥΜΕ ΤΗΝ RMS ΤΙΜΗ ΤΗΣ FLUX
sumsquareA=sumsquareA+fluxlinkageA(step)^2
sumsquareB=sumsquareB+fluxlinkageB(step)^2;
sumsquareC=sumsquareC+fluxlinkageC(step)^2;
Va(step)=3*fluxlinkageA(step)*P/2*2*pi*speed/60
Vb(step)=3*fluxlinkageB(step)*P/2*2*pi*speed/60
Vc(step)=3*fluxlinkageC(step)*P/2*2*pi*speed/60
mo_groupselectblock(2);
Fx(step)=3*mo_blockintegral(18)
Fy(step)=3*mo_blockintegral(19)
Tx(step)=abs(Fx(step))*127/1000
Pmech(step)=abs(Tx(step))*2*pi*speed/60
%ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΟΙΗΣ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΤΑΝΥΣΤΗ MAXWELL
mo_addcontour(-Edge,7.95)
mo_addcontour(Edge,7.95)
F1=3*mo_lineintegral(3)
mo_clearcontour
fx1(step)=F1(1)
fy1(step)=F1(2)
mo_addcontour(-Edge,-7.95)
mo_addcontour(Edge,-7.95)
F2=3*mo_lineintegral(3)
mo_clearcontour
fx2(step)=F2(1)
fy2(step)=F2(2)
Fx2(step)=fx1(step)-fx2(step)
Fy2(step)=fy1(step)-fy2(step)
Tx2(step)=abs(Fx2(step))*127/1000
Pmech2(step)=abs(Tx2(step))*2*pi*speed/60
step=step+1
end;
%Μετακίνηση του δρομέα κατά distance
%Ισοδυναμεί με 0.9 μηχανικές μοίρες
mi_selectgroup(2);
mi_movetranslate(distance,0);
%Προσθέτουμε 6 σημεία αριστερά του δεξιού συνόρου
mi_addnode(Edge,27.4);
mi_addnode(Edge,19.4);
mi_addnode(Edge,9.4);
mi_addnode(Edge,-9.4);
mi_addnode(Edge,-19.4);
mi_addnode(Edge,-27.4);
mi_addsegment(Edge,27.4,Edge,-27.4);
%Διαγράφουμε τα σημεία στο δεξί σύνορο
mi_selectnode(Edge+distance,27.4);

```

