



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

**Μελέτη γεννητριών αξονικής ροής για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του  
δρομέα μικρών ανεμογεννητριών σε απευθείας σύνδεση με συσσωρευτές για  
εφαρμογές χαμηλού κόστους**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αικατερίνη Γ. Χήρα

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2016





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

**Μελέτη γεννητριών αξονικής ροής για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του  
δρομέα μικρών ανεμογεννητριών σε απευθείας σύνδεση με συσσωρευτές για  
εφαρμογές χαμηλού κόστους**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αικατερίνη Γ. Χήρα

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 13<sup>η</sup> Ιουλίου 2016.

.....

Νικόλαος Χατζηαργυρίου

.....

Σταύρος Σ. Παπαθανασίου

.....

Πάυλος Γεωργιάκης

Αθήνα, Ιούλιος 2016

.....

Αικατερίνη Γ. Χήρα

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

Copyright © Αικατερίνη Γ. Χήρα, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς 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 και προσομοίωση της σύνδεσης ανεμογεννητριών μικρής κλίμακας με συσσωρευτές σε εφαρμογές χαμηλού κόστους και η δημιουργία και ανάλυση προγράμματος μεγιστοποίησης της ενεργειακής παραγωγής με βάση τη βέλτιστη διατομή καλωδίου και το βέλτιστο διάκενο μεταξύ των πηνίων και των μαγνητών της γεννήτριας.

Στην αρχή της εργασίας, γίνεται εισαγωγή στα οφέλη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των εφαρμογών μικρής κλίμακας και παρουσιάζονται οι βασικές αεροδυναμικές γνώσεις που χρειάζονται για τη μοντελοποίηση των πτερυγίων, τον προσανατολισμό της ανεμογεννήτριας και τον υπολογισμό της ενεργειακής παραγωγής της. Επιπλέον, αναλύεται θεωρητικά η λειτουργία των γεννητριών αξονικής ροής μονίμων μαγνητών και παρουσιάζονται οι βασικές τοπολογίες.

Εισάγεται η έννοια των μικροδικτύων και μελετώνται τα μοντέλα ανάλυσης της σύνδεσης των ανεμογεννητριών, τα οποία είναι το AC και το DC. Επίσης, περιγράφεται η μοντελοποίηση της ανεμογεννήτριας σε απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές στο περιβάλλον του Simulink Matlab και αναλύονται τα επιμέρους μοντέλα.

Παρουσιάζονται, στη συνέχεια, οι μετρήσεις για την επαλήθευση του ηλεκτρικού μέρους της σύνδεσης της ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης.

Αναλύεται το διεθνές πρότυπο μέτρησης της καμπύλης ισχύος και περιγράφεται ο εξοπλισμός του πεδίου δοκιμών της μικρής ανεμογεννήτριας στη Ραφήνα. Παρουσιάζονται, στη συνέχεια, οι μετρήσεις τόσο της γωνίας Furling για τον υπολογισμό της εξίσωσης της γωνίας Furling συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου όσο και της καμπύλης ισχύος της ανεμογεννήτριας και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης.

Εξετάζεται η διαδικασία υπολογισμού των χαρακτηριστικών των γεννητριών που προκύπτουν μέσω της προσομοίωσης τους με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων καθώς και του υπολογισμού της ετήσιας ενεργειακής παραγωγής.

Αναλύεται η διαδικασία υπολογισμού της βέλτιστης αντίστασης καλωδίου για τη μέγιστη ενεργειακή παραγωγή, επιλέγεται η βέλτιστη διατομή καλωδίου και γίνεται οικονομική μελέτη. Στη συνέχεια, εξετάζεται η διαδικασία εύρεσης του βέλτιστου διακένου της γεννήτριας και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ετήσιας ενεργειακής παραγωγής για διάφορες αποστάσεις της ανεμογεννήτριας από τη συστοιχία των συσσωρευτών.

Τέλος, συγκρίνονται τα αποτελέσματα της απευθείας σύνδεσης της ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές με τα αποτελέσματα της σύνδεσης μέσω MPPT και εξάγονται συμπεράσματα καθώς και βελτιωτικές προτάσεις.

**Λέξεις κλειδιά:**

μικρές ανεμογεννήτριες, χαμηλό κόστος, μηχανές αξονικής ροής, μόνιμοι μαγνήτες, μικροδίκτυα, MPPT, σύνδεση σε συσσωρευτές, γωνία Furling, μεγιστοποίηση ενεργειακής παραγωγής, βέλτιστη διατομή καλωδίου, βέλτιστο διάκενο γεννήτριας, απόσταση από συσσωρευτές.

## **Abstract**

The object of this thesis is the study and simulation of the direct battery connection of small scale wind turbines as part of low cost applications and the creation and analysis of a computer program that maximizes the energy production, based on the optimal cable cross-section and generator air gap.

As an introduction to the subject of the thesis, the benefits of renewable energy sources and small scale projects are presented. Then, the essential aerodynamic principles needed for modeling the wind blades, the turbine orientation and the calculation of the energy production are laid out. Furthermore, the thesis sets the theoretical background for the operation of the axial flow permanent magnet generators and the fundamental topologies are presented.

Next, the concept of microgrids is introduced and the models of AC and DC wind turbine connection analysis are explored. The thesis then describes how the modeling of a wind turbine direct battery connection is done using the Simulink Matlab interface and the corresponding models are analyzed.

The thesis then presents the measurements that ratify the electrical part of the wind turbine direct battery connection and compares those to the results produced from the simulation modeling.

Going on, the thesis analyzes the international standard for measuring the power curve and then describes the small wind turbine test site in Rafina. After that, the thesis presents the measurements of the Furling angle used to find the equation that connects the Furling angle to the wind speed and the power curve and compares them to the results produced from the simulation modeling.

The process of determining the wind turbine specifications using the Method of Finite Elements is then presented, as well as the way to calculate the annual energy production.

The writer goes on to analyze the process of finding the optimal cable resistance for maximizing energy production, choose the optimal cable cross-section and carry out a cost analysis. Next, the process of finding the optimal air gap is explained and the results of the annual energy production depending on the distance of the wind turbine from the batteries are presented.

Lastly, the results of the direct connection of the wind turbine to batteries are compared with the results of the connection through MPPT, conclusions are deducted and further optimizations are proposed.

**Key words:**

Small wind turbine, low cost, axial flux generators, permanent magnets, microgrids, MPPT, direct battery connection, Furling angle, maximizing energy production, optimal cable cross-section, optimal generator air gap, distance from batteries.



## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου για την επίβλεψη της διπλωματικής. Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω θερμά τον Κώστα Λατούφη για τις υποδείξεις και την καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια διεξαγωγής της εργασίας. Ιδιαίτερα ευχαριστώ σε όλα τα παιδιά του εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας για τις συμβουλές και τη βοήθεια στα διάφορα στάδια της έρευνας.



Στους γονείς μου



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή</b> .....	17
1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	17
1.1.1 Εφαρμογές μικρής κλίμακας .....	17
1.2 Αεροδυναμικά χαρακτηριστικά.....	19
1.2.1 Βασικές έννοιες αεροδυναμικής .....	19
1.2.2 Χαρακτηριστικά ισχύος.....	21
1.2.3 Κατανομή του ανέμου .....	23
1.2.4 Περιορισμός της ισχύος.....	24
1.2.5 Σύστημα ελέγχου με Furling .....	26
<b>Κεφάλαιο 2: Σύγχρονες γεννήτριες αξονικής ροής μονίμων μαγνητών</b> .....	33
2.1 Μηχανές μονίμων μαγνητών .....	33
2.2 Σύγκριση γεννητριών αξονικής και ακτινικής ροής .....	35
2.3 Γεννήτριες αξονικής ροής.....	39
2.3.1 Βασικά χαρακτηριστικά και τοπολογίες.....	39
2.3.2 Μονός δρομέας – Μονός στάτης .....	41
2.3.3 Διπλός δρομέας – Μονός στάτης .....	42
2.3.4 Διπλός στάτης – Μονός δρομέας .....	43
2.3.5 Συνδεσμολογία Torus .....	44
2.3.6 Η συνήθης επιλεγμένη τοπολογία: διπλός δρομέας-μονός στάτης χωρίς πυρήνα σιδήρου .....	45
2.4 Τα τυλίγματα .....	47
2.5 Θεωρητική Ανάλυση.....	50
2.5.1 Μαγνητική Ροή-ΗΕΔ .....	50
2.5.2 Ανάλυση του τυλίγματος .....	53
2.5.3 Το μαγνητικό κύκλωμα.....	56
2.5.4 Μελέτη απωλειών και ισοδύναμο κύκλωμα.....	61
<b>Κεφάλαιο 3: Σύνδεση ανεμογεννητριών</b> .....	65

3.1 Μικροδίκτυα.....	65
3.1.1 Διάταξη Μικροδικτύου .....	66
3.2 Τρόποι σύνδεσης ανεμογεννητριών .....	69
3.2.1 AC Σύνδεση .....	69
3.2.2 DC σύνδεση.....	72
<b>Κεφάλαιο 4: Μοντελοποίηση σύνδεσης ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές .....</b>	<b>75</b>
4.1 Μοντελοποίηση αεροδυναμικού μέρους της ανεμογεννήτριας.....	77
4.2 Μοντελοποίηση της γεννήτριας.....	82
4.3 Μοντελοποίηση του ανορθωτή .....	85
4.4 Μοντελοποίηση των συσσωρευτών .....	86
<b>Κεφάλαιο 5: Μέτρηση της γεννήτριας σε DC σύνδεση .....</b>	<b>89</b>
5.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης .....	89
5.2 Μέτρηση της εσωτερικής αντίστασης της μπαταρίας.....	90
5.3 Μέτρηση της γεννήτριας συνδεδεμένης σε συσσωρευτές και σύγκριση με το μοντέλο προσομοίωσης .....	92
<b>Κεφάλαιο 6: Διεθνές Πρότυπο Μέτρησης Καμπύλης Ισχύος .....</b>	<b>99</b>
6.1 Σκοπός του IEC Standard .....	99
6.2 Βασικά Κριτήρια .....	99
6.2.1 Τοποθεσία πεδίου δοκιμών ανεμογεννήτριας .....	99
6.2.2 Τομέας έγκυρων μετρήσεων .....	100
6.2.4 Επεξεργασία μετρήσεων – Βάση δεδομένων.....	102
6.2.5 Καθορισμός της μετρούμενης καμπύλης ισχύος .....	103
6.2.6 Υπολογισμός της ετήσιας ενεργειακής παραγωγής.....	103
6.2.7 Υπολογισμός βαθμού απόδοσης.....	104
6.3 Μέτρηση καμπύλης ισχύος στις μικρές ανεμογεννήτριες.....	105
<b>Κεφάλαιο 7: Μέτρηση μικρής ανεμογεννήτριας σε πεδίο δοκιμών .....</b>	<b>107</b>
7.1 Εξοπλισμός μέτρησης της γωνίας Furling και αποτελέσματα .....	107
7.2 Μέτρηση της καμπύλης ισχύος μικρής ανεμογεννήτριας.....	113
7.2.1 Εξοπλισμός ηλεκτρικών μετρήσεων .....	113
7.2.2 Εξοπλισμός μετεωρολογικών μετρήσεων .....	113

7.2.3 Κάρτα καταγραφής σημάτων .....	115
7.2.4 Μέτρηση καμπύλης ισχύος .....	115
<b>Κεφάλαιο 8: Προσομοίωση της γεννήτριας με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων ..</b>	<b>119</b>
8.1 Το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Finite Element Method Magnetics (FEMM) .....	119
8.2 Προσομοίωση του μαγνητικού πεδίου της γεννήτριας στη μέση ακτίνα .....	119
8.3 Υπολογισμός της αντίστασης και της αυτεπαγωγής του τυλίγματος του στάτη.....	122
8.4 Υπολογισμός της ηλεκτρομαγνητικής ροπής .....	122
<b>Κεφάλαιο 9: Μεγιστοποίηση της απόδοσης του δρομέα μικρών ανεμογεννητριών .....</b>	<b>129</b>
9.1 Υπολογισμός ενεργειακής παραγωγής ανεμογεννητριών.....	129
9.2 DC σύνδεση .....	130
9.2.1 Παρουσίαση των χαρακτηριστικών της γεννήτριας 850W .....	130
9.2.2 Απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές.....	131
9.2.3 Θεωρητική προσέγγιση και επεξήγηση της διαδικασίας.....	131
9.2.4 Διαδικασία εύρεσης και υπολογισμού της βέλτιστης αντίστασης καλωδίου .....	132
9.2.5 Διαδικασία επιλογής καλωδίου και οικονομική μελέτη .....	132
9.2.6 Διαδικασία εύρεσης βέλτιστου διακένου της γεννήτριας και αποτελέσματα ετήσιας ενεργειακής παραγωγής.....	138
9.2.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων της απευθείας σύνδεσης της ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές και της σύνδεσης μέσω MPPT.....	142
<b>Συμπεράσματα-Προτάσεις .....</b>	<b>149</b>
<b>Παραρτήματα .....</b>	<b>153</b>
Παράρτημα Α: Μετρήσεις $c_p$ - $\lambda$ .....	153
Παράρτημα Β: Αποτελέσματα διαφόρων γεννητριών.....	159
Παράρτημα Γ: Προγράμματα σε Matlab.....	187
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>209</b>





# **Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή**

## **1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας**

Τις τελευταίες δεκαετίες όλο και περισσότερο αναδεικνύεται το θέμα της κλιματικής αλλαγής, της υποβάθμισης του φυσικού περιβάλλοντος καθώς και των προεκτάσεων αυτών των αλλαγών τόσο στο ευρύτερο γήινο οικοσύστημα αλλά και ειδικότερα στη ζωή των ανθρώπων. Ένα πολύ σημαντικό κομμάτι αυτής της συζήτησης είναι το κομμάτι της ενεργειακής παραγωγής και ειδικότερα το κομμάτι εκείνο που αναφέρεται στην παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως είναι η ηλιακή, η αιολική, η γεωθερμική, η υδροηλεκτρική και πολλές άλλες. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης τέτοιων πηγών είναι προφανώς οι μειωμένες εκπομπές ρύπων και το μειωμένο κόστος παραγωγής τους καθώς και η οικειοποίηση τόσο των μεθόδων κατασκευής αλλά και των κοινωνικών προεκτάσεων της ευρείας και υπό όρους χρήσης τους από κομμάτια του πληθυσμού τα οποία είτε για αυστηρά οικονομικούς είτε για κοινωνικό - πολιτικούς λόγους είναι αποκλεισμένα σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό από συμβατικές μορφές ενεργειακής παραγωγής (υδρογονάνθρακες κλπ).

Συγκεκριμένα για την αιολική ενέργεια, μεγάλα αιολικά πάρκα έχουν αρχίσει να δημιουργούνται για να αντικαταστήσουν τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας από άνθρακα. Παράλληλα, παρόμοιας κλίμακας κινήσεις γίνονται και για τις άλλες μορφές ενεργειακής παραγωγής, προκειμένου να περιοριστεί η καύση ορυκτών καυσίμων.

Μολαταύτα, η λογική της συγκεντρωτικής μεγάλης κλίμακας παραγωγής δεν εξυπηρετεί πάντα τις ανάγκες των τοπικών κοινωνιών. Μικρότερης κλίμακας εγκαταστάσεις διεσπαρμένης παραγωγής ενέργειας είναι κοντά στις κοινωνίες που τις χρησιμοποιούν και είναι πιο συναφείς με αυτές και το περιβάλλον. Έτσι, σε πολλές περιπτώσεις εξυπηρετούν καλύτερα τις ανάγκες τους και έχουν πολλαπλάσια οφέλη.

Επιπλέον, είναι πολύ σημαντικό να εξασφαλιστεί ενεργειακή πρόσβαση σε κοινωνίες με λιγότερες ευκαιρίες, καθώς αυτό θα έχει αντίκτυπο στον τομέα της εκπαίδευσης, της υγείας και της τοπικής οικονομικής ανάπτυξης. Ταυτόχρονα, είναι σημαντικό για την αξιοπρέπεια μιας κοινωνίας και την αξιοπιστία του συστήματος, η πρόσβαση στην ενέργεια να ελέγχεται τοπικά.

### **1.1.1 Εφαρμογές μικρής κλίμακας**

Σύμφωνα λοιπόν και με τα προαναφερθέντα, πρόκειται για μια συνθήκη χρήσης παρά για μια αντικειμενική πραγματικότητα καθώς αυτό που στην ουσία διαχωρίζει τις προσπάθειες για παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές μικρής κλίμακας είναι από τη μία η ευκολία και η σχετικά ανέξοδη διαδικασία παραγωγής και από την άλλη η δυνατότητα αυτονομίας της

διαχείρισης σε επίπεδο μικρών κοινοτήτων. Ένα επιπρόσθετο όφελος είναι η δυνατότητα κατασκευής, ελέγχου και επισκευής των εν λόγω εγκαταστάσεων μικρής κλίμακας από ανθρώπους χωρίς ιδιαίτερες γνώσεις μηχανικής, μαθηματικών, μηχανολογίας κλπ. Κατ' αυτό τον τρόπο οι εγκαταστάσεις μικρής κλίμακας εξασφαλίζουν μεγαλύτερη ή μικρότερη ενεργειακή αυτονομία ενώ ταυτόχρονα είναι σχετικά απλό για τον οποιοδήποτε να ασχοληθεί μαζί τους τόσο σε επίπεδο κατανόησης των αρχών λειτουργίας όσο και στην ολοκληρωμένη διαχείριση τους, σε επίπεδο καθαρά τεχνικό αλλά και από πολιτική – κοινωνική σκοπιά. Τέλος, η συλλογική εργασία που απαιτούν τα συγκεκριμένα έργα, δημιουργούν σχέσεις μεταξύ των ατόμων που απαρτίζουν την ομάδα και εξασφαλίζουν την οριζόντια διάχυση της γνώσης στο κοινωνικό πεδίο.

Όταν αναφέρουμε κατασκευές και έργα μικρής κλίμακας, και ειδικά όταν αναφερόμαστε σε ανεμογεννήτριες και μικρά αιολικά πάρκα, εννοούμε κατασκευές με ονομαστική ισχύ κάτω από 70kW ενώ ανεμογεννήτριες κάτω από 10kW χαρακτηρίζονται ως ιδιαίτερα μικρές. Ο τύπος έλικας που έχει επικρατήσει στις μικρές ανεμογεννήτριες είναι η έλικα οριζόντιου άξονα περιστροφής με τρία πτερύγια. Το συνηθέστερο σύστημα αεροδυναμικού περιορισμού της ισχύος είναι το σύστημα furling, ενώ σε λιγότερες περιπτώσεις χρησιμοποιείται έλεγχος pitch και σπανιότερα έλεγχος stall. Η μεγάλη πλειοψηφία των μικρών ανεμογεννητριών διαθέτει γεννήτρια μονίμων μαγνητών, ενώ ένα μικρό ποσοστό 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 κυρίως σε περιοχές με χαμηλότερη ετήσια μέση ταχύτητα ανέμου απ' ότι τα αιολικά πάρκα, και επομένως η λειτουργία τους σε χαμηλότερους ανέμους είναι μια ακόμη σημαντική παράμετρος.

Όσον αφορά τη σύνδεση των ανεμογεννητριών, μπορούν να συνδεθούν στο δίκτυο χαμηλής τάσης είτε να αποτελέσουν μικρότερες αυτόνομες εγκαταστάσεις αποθηκεύοντας την ενέργεια τους σε μπαταρίες. Τέτοιες αυτόνομες εγκαταστάσεις ανεμογεννητριών βρίσκουν εφαρμογή σε απομακρυσμένες περιοχές όπου η πρόσβαση στο δίκτυο είναι πρακτικά αδύνατη.

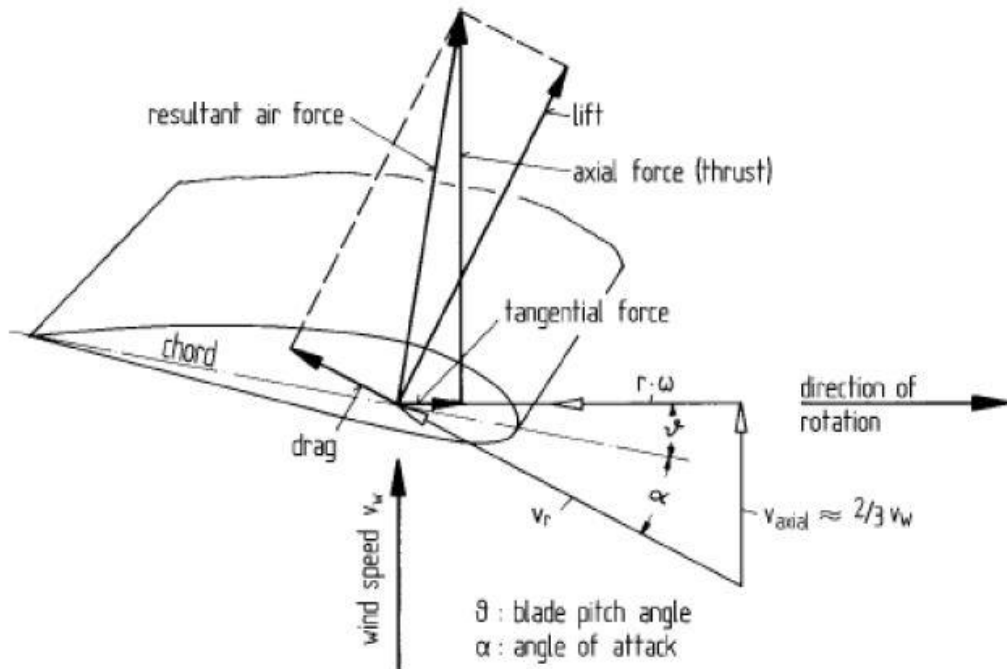
Αυτή η τοπολογία έχει δοκιμαστεί στο χρόνο και έχει αποδειχθεί απλή, αξιόπιστη και ευέλικτη. Χάρη σε σχέδια που έχουν εκδοθεί ([1], [2]) και σε πρακτικά σεμινάρια που διεξάγονται για την κατασκευή μικρών ανεμογεννητριών, δίνεται η δυνατότητα σε ανθρώπους χωρίς εξειδικευμένη γνώση και με απλά εργαλεία και υλικά, να κατασκευάσουν μια μικρή ανεμογεννήτρια καθώς και να τη συντηρούν και να την επισκευάζουν. Συνεπώς, λόγω της δημοτικότητας και της χρησιμότητας αυτών των αυτόνομων συστημάτων είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα η βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους.

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί, πως το ένα τρίτο περίπου του παγκόσμιου πληθυσμού δεν έχει πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι μικρές ανεμογεννήτριες μπορούν να κατασκευαστούν εύκολα και με χαμηλό κόστος και να ηλεκτροδοτήσουν σχολεία, κλινικές και άλλα ζωτικά κέντρα μιας κοινότητας, συμβάλλοντας στην άνοδο του βιοτικού επιπέδου των κατοίκων της. Άλλες εφαρμογές που μπορούν να έχουν σε αγροτικό επίπεδο είναι η σύνδεσή τους με αντλίες νερού για ύδρευση και άρδευση και η παροχή ενέργειας σε κέντρα φόρτισης συσσωρευτών.