```

mi_selectnode(Edge+distance,19.4);
mi_selectnode(Edge+distance,9.4);
mi_selectnode(Edge+distance,-9.4);
mi_selectnode(Edge+distance,-19.4);
mi_selectnode(Edge+distance,-27.4);
mi_deleteselected;
%Προσθέτουμε 6 σημεία αριστερά του αριστερού συνόρου
mi_addnode(-Edge,27.4);
mi_addnode(-Edge,19.4);
mi_addnode(-Edge,9.4);
mi_addnode(-Edge,-9.4);
mi_addnode(-Edge,-19.4);
mi_addnode(-Edge,-27.4);
mi_addsegment(-Edge,27.4,-Edge,-27.4);
%Διαγράφουμε τα σημεία δεξιά του αριστερού συνόρου
mi_selectnode(-Edge+distance,27.4);
mi_selectnode(-Edge+distance,19.4);
mi_selectnode(-Edge+distance,9.4);
mi_selectnode(-Edge+distance,-9.4);
mi_selectnode(-Edge+distance,-19.4);
mi_selectnode(-Edge+distance,-27.4);
mi_deleteselected;
mi_addsegment(-Edge,27.4,Edge,27.4);
mi_addsegment(-Edge,-27.4,Edge,-27.4);
% Κάθε ημιπερίοδος χωρίζεται σε 3 υποπερίπτωσεις
%Πρώτη υποπερίπτωση
if r<=15
    mi_addsegment(-Edge,19.4,-117.92+d,19.4);
    mi_addsegment(-Edge,-19.4,-117.92+d,-19.4);
    mi_addsegment(-Edge,9.4,-117.92+d,9.4);
    mi_addsegment(-Edge,-9.4,-117.92+d,-9.4);
    mi_selectsegment(-125.6,19.4);
    mi_selectsegment(-125.6,-19.4);
    mi_selectsegment(-125.6,9.4);
    mi_selectsegment(-125.6,-9.4);
    mi_setsegmentprop(0, 1, 1, 0, 2);
    mi_clearselected;
    d=d+distance
%Δεύτερη υποπερίπτωση
elseif r<=51
    mi_addsegment(-Edge,19.4,-117.92+d,19.4);
    mi_addsegment(-Edge,-19.4,-117.92+d,-19.4);
    mi_addnode(-117.92+d-30,9.4);
    mi_addnode(-117.92+d-30,-9.4);
    mi_addsegment(-117.92+d-30,9.4,-117.92+d,9.4);
    mi_addsegment(-117.92+d-30,-9.4,-117.92+d,-9.4);
    mi_addnode(-117.92+d-30,19.4);
    mi_addnode(-117.92+d-30,-19.4);
    mi_addsegment(-117.92+d-30,9.4,-117.92+d-30,19.4);
    mi_addsegment(-117.92+d-30,-9.4,-117.92+d-30,-19.4);
    mi_addsegment(-117.92+d-30,19.4,-Edge,19.4);
    mi_addsegment(-117.92+d-30,-19.4,-Edge,-19.4);
    mi_selectsegment(-117.92+d-15,9.4);
    mi_selectsegment(-117.92+d-15,-9.4);
    mi_selectsegment(-117.92+d-30,14.4);
    mi_selectsegment(-117.92+d-30,-14.4);
    mi_selectsegment(-117.92,19.4);
    mi_selectsegment(-117.92,-19.4);
    mi_selectsegment(-132.42,19.4);
    mi_selectsegment(-132.42,-19.4);
    mi_selectsegment(-Edge,14.4);
    mi_selectsegment(-Edge,-14.4);
    mi_setsegmentprop(0, 1, 1, 0, 2);
    mi_clearselected;
    d=d+distance
%Τρίτη υποπερίπτωση
elseif r<=67
    if r==52
        mi_addnode(-Edge+distance-detail,19.4);
        mi_addnode(-Edge+distance-detail,9.4);

```

```

mi_addnode(-Edge+distance-detail,-19.4);
mi_addnode(-Edge+distance-detail,-9.4);
mi_addsegment(-Edge+distance-detail,19.4,-Edge+distance-detail,9.4);
mi_addsegment(-Edge+distance-detail,-19.4,-Edge+distance-detail,-9.4);
mi_addsegment(-Edge+distance-detail,19.4,-95.46,19.4);
mi_addsegment(-Edge+distance-detail,-19.4,-95.46,-19.4);
%Προσθέτουμε τους αριστερούς μαγνήτες όσο δεξιά γίνεται για την τρίτη
%υποπερίπτωση
mi_addblocklabel(-Edge+0.25,14.4);
mi_addblocklabel(-Edge+0.25,-14.4);
mi_selectlabel(-Edge+0.25,14.4);
mi_selectlabel(-Edge+0.25,-14.4);
mi_setblockprop('NdFeB 40 MGOe', 0, 2, '0', magnet, 2,0);
mi_clearselected;
mi_selectnode(Edge+distance,19.4);
mi_selectnode(Edge+distance,9.4);
mi_selectnode(Edge+distance,-19.4);
mi_selectnode(Edge+distance,-9.4);
mi_deletesectednodes;
mi_clearselected;
end;
mi_addsegment(-Edge,19.4,-Edge+l-detail,19.4);
mi_addsegment(-Edge,-19.4,-Edge+l-detail,-19.4);
mi_addsegment(-Edge,9.4,-Edge+l-detail,9.4);
mi_addsegment(-Edge,-9.4,-Edge+l-detail,-9.4);
mi_selectsegment(-132.82,19.4);
mi_selectsegment(-132.82,-19.4);
mi_selectsegment(-132.82,9.4);
mi_selectsegment(-132.82,-9.4);
mi_setsegmentprop(0, 1, 1, 0, 2);
mi_clearselected;
l=l+distance
end;
%Αν τελείωσε η ημιπερίοδος
%Προετοιμασία επόμενης ημιπερίοδου
if r==67
r=0
d=1;
l=1;
halfperiod=halfperiod+1
end;
x=x+distance
r=r+1
end;
N=step-1
%Υπολογισμός μέσης τιμής για την ροπή
%Telmean(j)=sumsquareT/N
Telmean(j)=mean(Tx)
Telmean2(j)=mean(Tx2)
%Εύρεση RMS τιμής της Flux
FluxRmsA=sqrt((sumsquareA)/N)
FluxRmsB=sqrt((sumsquareB)/N)
FluxRmsC=sqrt((sumsquareC)/N)
FluxRMS(j)=(FluxRmsA+FluxRmsB+FluxRmsC)/3
closefemm
end;