## 1.2 Αεροδυναμικά χαρακτηριστικά

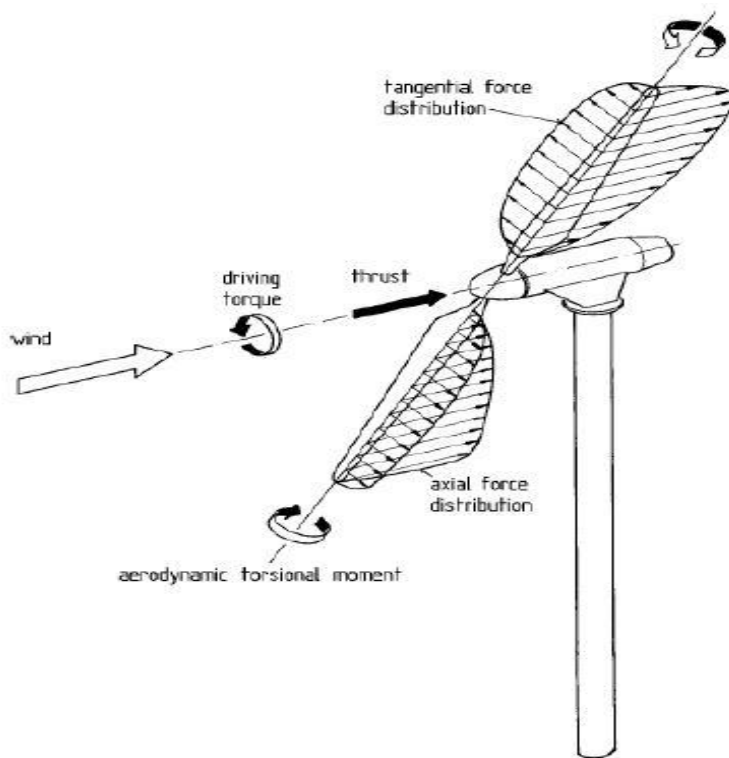
### 1.2.1 Βασικές έννοιες αεροδυναμικής

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



Σχήμα 1.1: Αεροτομή του πτερυγίου μιας ανεμογεννήτριας.

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



**Σχήμα 1.2:** Κατανομή των δυνάμεων που ασκούνται σε μια φτερωτή.

Γενικά, και επιστρέφοντας στο σχήμα 1.1 η δύναμη άνωσης είναι υπεύθυνη για την περιστροφική κίνηση της γεννήτριας, ενώ η δύναμη τριβής αντιτίθεται σε αυτή. Προκειμένου, λοιπόν, να επιτευχθεί υψηλός αεροδυναμικός συντελεστής - με άλλα λόγια να μπορεί κανείς να αποσπάσει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μηχανική ενέργεια από τον άνεμο - ο λόγος αυτών των δύο πρέπει να ελαχιστοποιηθεί. Αυτόν ακριβώς το λόγο καθορίζει η γωνία πρόσπτωσης  $\alpha$ , η ιδανική τιμή της οποίας ορίζεται περίπου στις  $4^\circ$ . Για κάθε σημείο όμως της φτερωτής η συνιστώσα του σχετικού ανέμου  $\omega R$  αλλάζει αφού αλλάζει η ακτίνα, με αποτέλεσμα η γωνία  $\alpha$  να αλλάζει κι εκείνη. Δεδομένης, λοιπόν, της θεωρητικής βέλτιστης τιμής των  $4^\circ$  θα πρέπει να αλλάξει η γωνία  $\theta$  προκειμένου να επιτυγχάνεται η βέλτιστη λειτουργία. Πιο κοντά στον άξονα της γεννήτριας, όπου η ακτίνα και άρα η συνιστώσα  $\omega R$  είναι πολύ μικρή, η γωνία  $\theta$  θα είναι μεγαλύτερη δίνοντας έτσι μια αίσθηση στρέψης στα φτερά.

### 1.2.2 Χαρακτηριστικά ισχύος

Ο άνεμος, λόγω της κίνησης του, έχει κινητική ενέργεια, ένα μέρος της οποίας μπορούν να αποσπάσουν τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας μετατρέποντάς τη σε μηχανική ενέργεια.

Το γεγονός ότι τα πτερύγια δεν μπορούν να αποσπάσουν όλη την ενέργεια του ανέμου εκφράζεται μέσω του αεροδυναμικού συντελεστή, ο οποίος σύμφωνα με το νόμο του Betz, έχει μέγιστη τιμή  $c_{p,max}=0,593$ . Λόγω κατασκευαστικών ατελειών, βέβαια, η τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή στην πραγματικότητα είναι ακόμα μικρότερη.

Στη συνέχεια, η μηχανική ενέργεια εισέρχεται στη γεννήτρια η οποία μετατρέπει ένα μέρος της σε ηλεκτρική ενέργεια, ενώ το άλλο μέρος χάνεται ως απώλειες. Η μηχανική ισχύς που δεσμεύεται από τον άνεμο και εισέρχεται στη γεννήτρια δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_{air} = \frac{1}{2} \rho c_p \pi R_{turb}^2 v_w^3 \quad (1.1)$$

όπου:

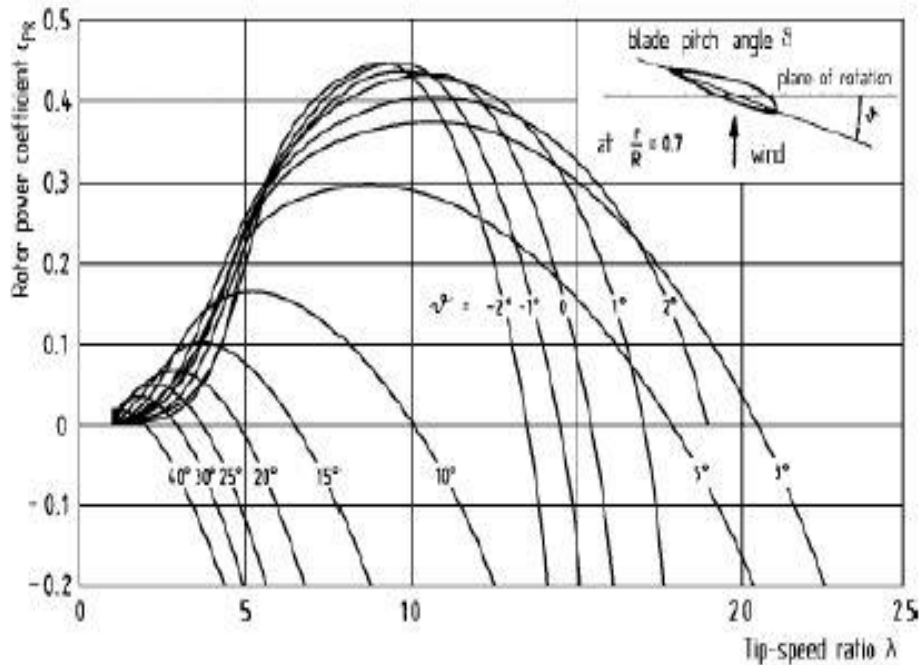
- $\rho$ , η πυκνότητα του ανέμου
- $c_p$ , ο αεροδυναμικός συντελεστής
- $R_{turb}$ , η ακτίνα της φτερωτής
- $v_w$ , η ταχύτητα του ανέμου

Ο αεροδυναμικός συντελεστής δεν παραμένει σταθερός κατά τη λειτουργία μιας ανεμογεννήτριας, αντιθέτως μεταβάλλεται σε σχέση με τον άνεμο, τις στροφές και την ακτίνα της φτερωτής σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$\lambda = \frac{\omega R_{turb}}{v_w} \quad (1.2)$$

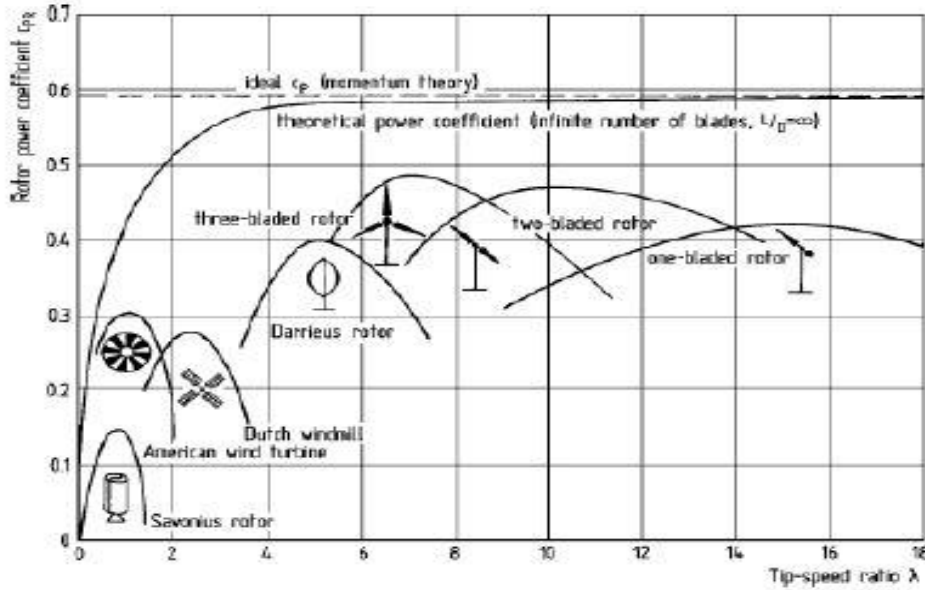
όπου  $\omega$  η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας.

Το κλάσμα αυτό αναφέρεται ως λόγος ακροπτερυγίου και ο αεροδυναμικός συντελεστής είναι άμεση συνάρτηση του λόγου αυτού. Παρακάτω παρατίθενται οι μεταβολές του αεροδυναμικού συντελεστή σε σχέση με το  $\lambda$  και το βήμα πτερυγίου  $\theta$ , το οποίο είναι ουσιαστικά μια αεροδυναμική κατασκευαστική παράμετρος που επηρεάζει τη συμπεριφορά των πτερυγίων κατά την πρόσπτωση ανέμου πάνω τους.



**Σχήμα 1.3:** Μεταβολή του αεροδυναμικού συντελεστή σε σχέση με το λόγο ακροπτερυγίου και τη γωνία βήματος πτερυγίου.

Οι καμπύλες αυτές εξαρτώνται κυρίως από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της φτερωτής [3] και κυρίως από τον αριθμό των φτερών, το μήκος της χορδής κατά μήκος του φτερού, τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά και την κατανομή της γωνίας  $\theta$ . Συνοψίζοντας σχηματικά έχουμε:



Σχήμα 1.4: Καμπύλες  $c_p$ - $\lambda$  για διάφορους τύπους φτερωτών.

### 1.2.3 Κατανομή του ανέμου

Εκείνο που ενδιαφέρει περισσότερο στην εξέταση μιας ανεμογεννήτριας είναι η ενεργειακή της απόδοση, το μέγεθος εκείνο που εκτιμά την ενεργειακή παραγωγή σε χρονικό διάστημα ενός συνήθως έτους. Είναι προφανές ότι από τη στιγμή που ο άνεμος σε μια περιοχή δεν μπορεί να είναι σταθερός σε διάστημα ενός έτους, δεν είναι σταθερή και η διαθέσιμη μηχανική ισχύς στην είσοδο της γεννήτριας, η οποία είναι δύσκολο να υπολογιστεί λόγω της αλλαγής του ανέμου και των στροφών κι ακολούθως της αλλαγής του  $\lambda$  και του  $c_p$ . Επομένως, για να ξεπεράσουμε το στοχαστικό αυτής της κατάστασης χρησιμοποιούμε μια κατανομή ανέμου. Σύμφωνα με το [4] η κατανομή της ταχύτητας του ανέμου σε μια θέση περιγράφεται συνήθως από τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Weibull:

$$h(v_w) = \frac{k}{c} \left(\frac{v_w}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v_w}{c}\right)^k} \quad (1.3)$$

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

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

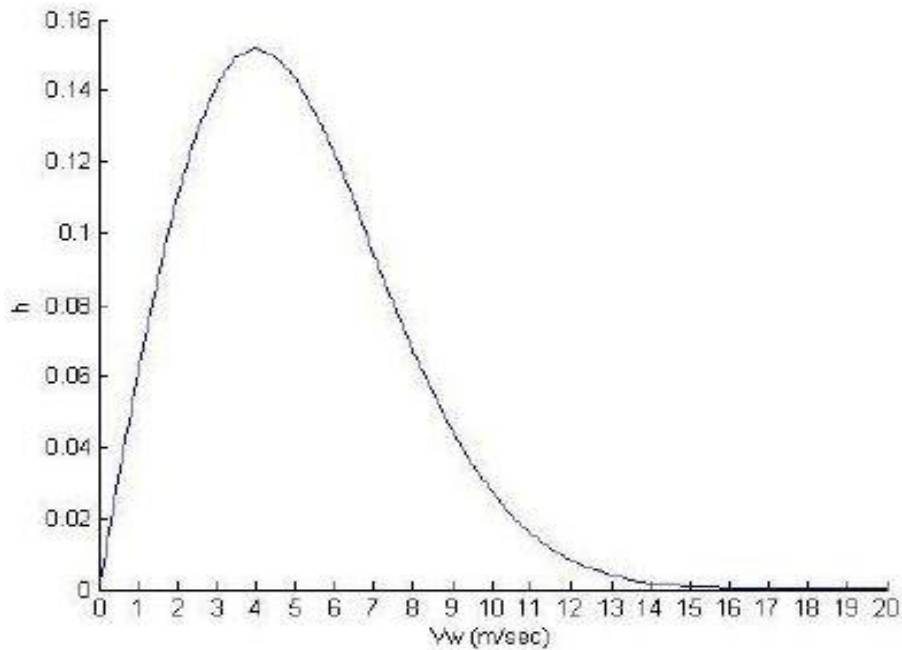
Η παράμετρος κλίμακας  $c$  καθορίζει τη μέση τιμή του ανέμου για συγκεκριμένη θέση και ισχύει για την κατανομή Rayleigh:

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

και προκύπτει στην τελική κατανομή ανέμου η εξής σχέση:

$$h(v_w) = \frac{1,57 \cdot v_w}{v_w^2} e^{-0,785\left(\frac{v_w}{v_w}\right)^2} \quad (1.4)$$

Στη συγκεκριμένη εργασία θεωρούμε ότι ο μέσος άνεμος είναι 5 m/s κι έτσι προκύπτει η παρακάτω μορφή της κατανομής:



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

Τα παραπάνω θα αξιοποιηθούν σε επόμενο κεφάλαιο της εργασίας που αφορά την ενεργειακή παραγωγή της ανεμογεννήτριας, στην οποία όπως θα εξετάσουμε παίζει αρκετά σημαντικό ρόλο τόσο η κατανομή του ανέμου αλλά και η σχέση του  $c_p$  και του λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου.

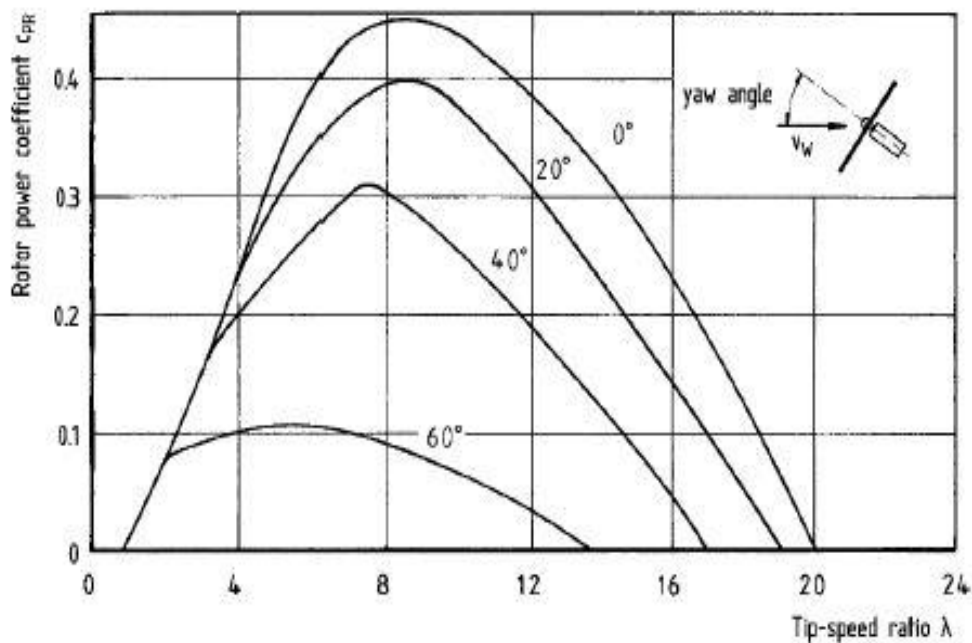
#### 1.2.4 Περιορισμός της ισχύος

Τα ονομαστικά μεγέθη κάθε ανεμογεννήτριας ουσιαστικά προσδιορίζουν και μία συγκεκριμένη τιμή ανέμου μέχρι την οποία μπορεί να λειτουργήσει η ανεμογεννήτρια χωρίς κίνδυνο βλάβης. Τιμές μεγαλύτερες των ονομαστικών επιδέχονται κινδύνους βλάβης. Πιο συγκεκριμένα έχουν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες τιμές ρευμάτων και επομένως είναι άμεσα ορατός ο κίνδυνος υπερθέρμανσης των τυλιγμάτων. Επίσης, σημαντικό είναι το γεγονός ότι και τα ίδια τα φτερά υπάρχει περίπτωση να μην αντέξουν στις καταπονήσεις που επιφέρουν μεγαλύτερες τιμές ανέμου από τις ονομαστικές.



Σε εφαρμογές και κατασκευές μεγάλου κόστους αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την αλλαγή της γωνίας βήματος  $\theta$ , η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του εμβαδού της φτερωτής, άρα της επιφάνειας που “βλέπει” ο άνεμος και κατ’ επέκταση της ισχύος. Η τεχνική αυτή ονομάζεται pitch control και επιτυγχάνει τη διατήρηση της ανεμογεννήτριας σε ονομαστικά μεγέθη ακόμα και για μεγαλύτερες τιμές ανέμου από τις ονομαστικές.

Αυτός είναι ο βασικός τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται ο έλεγχος της ισχύος. Πρόκειται όμως για μέθοδο οικονομικά ασύμφορη για εφαρμογές χαμηλού κόστους. Έτσι, αναπτύχθηκε το σύστημα furling το οποίο θα αναλυθεί στην επόμενη ενότητα εκτενέστερα. Εν ολίγοις το σύστημα αυτό απομακρύνει την ανεμογεννήτρια από το μέτωπο του ανέμου καθώς η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται επικίνδυνα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται η ισχύς του ανέμου και επομένως να επιτυγχάνεται και έλεγχος ισχύος της γεννήτριας.



**Σχήμα 1.7:** Περιορισμός του αεροδυναμικού συντελεστή και επομένως της ισχύος μέσω της γωνίας yaw.

Το παραπάνω γράφημα παρουσιάζει την αλλαγή του αεροδυναμικού συντελεστή σε σχέση με τη γωνία yaw. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα ο αεροδυναμικός συντελεστής προσδιορίζει το βαθμό απορρόφησης της ισχύος από την ανεμογεννήτρια και άρα μεταβάλλοντας τον αεροδυναμικό συντελεστή επιτυγχάνεται μεταβολή και στη συγκεκριμένη περίπτωση έλεγχος της ισχύος.

### 1.2.5 Σύστημα ελέγχου με Furling

Η διαδικασία της απομάκρυνσης των πτερυγίων μίας ανεμογεννήτριας από την κύρια κατεύθυνση του ανέμου με σκοπό να μειωθεί η ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων ονομάζεται Furling. Το Furling αποτελεί είδος παθητικού ελέγχου (passive control) και λειτουργεί μειώνοντας τη γωνία υποδοχής του ανέμου από τη φτερωτή, γεγονός που ελαχιστοποιεί την προκληθείσα ώση (thrust) στο δρομέα καθώς και την πλάγια δύναμη (side force) που δέχεται στον άξονα yaw της ανεμογεννήτριας.

Η λογική ύπαρξης αυτού του συστήματος βασίζεται στο γεγονός ότι η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου, πάνω από κάποιο όριο μπορεί να προκαλέσει πρόβλημα υπερφόρτωσης σε όλο το σύστημα μιας ανεμογεννήτριας. Με τον όρο υπερφόρτωση γίνεται αναφορά αρχικά στην υπερθέρμανση που είναι δυνατό να λάβει χώρα στο εσωτερικό της γεννήτριας και των δίοδων του ανορθωτή λόγω ροής μεγάλων ρευμάτων, στην υπερβολική επιτάχυνση της ταχύτητας περιστροφής των πτερυγίων και στην ανάπτυξη μεγάλων δυναμικών φορτίων στις πλάγιες πλευρές της ανεμογεννήτριας καθώς και στον ιστό της. Γενικά, η παραγόμενη ισχύς από την ανεμογεννήτρια οφείλεται στη δύναμη της ώθησης ή ώσης που ασκείται στα πτερύγια της, η οποία εξαρτάται από το τετράγωνο της ταχύτητας του ανέμου (Σχέση 1.5).

$$T = \frac{1}{2} \rho c_t \pi R_{turb}^2 v_w^2 \quad (1.5)$$

όπου,

- $T$ , η δύναμη της ώσης (thrust) (N)
- $\rho$ , η πυκνότητα του αέρα ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
- $c_t$ , ο συντελεστής του thrust
- $R_{turb}$ , η ακτίνα της έλικας (m)
- $v_w$ , η ταχύτητα του ανέμου (m/s)

Ιδανικά, είναι επιθυμητό η ανεμογεννήτρια να παράγει το ονομαστικό της φορτίο και για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες από την ονομαστική. Συνεπώς, με το σύστημα Furling επιδιώκεται η βελτιστοποίηση ανάμεσα στην παραγόμενη ισχύ και στην ασφαλή λειτουργία της ανεμογεννήτριας.

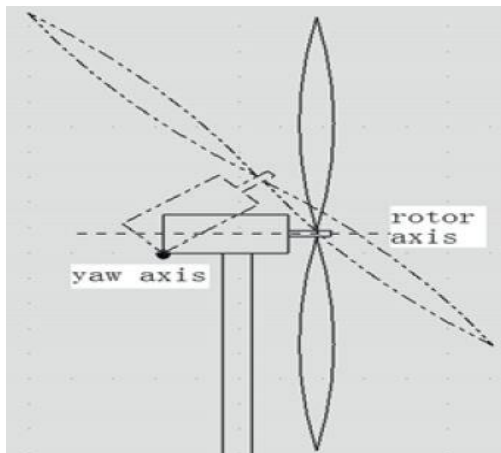
#### 1.2.5.1 Είδη παθητικού ελέγχου με Furling

Υπάρχουν διάφοροι τύποι παθητικού ελέγχου στις μικρές ανεμογεννήτριες και ιδιαίτερα με Furling. Όλα στηρίζονται στην ίδια ιδέα, η οποία πηγάζει από νόμους της φυσικής περί ισορροπίας συστημάτων λόγω των ασκούμενων δυνάμεων και των προκληθέντων από αυτές

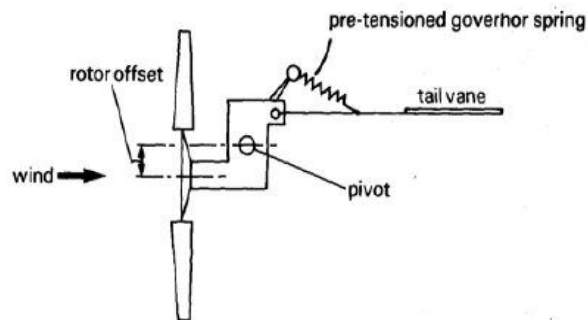
ροπών πάνω στα διάφορα μέρη της ανεμογεννήτριας. Αναλυτικότερα, υπάρχουν οι παρακάτω μηχανισμοί παθητικού ελέγχου και Furling στις μικρές ανεμογεννήτριες [5]:

- Μηχανισμός ανύψωσης του άξονα του δρομέα (tilt up) χωρίς ουρά
- Μηχανισμός με ουρά εφοδιασμένη με ελατήριο και μη κεντραρισμένο δρομέα
- Μηχανισμός με ουρά εφοδιασμένη με ελατήριο, κεντραρισμένο δρομέα και πλάγιο πτερύγιο-ουρά
- Μηχανισμός με συστελλόμενη ουρά και μη κεντραρισμένο δρομέα
- Μηχανισμός με συστελλόμενη ουρά, κεντραρισμένο δρομέα και πλάγιο πτερύγιο-ουρά

Συγκεκριμένα, στο μηχανισμό tilt up ο άξονας του δρομέα έχει τη δυνατότητα ανύψωσης, με αποτέλεσμα να αυξηθεί η γωνία πρόσκρουσης της ταχύτητας του ανέμου με την επιφάνεια της φτερωτής (Σχήμα 1.8α) και η τελευταία να δέχεται μικρότερης τιμής συνιστώσα ταχύτητας του ανέμου. Αυτό που συμβαίνει είναι ότι η ώση, που δέχεται η φτερωτή μετά από μία ταχύτητα κι άνω, γίνεται μεγαλύτερη από το βάρος της διάταξης του δρομέα, με αποτέλεσμα ο δρομέας να ανυψώνεται. Προφανώς, η ταχύτητα στην οποία ενεργοποιείται αυτός ο έλεγχος καθορίζεται από το βάρος της διάταξης, αφού μεγαλύτερο βάρος σημαίνει ότι απαιτείται μεγαλύτερη δύναμη ανύψωσης, η οποία επιτυγχάνεται με μεγαλύτερη ταχύτητα του ανέμου όπως φαίνεται κι από τη σχέση 1.5. Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου, αυξάνεται η γωνία πρόσκρουσης μέχρι την ταχύτητα αποκοπής της ανεμογεννήτριας στην οποία δέχεται μηδαμινή ώση και τα πτερύγια δεν μπορούν να περιστραφούν άλλο. Το σύστημα αυτό ανταποκρίνεται αρκετά καλά στη ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα, αλλά υστερεί στον προσανατολισμό της ανεμογεννήτριας προς την επικρατούσα κατεύθυνση του ανέμου.



(α)

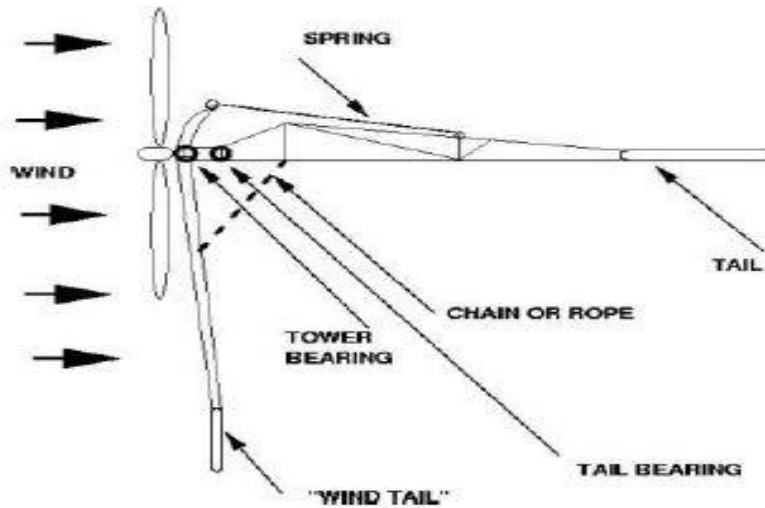


(β)

**Σχήμα 1.8:** Είδη παθητικού ελέγχου μικρής ανεμογεννήτριας: (α) μηχανισμός ανύψωσης του άξονα του δρομέα, (β) μηχανισμός με ουρά εφοδιασμένη με ελατήριο και μη κεντραρισμένο δρομέα.

Στο σύστημα Furling με ουρά και μη κεντραρισμένο δρομέα, ο άξονας του δρομέα και η ουρά δεν είναι στην ίδια ευθεία που διέρχεται από το κέντρο (Σχήμα 1.8β). Σε κανονικές τιμές ανέμου, όταν η γεννήτρια προσπαθεί να εκτραπεί από τον άνεμο λόγω της μη εκκεντρότητας της, η ουρά μετακινείται σε μία θέση στην οποία η δύναμη ανύψωσης τείνει να επαναφέρει τη γεννήτρια στην αρχική της θέση κι έτσι το σύστημα ισορροπεί. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου, αυξάνεται η ώση που τείνει να περιστρέψει το δρομέα και ταυτόχρονα αυξάνεται και η δύναμη ανύψωσης στην ουρά με αποτέλεσμα να εξακολουθεί να υπάρχει ισορροπία. Όταν, όμως, η δύναμη ανύψωσης στην ουρά ξεπεράσει την ώση, η ουρά μετακινείται σε μία νέα θέση. Σε αυτή τη θέση, η φτερωτή στρέφεται μακριά από τον άνεμο, η ώση μικραίνει και μία νέα ισορροπία αποκαθίσταται [6]. Η διαφορά μεταξύ του μηχανισμού με ελατήριο συνδεόμενο με την ουρά και τον άξονα προσανατολισμού (yaw) και του μηχανισμού χωρίς ελατήριο έγκειται στο γεγονός ότι η απομάκρυνση του δρομέα από την κύρια κατεύθυνση σε ισχυρούς ανέμους καθώς και η ευθυγράμμισή του εξαρτάται και από τη δύναμη λόγω επιμήκυνσης του ελατηρίου πέραν από το βάρος της ουράς. Συνεπώς, η ταχύτητα στην οποία ενεργοποιείται το σύστημα ελέγχου Furling εξαρτάται από το μέγεθος της ουράς και του ελατηρίου, εφόσον υπάρχει, καθώς μεγαλύτερο βάρος απαιτεί μεγαλύτερη ώση, άρα και μεγαλύτερη ταχύτητα ανέμου για να περιστραφεί ο δρομέας. Το μειονέκτημα του μηχανισμού με ελατήριο είναι ότι σκουριάζει πολύ εύκολα και οδηγεί σε δυσλειτουργία ολόκληρου του συστήματος. Για το λόγο αυτό, δε συστήνεται σε παράκτιες περιοχές με πολύ μεγάλους ανέμους [5].

Η διαφορά του συστήματος Furling με συστελλόμενη-κύρια ουρά, κεντραρισμένο δρομέα και πλάγια ουρά και του συστήματος με συστελλόμενη ουρά και μη κεντραρισμένο δρομέα είναι ότι ο δρομέας είναι κεντραρισμένος με την ευθεία της κύριας ουράς (άξονας yaw) και το ρόλο της μη εκκεντρότητας που είχε ο δρομέας τον έχει μία πλάγια ουρά μικρότερης επιφάνειας από την κύρια (Σχήμα 1.9). Συνεπώς, στηρίζεται στην ίδια λογική, που αναφέρθηκε παραπάνω, θεωρώντας ότι η ώση που ασκείται στο δρομέα και τείνει να τον εκτρέψει, ασκείται σε αυτήν την περίπτωση στην πλάγια ουρά. Η κύρια ουρά και εδώ αναλαμβάνει τον ρόλο του προσανατολισμού της ανεμογεννήτριας. Επιπροσθέτως, το ελατήριο, εφόσον υπάρχει, λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο που αναλύθηκε παραπάνω και σε αυτή την περίπτωση.



Σχήμα 1.9: Σύστημα Furling με ελατήριο και πλάγια ουρά.

Από τους παραπάνω μηχανισμούς έχει καθιερωθεί ότι οι μικρές ανεμογεννήτριες με συστελλόμενη ουρά και μη κεντραρισμένο δρομέα αποτελούν τον απλούστερο και οικονομικότερο τρόπο παθητικού ελέγχου [5] γι' αυτό οι επόμενες αναφορές θα είναι για το συγκεκριμένο σύστημα.

### 1.2.5.2 Λειτουργία Furling

Το Furling, όπως εξηγήθηκε παραπάνω, στηρίζεται στην κύρια ουρά που βρίσκεται στον άξονα προσανατολισμού καθώς εκτός της παθητικής πέδησης που προκαλεί στην ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, ευθυγραμμίζει και την φτερωτή στην κύρια κατεύθυνση του ανέμου όταν αυτός είναι σε χαμηλότερες ή ίσες ταχύτητες από την ονομαστική. Όπως ήδη αναφέρθηκε, η ταχύτητα που ενεργοποιείται το σύστημα ελέγχου εξαρτάται από το συνολικό βάρος της ουράς καθώς σε αυτή την ταχύτητα η ώση (thrust) το υπερβαίνει. Η ταχύτητα αυτή συμβολίζεται με  $v_t$  (Velocity trigger) και στις περιπτώσεις όπου ισχύει  $v_w < v_t$ , ο άξονας του δρομέα είναι παράλληλος με τον άξονα της ουράς. Όταν, όμως, ισχύει  $v_w \geq v_t$ , ο άξονας της ουράς ανυψώνεται και αποκλίνει από την κύρια διεύθυνση του ανέμου, δημιουργώντας μία γωνία  $\delta$  μεταξύ της κύριας κατεύθυνσης του ανέμου και του δρομέα. Στη νέα πλέον διεύθυνση, η φτερωτή δέχεται ταχύτητα ανέμου που είναι ίση με τη συνιστώσα  $v_w \cdot \cos\delta$  και παράγει ισχύ ανάλογη του κύβου αυτής της ταχύτητας όπως φαίνεται στην κάτωθι σχέση:

$$P_{air} = \frac{1}{2} \pi \rho c_p R_{turb}^2 (v_w \cos\delta)^3 \quad (1.6)$$

Η γωνία  $\delta$  αυξάνεται καθώς η συνιστώσα αυτή υπερβαίνει την ταχύτητα  $v_t$  και συνήθως κυμαίνεται μέχρι και τις  $60^\circ$  (Σχήμα 1.10) ενώ υπάρχουν περιπτώσεις που μπορεί να φτάσει και τις  $90^\circ$  και τότε η ουρά έρχεται παράλληλα με τη φτερωτή.



**Σχήμα 1.10:** Ανύψωση της ουράς και επιβράδυνση της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα της ανεμογεννήτριας.

Επομένως, όταν η γωνία  $\delta$  είναι μη μηδενική, η εξίσωση 1.5 για την ώση γίνεται:

$$T = \frac{1}{2} \pi \rho c_t R_{turb}^2 (v_w \cos \delta)^2 \quad (1.7)$$

Επιπλέον, αναπτύσσεται μία πλάγια δύναμη μικρότερης τιμής που δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$F_s = \frac{1}{2} \rho c_s A_s (v_w \cos \delta)^2 \quad (1.8)$$

όπου,

- $c_s$ , ο συντελεστής της πλάγιας δύναμης (side force)
- $A_s$ , η πλάγια επιφάνεια του δρομέα ( $m^2$ )

Επιπρόσθετα, όταν η ουρά δεν είναι ευθυγραμμισμένη με την κατεύθυνση του ανέμου και βρίσκεται σε γωνία  $\alpha$ , ασκείται σε αυτή αεροδυναμική δύναμη η οποία δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$F_V = \frac{1}{2} \rho c_N (1 - a)^2 A_v v_w^2 \quad (1.9)$$

όπου,

- $\alpha$ , ο συντελεστής του άξονα εισαγωγής (axis induction) και συνήθως είναι ίσος με 0,3
- $c_N$ , ο συντελεστής της αεροδυναμικής κανονικής δύναμης (normal force) και όταν η γωνία  $\alpha$  κυμαίνεται από  $0^\circ$  έως  $40^\circ$  ισούται με  $2,6\alpha$
- $A_v$ , η επιφάνεια της ουράς ( $m^2$ )





## Κεφάλαιο 2: Σύγχρονες γεννήτριες αξονικής ροής μονίμων μαγνητών

### 2.1 Μηχανές μονίμων μαγνητών

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

Αρχικά να σημειωθεί ότι στις μεγάλες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται είτε γεννήτριες επαγωγής είτε σύγχρονες γεννήτριες. Οι γεννήτριες επαγωγής μπορούν να συνδεθούν είτε απευθείας στο δίκτυο σε λειτουργία σταθερών στροφών, καθώς 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 μεριά, οι σύγχρονες γεννήτριες μονίμων μαγνητών, αν και χρησιμοποιήθηκαν στο παρελθόν ως ανεμογεννήτριες, δεν είχαν ευρεία χρήση λόγω της μη ικανοποιητικής ποιότητας των μαγνητών. Στη συνέχεια όμως, με τη βελτίωση των μαγνητικών υλικών και ιδιαίτερα με την ανάπτυξη των μαγνητών νεοδυμίου (NdFeB) τη δεκαετία του 80', οι μηχανές μονίμων μαγνητών ήρθαν και πάλι στο προσκήνιο [7].