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Επιδόσεις της γεννήτριας για μεταβλητό ρεύμα και στροφές

```
P=12
R=0.195
Ls=1.793/1000
Bp=0.4
Fluxoc=0.05518
IN=13
JN=13
%Γραμμές i:Ρεύμα
%Στηλές j:Στροφές

for i=1:IN
    Irms(i)=i-1
    %Για σταθερό φορτίο, μεταβάλλονται οι στροφές
    n(1)=0
    for j=1:JN
        freqN(j)=n(j)*P/120
        Ef(j)=3*Fluxoc*P/2*2*pi*n(j)/60
        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)*3*R
            %%VtN(i,j)=VrmsN-Irms(i)*3*R
            VtN(i,j)=Ef(j)*cos(delta(i))-Irms(i)*3*R
        else
            VtN(i,j)=0
        end
        PelN(i,j)=3*VtN(i,j)*Irms(i)
        PcopperN(i)=3*Irms(i)^2*3*R
        PeddyN(j)=2.982*10^(-6)*n(j)^2*P^2*Bp^2
        PHMN(i,j)=PelN(i,j)+PcopperN(i)+PeddyN(j)
        ProtN(j)=0.045*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
        Vdc(i,j)=sqrt(3)*1.35*VtN(i,j)
        Idc(i)=sqrt(3/2)*Irms(i)
        Pdc(i,j)=Vdc(i,j)*Idc(i)
    end
    n(j+1)=n(j)+50
end
end
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Χαρακτηριστικές καμπύλες και επιδόσεις της ανεμογεννήτριας για απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές

```
Fluxoc=0.05
Rgen=0.614
Ls=1.793/1000
Bp=0.4
Rcable=0.35
Vbattery=48
rbattery=0.1
Vd=0.7
density=1.2
Radius=1.2
A=pi*Radius^2
P=12
lamdaopt=7
cpmax=0.35
nRnominal=265
Vwcutout=20
%i: στροφές
for i=1:nRnominal
    n(i)=i
    frequency(i)=n(i)*P/120
    %HED για I=0
    Ef(i)=3*Fluxoc*P/2*2*pi*n(i)/60
    Vdcopen(i)=1.35*sqrt(3)*Ef(i)
    % Av Vw<Vwcutin
    if Vdcopen(i)<Vbattery
        %Λόγω των διόδων δεν περνάει αρνητικό ρεύμα
        Irms(i)=0
        Idc(i)=0
        Vt(i)=Ef(i)
        Vdc(i)=Vdcopen(i)
        Pelectric(i)=0
        Pdc(i)=0
        Tel(i)=0
        Protation(i)=0.045*n(i)
        Peddy(i)=2.982*10^(-6)*n(i)^2*P^2*Bp^2
        Pmech(i)=Protation(i)+Peddy(i)
        Pair(i)=Pmech(i)
        Vw(i)=0
        lamda(i)=0
        % Av Vwcutin<Vw<Vwnominal
    else
        we=2*pi*frequency(i)
        w=2*pi*n(i)/60
        %Αντιστάσεις πριν τον ανορθωτή
        Rdc=2*(Rgen+Rcable)
        Rover=3/pi*we*Ls
        Idc(i)=(Vdcopen(i)-Vbattery)/(Rdc+Rover+rbattery)
        Vdc(i)=Vbattery+Idc(i)*rbattery
        Vt(i)=Vdc(i)/(1.35*sqrt(3))
        Irms(i)=sqrt(2/3)*Idc(i)
        Pdc(i)=Vdc(i)*Idc(i)
        %Pelectric είναι η ισχύς πριν τον ανορθωτή
        Pelectric(i)=3*Vt(i)*Irms(i)
        effrectifier(i)=Pdc(i)/Pelectric(i)*100
        Pcopper(i)=3*Irms(i)^2*(Rgen+Rcable)
        Peddy(i)=2.982*10^(-6)*n(i)^2*P^2*Bp^2
        PHM(i)=Pelectric(i)+Peddy(i)+Pcopper(i)
        Tel(i)=PHM(i)/(2*pi*n(i)/60)
        Protation(i)=0.045*n(i)
        Pmech(i)=PHM(i)+Protation(i)
        Tmech(i)=Pmech(i)/(2*pi*n(i)/60)
        Pair(i)=Pmech(i)
```