Η χρήση μονίμων μαγνητών αντί ηλεκτρομαγνητών (ηλεκτρικής διέγερσης) στο δρομέα της γεννήτριας έχει διάφορα πλεονεκτήματα, τα οποία παρουσιάζονται κάτωθι:

- πιο απλή κατασκευή, καθώς δε χρειάζονται ψήκτρες για τη μεταβίβαση της ενέργειας στο δρομέα [8],
- καλύτερη απόδοση, αφού δεν υπάρχουν απώλειες διέγερσης ούτε απώλειες στις ψήκτρες,
- αυτονομία, καθώς δεν απαιτείται ηλεκτρική τροφοδοσία από το δίκτυο ή από μπαταρία, η οποία είναι ιδιαίτερα σημαντική για εφαρμογές σε απομονωμένες αγροτικές εγκαταστάσεις,
- λιγότερες απαιτήσεις σε συντήρηση λόγω της απουσίας ψηκτρών.

Επιπλέον, ένα πλεονέκτημα των γεννητριών μονίμων μαγνητών είναι το γεγονός ότι ο συντελεστής ισχύος δε μειώνεται όταν αυξάνονται οι πόλοι όπως συμβαίνει στις γεννήτριες

επαγωγής λόγω αύξησης της αυτεπαγωγής διαρροής (leakage inductance). Γι' αυτό το λόγο, οι γεννήτριες μονίμων μαγνητών είναι κατάλληλες για λειτουργία με πολλούς πόλους και χαμηλή ταχύτητα περιστροφής ως ανεμογεννήτριες άμεσης κίνησης (direct-drive).

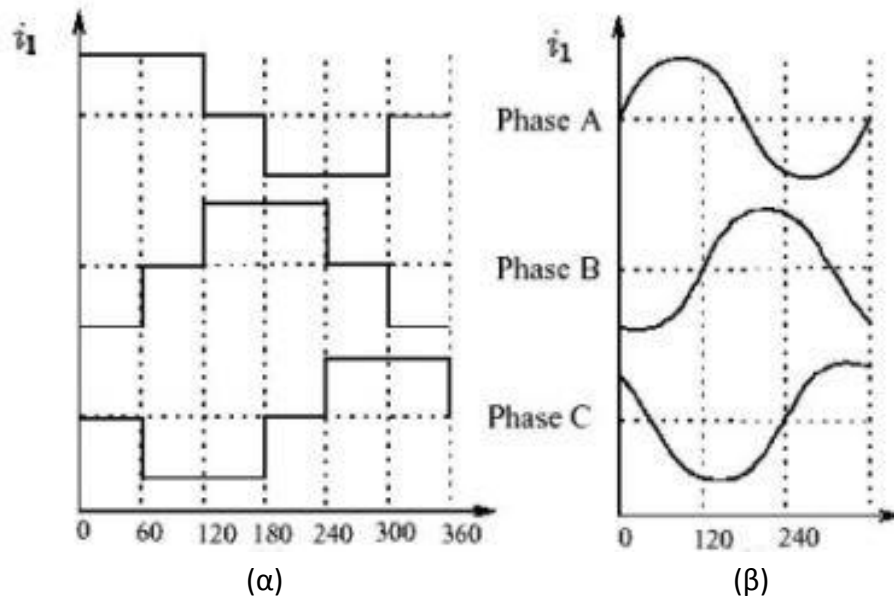
Φυσικά και οι γεννήτριες μονίμων μαγνητών δεν έχουν μόνο πλεονεκτήματα. Το μειονέκτημά τους είναι πως η τάση εξόδου μπορεί να ελεγχθεί μόνο μέσω των στροφών της γεννήτριας και όχι μέσω της τάσης διέγερσης, αφού για δεδομένες στροφές έχουμε συγκεκριμένη τάση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η τάση εξόδου της γεννήτριας να μεταβάλλεται καθώς μεταβάλλονται οι στροφές [9].

Οι μηχανές μονίμων μαγνητών κατηγοριοποιούνται με βάση την κατεύθυνση της μαγνητικής ροής του πεδίου σε μηχανές αξονικής και ακτινικής ροής και αυτή η διάκριση αναλύεται σε επόμενη ενότητα. Επίσης, διακρίνονται με βάση την τοποθεσία των τυλιγμάτων στις εξής κατηγορίες:

- *Επιφανειακών μονίμων μαγνητών:* Τα τυλίγματα του στάτη έχουν αρκετές ομοιότητες με τα τυλίγματα της μηχανής επαγωγής, τα οποία βρίσκονται στην επιφάνεια του πυρήνα του στάτη. Οι μόνιμοι μαγνήτες είναι κολλημένοι στην επιφάνεια του πυρήνα του δρομέα. Η μηχανή μπορεί να στρέφεται από εξωτερική πηγή και τα τυλίγματα του στάτη παράγουν συμμετρικές τριφασικές ημιτονοειδείς τάσεις. Σε αυτό το σχεδιασμό οι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι στο διάκενο της μηχανής, με αποτέλεσμα να είναι συνεχώς εκτεθειμένοι στις αρμονικές του στάτη και να παράγουν δινορρέυματα όταν λειτουργεί σε μεταβλητές στροφές.
- *Εμφυτευμένων μαγνητών:* Οι μόνιμοι μαγνήτες βρίσκονται εμφυτευμένοι στο εσωτερικό του δρομέα. Με αυτή την κατασκευή οι μαγνήτες είναι προστατευμένοι από τις υψηλές αρμονικές των πόλων και είναι εφικτή η επίτευξη υψηλότερων ταχυτήτων περιστροφής σε σύγκριση με αυτές των επιφανειακών λόγω της συμπαγούς δομής τους.

Ένας άλλος διαχωρισμός των μηχανών μονίμων μαγνητών αξονικής ροής γίνεται με κριτήριο την κατανομή της πυκνότητας της μαγνητικής ροής καθώς και της καμπύλης του ρεύματος διέγερσης (Σχήμα 2.1) και προκύπτουν οι εξής κατηγορίες [9]:

- *Σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών αξονικής ροής χωρίς ψήκτες:* Σε αυτή την κατασκευή η μαγνητική ροή και τα τυλίγματα του στάτη κατανέμονται ημιτονικά.
- *Μηχανές συνεχούς ρεύματος μονίμων μαγνητών αξονικής ροής χωρίς ψήκτες:* Σε αυτή την περίπτωση, η κατανομή της μαγνητικής ροής στο διάκενο είναι τραπεζοειδής και η κυματομορφή του ρεύματος γραμμής είναι ορθογωνική. Γι' αυτό το λόγο ονομάζονται και μηχανές τετραγωνικής κυματομορφής.



**Σχήμα 2.1:** Κυματομορφές ρεύματος για μηχανές μονίμων μαγνητών αξονικής ροής χωρίς ψήκτρες: (α) ορθογωνικές και (β) ημιτονοειδείς.

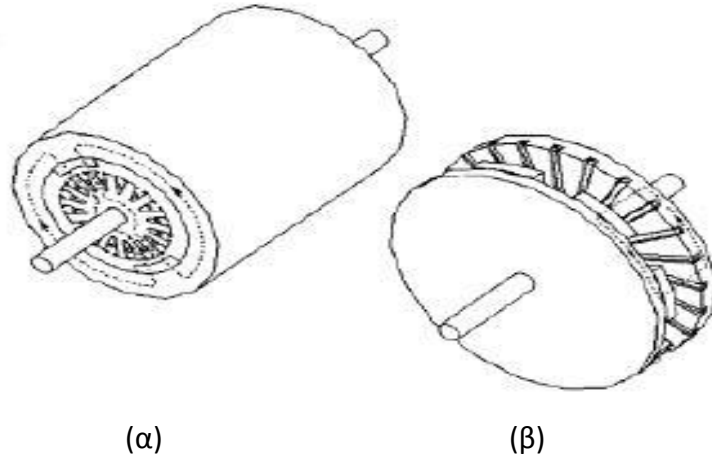
## 2.2 Σύγκριση γεννητριών αξονικής και ακτινικής ροής

Διακρίνουμε δύο βασικά είδη μηχανών μονίμων μαγνητών:

- τις μηχανές ακτινικής ροής (RFPM)
- τις μηχανές αξονικής ροής (AFPM)

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

Η βασική δομική τους διαφορά, που παρατηρείται άμεσα στο σχήμα 2.2, είναι ότι η μηχανή ακτινικής ροής έχει κυλινδρική δομή, σε αντίθεση με τις μηχανές αξονικής ροής που έχουν δισκοειδή δομή. Στην πρώτη περίπτωση, η μαγνητική ροή παράγεται από τους μόνιμους μαγνήτες στην ακτινική διεύθυνση και είναι παράλληλη στην ακτίνα της μηχανής. Ενώ στη δεύτερη περίπτωση, η μαγνητική ροή ταξιδεύει στη διεύθυνση του άξονα της γεννήτριας, κάθετα στην ακτίνα της μηχανής, και διέρχεται από το διάκενο στα τυλίγματα του στάτη.



**Σχήμα 2.2:** Μηχανή μονίμων μαγνητών α) ακτινικής ροής, β) αξονικής ροής.

Οι μηχανές αξονικής ροής καθυστέρησαν ιδιαίτερα να χρησιμοποιηθούν, κυρίως για τους παρακάτω λόγους [10]:

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

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

- Δυνατότητα αύξησης της πυκνότητας ισχύος. Αυτό μπορεί εύκολα να συμβεί περιορίζοντας το υλικό του πυρήνα.
- Ο λόγος της διαμέτρου του πυρήνα προς το μήκος του άξονα περιστροφής είναι πολύ μεγάλος. Έτσι, οι μηχανές αξονικής ροής αερίζονται και ψύχονται πιο εύκολα, χωρίς εξωτερικό μηχανισμό.
- Λόγω της δισκοειδούς της δομής μπορεί πιο εύκολα να ρυθμιστεί το μήκος του διακένου.
- Αυξάνοντας την εξωτερική διάμετρο του πυρήνα υπάρχει η δυνατότητα εύκολης εγκατάστασης μεγαλύτερου αριθμού πόλων και λειτουργίας της μηχανής σε χαμηλές ταχύτητες περιστροφής και, συνεπώς, χρήσης της σε εφαρμογές υψηλής συχνότητας και χαμηλής ταχύτητας καθώς ισχύει η σχέση:

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

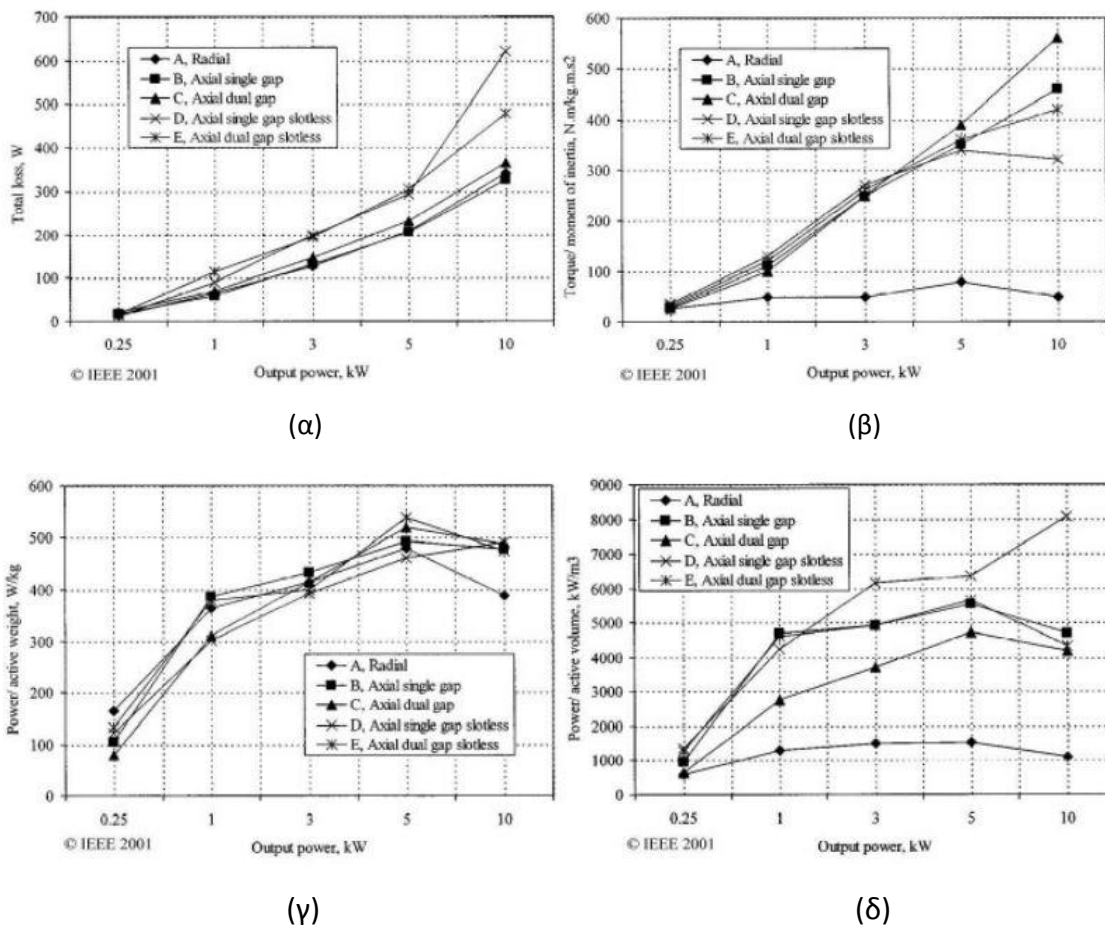
Αυτό καθιστά τη μηχανή αξονικής ροής κατάλληλη επίσης για αιολικά συστήματα χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων.

- Τέλος, πολλοί δίσκοι μπορούν να συνδυαστούν για την επίτευξη υψηλότερης ισχύος ή ροπής.

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

Αξίζει όμως να αναφερθεί ότι από ένα σημείο και μετά (όταν η ακτίνα της μηχανής αξονικής ροής γίνει ίση με το διπλάσιο του μήκους μιας ακτινικής [9]) η μηχανή αξονικής ροής χάνει τα πλεονεκτήματά της που αφορούν το επίπεδο ισχύος που μπορεί αυτή να προσφέρει. Ή αντιστρόφως ένα υψηλό επίπεδο ισχύος απαιτεί μεγαλύτερο όγκο της μηχανής αξονικής ροής παρά της μηχανής ακτινικής ροής.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μιας μελέτης και συγκεκριμένα η διαγραμματική σύγκριση των μηχανών [10]:



**Σχήμα 2.3:** Σύγκριση διαφόρων μηχανών αξονικής ροής με μία ακτινικής. Παρατίθενται τα εξής μεγέθη σε σχέση με την αποδιδόμενη ισχύ: α) Συνολικές απώλειες, β) Ροπή, γ) Ισχύς προς ενεργό βάρος, δ) Ισχύς προς ενεργό όγκο.

Επιπρόσθετα, παρατίθενται χαρακτηριστικά τα αποτελέσματα μιας μελέτης που έχει γίνει στο [11]. Γίνεται σύγκριση μιας μικρής γεννήτριας αξονικής ροής και μιας ακτινικής που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε αιολικές εφαρμογές. Η γεννήτρια αξονικής ροής δεν περιλαμβάνει πυρήνα σιδήρου σε αντίθεση με τη μηχανή ακτινικής ροής. Ωστόσο, και οι δύο είναι σχεδιασμένες ώστε να δίνουν την ίδια ροπή, στις ίδιες στροφές και με την ίδια τάση εξόδου. Τα αποτελέσματα συνοπτικά παρουσιάζονται κάτωθι:

- *Αξονική ροή:* Η κατασκευή είναι αρκετά απλή και φθηνή. Είναι σχετικά ελαφριά και πραγματοποιείται καλή απαγωγή θερμότητας δίχως εξοπλισμό αερισμού. Τέλος, η απόδοση της μηχανής παραμένει σταθερά υψηλή για ταχύτητες ανέμων από 3-10 m/s, κάτι που ενδιαφέρει πολύ στην περίπτωση μας καθώς στις εφαρμογές που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί η γεννήτρια που μελετάμε, θα συναντώνται και αρκετά χαμηλές ταχύτητες ανέμου (3-5 m/s).
- *Ακτινική ροή:* Η κατασκευή είναι αρκετά πιο πολύπλοκη κυρίως λόγω του τοροειδούς τυλίγματος που χρησιμοποιείται και πιο ακριβή. Είναι βαρύτερη και επιτυγχάνει υψηλή απόδοση μόνο κοντά στις ονομαστικές συνθήκες (10 m/s). Αυτό την καθιστά ακατάλληλη καθώς οι μικρές ανεμογεννήτριες πολύ συχνά υφίστανται ανέμους αρκετά χαμηλότερους από αυτούς για τους οποίους σχεδιάστηκαν.

Μία επιπλέον σύγκριση μεταξύ των δύο διαφορετικών τοπολογιών έχει γίνει στο [12]. Στη μελέτη αυτή ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής παράγει πολλές μηχανές αξονικής και ακτινικής ροής αφού του έχουν δοθεί συγκεκριμένες παράμετροι. Συγκρίνονται δηλαδή εικονικές μηχανές αξονικής ροής με άυλακες και ακτινικής ροής. Τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται είναι το κόστος προς τη ροπή και η ροπή προς τον όγκο.

Ως προς το πρώτο κριτήριο, η μηχανή ακτινικής ροής είναι προτιμότερη. Με λίγα λόγια σε μία μηχανή ακτινικής ροής η αύξηση της ροής έχει μικρότερο κόστος σε σύγκριση με τη μηχανή αξονικής ροής με άυλακες. Ως προς το δεύτερο κριτήριο, όμως, η μηχανή αξονικής ροής με άυλακες υπερτερεί της ακτινικής καθώς μία αύξηση του όγκου στις μηχανές αξονικής ροής θα φέρει πολύ μεγαλύτερη αύξηση της ροπής συγκριτικά με τις μηχανές ακτινικής ροής. Επομένως, το ερώτημα είναι ποιο κριτήριο μας ενδιαφέρει σε κάθε περίπτωση.

Παρατηρούμε, λοιπόν, πως ανάλογα με την εφαρμογή, τη δομή της μηχανής και τα κριτήρια που θέλουμε να ικανοποιούνται άλλοτε προκρίνονται οι μηχανές αξονικής ροής και άλλοτε οι μηχανές ακτινικής ροής. Τα διάφορα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των δύο μηχανών πρέπει να αξιολογηθούν κατάλληλα πριν την τελική επιλογή.

## 2.3 Γεννήτριες αξονικής ροής

### 2.3.1 Βασικά χαρακτηριστικά και τοπολογίες

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

α) Μηχανές μονής πλευράς (Μονός δρομέας-Μονός στάτης)

- Με πυρήνα σιδήρου με αύλακες
- Με πυρήνα σιδήρου δίχως αύλακες
- Χωρίς πυρήνα σιδήρου

β) Μηχανές διπλής πλευράς

i) Διπλός δρομέας-Μονός στάτης (εσωτερικός)

- Με πυρήνα σιδήρου στο στάτη και με αύλακες
- Με πυρήνα σιδήρου το στάτη
- Χωρίς πυρήνα σιδήρου

ii) Διπλός στάτης-Μονός δρομέας (εσωτερικός)

- Με πυρήνα σιδήρου στο στάτη και με αύλακες
- Με πυρήνα σιδήρου το στάτη
- Χωρίς πυρήνα σιδήρου

iii) Πολλαπλών δίσκων

Στη συνέχεια, θα πρέπει να γίνει αναφορά σε δύο από τα χαρακτηριστικά που επαναλαμβάνονται σε κάθε είδος, τις αύλακες και τον πυρήνα. Είδαμε ότι υπάρχουν μηχανές με ή χωρίς πυρήνα και εφόσον υπάρχει πυρήνας μηχανές με ή χωρίς αύλακες.

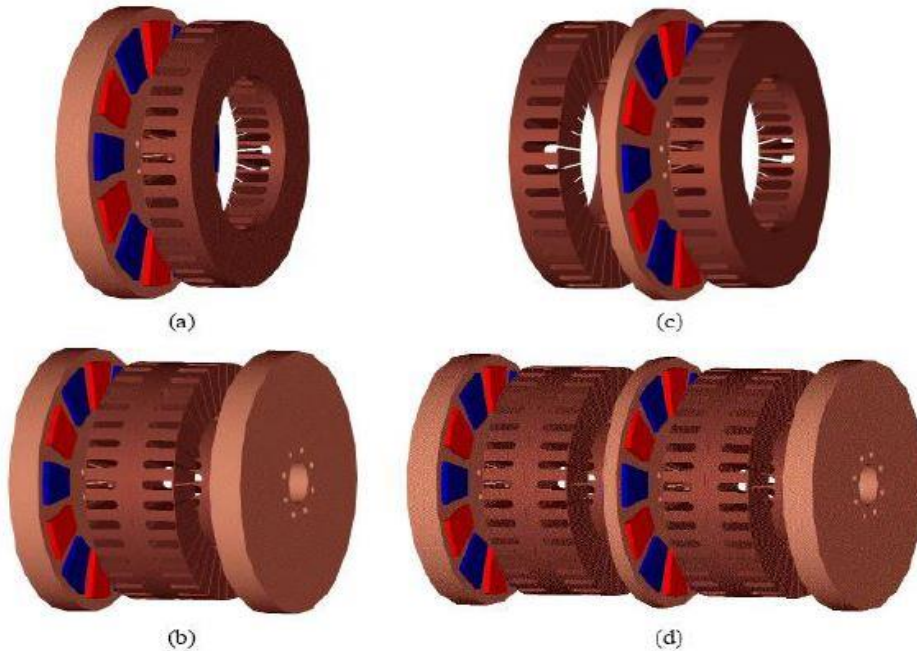
Αύλακες: Το πλεονέκτημα είναι ότι μειώνουν το διάκενο, φέρνοντας πιο κοντά το σίδηρο στους μαγνήτες, ενισχύοντας έτσι το μαγνητικό πεδίο. Συνεπώς, έχουμε μεγαλύτερη ροπή με τους ίδιους μαγνήτες. Άμεσο δηλαδή αποτέλεσμα της ύπαρξης αυλάκων είναι η μείωση του όγκου των μαγνητών και άρα και του κόστους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

Το μειονέκτημα είναι η δημιουργία ροπής ευθυγράμμισης (Cogging Torque), η οποία οφείλεται στα δόντια (teeth). Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται καθώς οι μαγνήτες έλκονται περισσότερο από το σίδηρο όταν περνούν μπροστά από τις αύλακες από ότι όταν περνούν

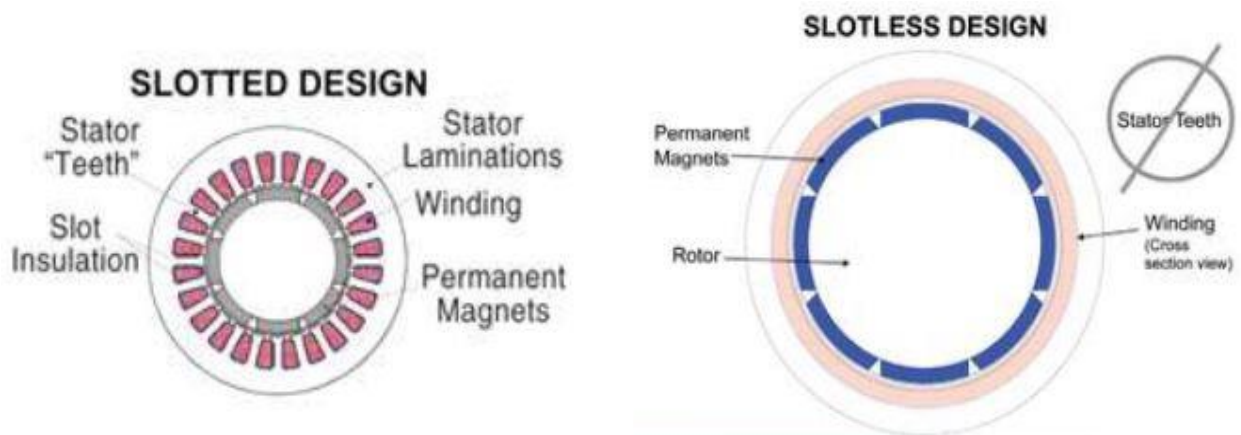


από το διάκενο μεταξύ των αυλάκων. Αν αφήσουμε ελεύθερο το σύστημα θα κινηθεί ώστε να ευθυγραμμιστεί κάπου. Αυτό μας δυσκολεύει γενικά στην εκκίνηση της γεννήτριας, ιδιαίτερα όταν σε αιολικές εφαρμογές έχουμε να αντιμετωπίσουμε χαμηλούς ανέμους. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί σε μείωση της απόδοσης, δονήσεις στη μηχανή και δημιουργία θορύβου. Επίσης, έχουμε και ελκτική δύναμη μεταξύ δρομέα και στάτη που μπορεί να παραμορφώσει τους δίσκους της γεννήτριας.