```

efficiency(i)=Pelectric(i)/Pmech(i)*100
%Vw συναρτήσει του n
const=1/2*density*pi*Radius^2
%ίσως βρίσκω σχέση Pmech-n από γραφική παράσταση, ίσως δεν χρειάζεται
syms V

s=p1*const*(w*Radius)^10+p2*const*(w*Radius)^9*V+p3*const*(w*Radius)^8*V^2+p4*const*(w*Radius)^7*V^3+p5*const*(w*
Radius)^6*V^4+p6*const*(w*Radius)^5*V^5+p7*const*(w*Radius)^4*V^6+p8*const*(w*Radius)^3*V^7+p9*const*(w*Radius)^
2*V^8+p10*const*(w*Radius)^1*V^9+p11*const*V^10-Pmech(i)*V^7
solution=solve(s)
y=solution(1)
Vw(i)=eval(y)
lamda(i)=w*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
end
end

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

Αεροδυναμική ισχύς της έλικας σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής για διάφορες ταχύτητες ανέμου

```
%i:δείκτης του Vw
%j:δείκτης του w
Vw(1)=0
for i=1:13
    w(1)=0
    for j=1:130
        lamdar(j)=w(j)*Radius/Vw(i)
        nP(j)=60*w(j)/(2*pi)
        %Από τα σημεία βρίσκουμε την εξίσωση που εκφράζει τη σχέση cp-λ
        cpr(i,j)= p1*lamdar(j)^10 + p2*lamdar(j)^9 + p3*lamdar(j)^8 + p4*lamdar(j)^7 + p5*lamdar(j)^6 + p6*lamdar(j)^5 + p7*lamdar(j)^4
        + p8*lamdar(j)^3 + p9*lamdar(j)^2 + p10*lamdar(j)^1 + p11
        Paero(i,j)=1/2*density*A*cpr(i,j)*Vw(i)^3
        if j~=130
            w(j+1)=w(j)+1
        end
    end
end
if i~=13
    Vw(i+1)=Vw(i)+1
end
end
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε

Χαρακτηριστικές καμπύλες και επιδόσεις της ανεμογεννήτριας για σύνδεση με λειτουργία MPPT

```
P=12
R=0.195
Rcable=0
Ls=1.793/1000
Bp=0.4
Fluxoc=0.05518
density=1.2
Radius=1.2
A=pi*Radius^2
Rgen=3*R+Rcable
P=12
lamdaopt=7
cpmax=0.35
Vwcutin=3
Vwnominal=10
Vwcutout=20
wRcutin=lamdaopt*Vwcutin/Radius
wRnominal=lamdaopt*Vwnominal/Radius
nRcutin=60*wRcutin/(2*pi)
nRnominal=60*wRnominal/(2*pi)
%i: δείκτης του Vw
for i=1:30
    Vw(i)=i
    if Vw(i)<Vwcutin
        wR(i)=0
        nR(i)=0
        Protation(i)=0.045*nR(i)
        Peddy(i)=2.982*10^(-6)*nR(i)^2*P^2*Bp^2
        Pair(i)=Protation(i)+ Peddy(i)
    elseif Vw(i)<Vwnominal
        wR(i)=lamdaopt*Vw(i)/Radius
        nR(i)=60*wR(i)/(2*pi)
        Protation(i)=0.045*nR(i)
        Peddy(i)=2.982*10^(-6)*nR(i)^2*P^2*Bp^2
        Pair(i)=1/2*density*A*cpmax*Vw(i)^3
    elseif Vw<Vwcutout
        if Vw(i)==Vwnominal
            Pair(i)=1/2*density*A*cpmax*Vw(i)^3
            Pairnominal=Pair(i)
            wR(i)=wRnominal
            nR(i)=nRnominal
            Protation(i)=0.045*nR(i)
            Peddy(i)=2.982*10^(-6)*nR(i)^2*P^2*Bp^2
        else
            %Av είχαμε Pitch control
            Pair(i)=Pairnominal
            wR(i)=wRnominal
            nR(i)=nRnominal
            Protation(i)=0.045*nR(i)
            Peddy(i)=2.982*10^(-6)*nR(i)^2*P^2*Bp^2
        end
    else
        Pair(i)=0
        Protation(i)=0
        Peddy(i)=0
        wR(i)=0
        nR(i)=0
    end
end
%Από μηχανική ροπή->ηλεκτρική ροπή βρίσκουμε το ρεύμα
%Από ρεύμα βρίσκουμε πεπλεγμένη ροή. Από πεπλεγμένη ροή και στροφές και ρεύμα βρίσκουμε την τάση
freqNN(i)=nR(i)*P/120
```



```

we=2*pi*freqNN(i)
PmechmeanNN(i)=Pair(i)
TmechanicNN(i)=PmechmeanNN(i)/wR(i)
Trotation(i)=Protation(i)/wR(i)
TelectricNN(i)=TmechanicNN(i)-Trotation(i)
%Σχέση Tel,Irms που προκύπτει από τη γραφική παράσταση
IrmsNN(i)=TelectricNN(i)*0.33-0.076
Idc(i)=sqrt(3/2)*IrmsNN(i)
Ef(i)=3*Fluxoc*P/2*2*pi*nR(i)/60
delta(i)=asin(IrmsNN(i)*we*Ls/Ef(i))
deltadeg(i)=delta(i)*180/pi
if Ef(i)*cos(delta(i))>=IrmsNN(i)*Rgen
    VtNN(i)=Ef(i)*cos(delta(i))-IrmsNN(i)*Rgen
    Vdc(i)=sqrt(3)*1.35*VtNN(i)
else
    VtNN(i)=0
    Vdc(i)=0
end
if Vw(i)<Vwcutin
    Pelectric(i)=0
    Pdc(i)=0
elseif Vw(i)<Vwnominal
    Pelectric(i)=3*VtNN(i)*IrmsNN(i)
    Pdc(i)=Vdc(i)*Idc(i)
elseif Vw<Vwcutout
    if Vw(i)==Vwnominal
        Pelectric(i)=3*VtNN(i)*IrmsNN(i)
        Pdc(i)=Vdc(i)*Idc(i)
        Pelectricnominal=Pelectric(i)
        Pdcnominal=Pdc(i)
    else
        Pelectric(i)=Pelectricnominal
        Pdc(i)=Vdc(i)*Idc(i)
    end
end
else
    Pelectric(i)=0
    Pdc(i)=Vdc(i)*Idc(i)
end;
PcopperNN(i)=3*IrmsNN(i)^2*Rgen
effgen(i)=Pelectric(i)/Pair(i)*100
effRect(i)=Pdc(i)/Pelectric(i)*100
end;

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ζ

Υπολογισμός της ενεργειακής απόδοσης της ανεμογεννήτριας

```
for i=2:12
Vwmean=i
syms Vw
f=inline('(p1*Vw^6+p2*Vw^5+p3*Vw^4+p4*Vw^3+p5*Vw^2+p6*Vw^1+p7)*(1.57*Vw/Vwmean^2*exp(-
0.785*(Vw/Vwmean)^2))','Vw','Vwmean','p1','p2','p3','p4','p5','p6','p7')
R=int(f(Vw,Vwmean,p1,p2,p3,p4,p5,p6,p7),3,10)
g=inline('(q1*Vw^6+q2*Vw^5+q3*Vw^4+q4*Vw^3+q5*Vw^2+q6*Vw^1+q7)*(1.57*Vw/Vwmean^2*exp(-
0.785*(Vw/Vwmean)^2))','Vw','Vwmean','q1','q2','q3','q4','q5','q6','q7')
S=int(g(Vw,Vwmean,q1,q2,q3,q4,q5,q6,q7),10,20)
X=eval(R)
Y=eval(S)
Pelmean(i)=eval(R+S)
E(i)=8760*Pelmean(i)
Ek(i)=E(i)/1000
CF(i)=Pelmean(i)/Pelectricnominal*100
end;
```

Βιβλιογραφία

- [1] Piggott H. "How to build a wind turbine, 2005.
- [2] Piggott H. "Windpower workshop", Centre for alternative technology publications, 2000.
- [3] Hau E. "Wind Turbines, fundamentals, technologies, application, economics", second edition, Springer, 2006.
- [4] Gieras J., Wang R., Kamper M. "Axial flux permanent magnet brushless machines", second edition, Springer, 2008.
- [5] 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.
- [6] Christensen K., "Catalogue of Small Wind Turbines", Nordic Folkecenter for Renewable Energy, 2009.
- [7] Parviainen A., Pyrhönen J., Kontkanen P., "Axial Flux Permanent Magnet Generator with Concentrated Winding for Small Wind Power Application", IEEE Int'l Conf. on Electric Machines and Drives, pp. 1187-1191.
- [8] 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.
- [9] Dubois M.R., H. Polinder, J.A. Ferreira, "Comparison of generator topologies for direct-drive wind turbines", Proc. Nordic Countries Power and Industrial Electronics Conference (NORPIE), Aalborg, 2000, pp. 22-26.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Alatalo M., "Permanent magnet machines with air gap windings and integrated teeth windings". Technical Report 288, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 1996.
- [14] Profumo F., Tenconi A., Zhang Z., Cavagnino A., "Novel Axial Flux Interior PM Synchronous Motor realized with Powdered Soft Magnetic Materials", Proceedings of the Conference of the Industry Application Society, IEEE, 1998, p. 152.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Piggott H, "A wind turbine recipe book, 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] Cistelecan M.V., Popescu Mircea, Popescu Mihail, “Study of the Number of slots/Pole Combinations for Low Speed Permanent Magnet Synchronous Generators”, IEEE-IEMDC Conference, Turkey, pp. 1616-1620.
- [20] Rossouw F., “Analysis and Design of Axial Flux Permanent Magnet Wind Generator System for Direct Battery Charging Applications”, thesis MScEng, Stellenbosch University, 2009.
- [21] Παπαδόπουλος Μ., “Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές”, έκδοση Ε.Μ.Π., 1997.
- [22] Zhang Z., Profumo F., Tenconi A., “Axial flux versus radial flux PM motors”, Proceedings of SPEEDAM, Capri, Italy, pp. A4-19 -A4-25, 5-7 June, 1996
- [23] Αναστόπουλος Χ., “Ανάλυση της λειτουργίας εργαστηριακού πρωτότυπου μικροδικτύου”, Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., 2004.
- [24] Μανίας Σ., “Ηλεκτρονικά ισχύος”, εκδόσεις Συμεών, 2007
- [25] 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.
- [26] Manual windy boy, www.sma-hellas.com
- [27] Kelvin Tan, Syed Islam, “Optimum Control Strategies in Energy Conversion of PMSG Wind Turbine System Without Mechanical Sensors”, IEEE transactions on energy conversion, Vol.19, NO. 2, June 2004.
- [28] De Broe A., Drouilhet S, Gevorgian V., “A peak power tracker for small wind turbines in battery charging applications”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 4, December 1999.
- [29] Muljadi E., Drouilhet S., Holz R., “Analysis of wind power for battery charging”, Presented at ASME Conference, Houston, Texas, Jan 28-Feb 2, 1996.
- [30] Παπαθανασίου Σ., “Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, σημειώσεις παραδόσεων”, Ε.Μ.Π., 2008.
- [31] Τσεκούρας Γ., “Μελέτη κατασκευής, ανάλυση κυκλωματικής και πεδιακής συμπεριφοράς δοκιμίου 2,5kW και ανεμογεννήτριας 25kW”, Μεταπτυχιακή εργασία Ε.Μ.Π., 2000.