Σχέδια μηχανών που περιλαμβάνουν και αύλακες παρουσιάζονται παρακάτω:



**Σχήμα 2.4:** Διάφορες τοπολογίες μηχανών με αύλακες.



**Σχήμα 2.5:** Σχεδίαση με και χωρίς αύλακες.



Πυρήνας: Ανυπαρξία πυρήνα σημαίνει ανυπαρξία απωλειών υστέρησης και δινορρευμάτων. Οι απώλειες στους μαγνήτες και στους δίσκους του δρομέα είναι αμελητέες. Συνεπώς, οι μηχανές χωρίς πυρήνα μπορούν να λειτουργήσουν με υψηλότερη απόδοση συγκριτικά με άλλες τοπολογίες.

Επίσης, η απουσία σιδήρου έχει σαν αποτέλεσμα να μην υπάρχει ροπή ευθυγράμμισης και μαγνητικός κορεσμός με αποτέλεσμα η σχέση ροπής-ρεύματος να είναι γραμμική και η κυματομορφή της τάσης σχεδόν ημιτονοειδής. Παράλληλα, δεν υπάρχουν ελκτικές δυνάμεις μεταξύ στάτη και δρομέα, γεγονός που επιτρέπει την πιο εύκολη εκκίνηση της μηχανής αλλά και την πιο εύκολη συναρμολόγησή της. Τέλος, αφού δεν υπάρχουν αύλακες ούτε σίδηρος στο στάτη, η κατασκευή της μηχανής είναι πιο εύκολη και πιο ελαφριά [17].

Ανυπαρξία, όμως, πυρήνα σημαίνει και πιο ασθενές μαγνητικό πεδίο, καθώς ο πυρήνας είναι ουσιαστικά αυτός που ενισχύει το πεδίο. Επομένως, απαιτείται περισσότερο μαγνητικό υλικό για την ενίσχυση του πεδίου, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα το υψηλότερο κόστος της μηχανής [9].

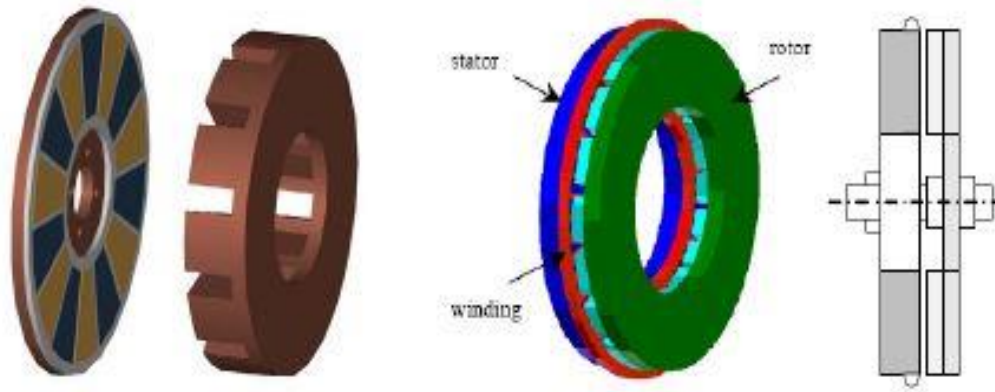
Επίσης, παρά την απουσία απωλειών πυρήνα κατά τη λειτουργία σε σχετικά υψηλές συχνότητες, μπορεί να αναπτυχθούν σημαντικές απώλειες δινορρευμάτων στα τυλίγματα του στάτη της μηχανής [10].



**Σχήμα 2.6:** Στάτης χωρίς πυρήνα.

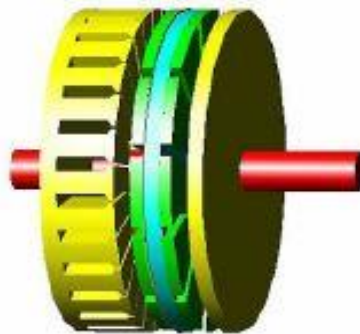
### 2.3.2 Μονός δρομέας – Μονός στάτης

Η πιο απλή περίπτωση μηχανής αξονικής ροής είναι αυτή του μονού δρομέα-μονού στάτη. Η μηχανή αυτή αναλύεται εκτενώς στη βιβλιογραφία [13], [14], [15]. Στο δρομέα τοποθετούνται οι μαγνήτες, οι οποίοι εναλλάσσονται σε πολικότητα ενώ ο στάτης μπορεί να διαθέτει σιδερένιο πυρήνα και αύλακες όπως στο σχήμα:



**Σχήμα 2.7:** Η τοπολογία μονού δρομέα-μονού στάτη.

Στην περίπτωση αυτή, έχουμε ισχυρότερο πεδίο με λιγότερους μαγνήτες αλλά επίσης έχουμε υψηλή ροπή ευθυγράμμισης. Ακόμη ασκείται μεγάλη ελκτική δύναμη μεταξύ του στάτη και του δρομέα που μπορεί να παραμορφώσει τους δίσκους. Απέναντι στο πρόβλημα αυτό έχουν αναπτυχθεί σύμφωνα με το [13] δύο άλλες διατάξεις. Στην πρώτη διάταξη τοποθετείται ένας ακόμα στάτης, όπως στο σχήμα, καθώς και επιπλέον μαγνήτες στην άλλη πλευρά του δρομέα με στόχο να εξισοροποιηθεί η έλξη στάτη-δρομέα. Η δεύτερη διάταξη προκύπτει με την προσθήκη ενός ακόμα δρομέα.



**Σχήμα 2.8:** Μονός δρομέας-μονός στάτης με επιπλέον στάτη για ισορροπία.

### 2.3.3 Διπλός δρομέας – Μονός στάτης

Η συγκεκριμένη τοπολογία έχει μελετηθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία [16], [17], [18]. Όπως παρατηρούμε στο σχήμα 2.8, ο δρομέας είναι διπλός και φέρει τους μαγνήτες και στις δύο πλευρές του. Κάθε μαγνήτης έχει αντίθετη πολικότητα από τον απέναντι και τον διπλανό του. Το τύλιγμα είναι τοποθετημένο σε διαμαγνητικό, μη αγώγιμο στάτη (πιθανώς από ρητίνη) και μπορεί να είναι είτε διανεμημένο είτε συγκεντρωμένο.

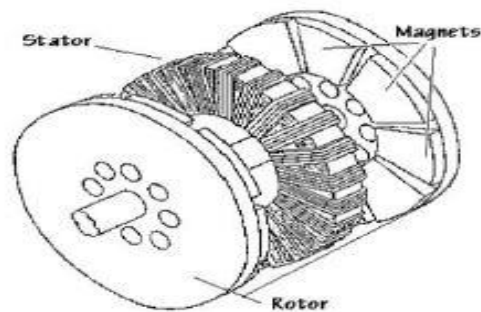


- Μικρή ποσότητα σιδήρου και συνεπώς ελαφριά κατασκευή

### 2.3.5 Συνδεσμολογία Torus

Μια άλλη πρόταση αξονικής γεννήτριας μονίμων μαγνητών είναι η συνδεσμολογία Torus. Η μηχανή αυτή έχει πάρει το όνομά της από τη μορφή των τυλιγμάτων της και μπορεί να πάρει διάφορες μορφές [14] με το δρομέα στο εσωτερικό ή στο εξωτερικό της μηχανής, είτε με αύλακες είτε χωρίς, είτε με πυρήνα είτε χωρίς. Η τοπολογία αυτή μελετάται εκτενώς στην βιβλιογραφία [21], [22], [23].

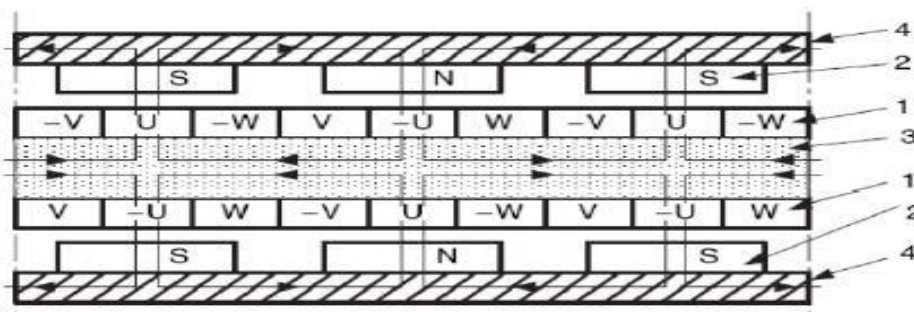
Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η μηχανή:



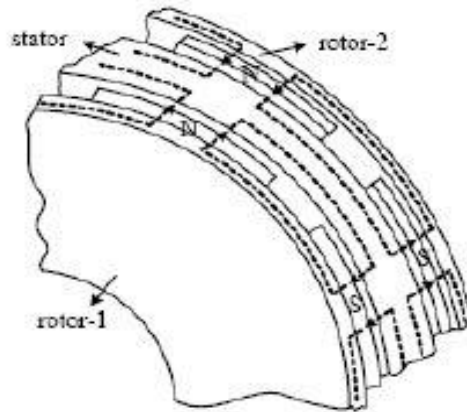
Σχήμα 2.11: Μηχανή διπλού δρομέα-μονού στάτη με τύλιγμα Torus.

Η συγκεκριμένη τοπολογία έχει ως μειονέκτημα την πολυπλοκότητα, λόγω της ύπαρξης του πυρήνα στη διάταξη, ο οποίος όπως έχουμε δει μπορεί να προκαλέσει αρκετές δυσκολίες τόσο στη συναρμολόγηση όσο και στη λειτουργία της μηχανής εξαιτίας των απωλειών υστέρησης και δινορρευμάτων.

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



Σχήμα 2.12: Ευθύγραμμο ανάπτυγμα μηχανής Torus.



**Σχήμα 2.13:** Η ροή σε τρισδιάστατη απεικόνιση.

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

Στη συνέχεια, θα αναφερθούν επιγραμματικά τα γενικά χαρακτηριστικά της μηχανής σε συνδεσμολογία Torus:

- Μεγάλος λόγος ισχύος προς βάρος και ροπής προς βάρος
- Μικρά άκρα τυλιγμάτων και συνεπώς λιγότερες απώλειες χαλκού και καλύτερη απόδοση
- Μικρές τιμές της αυτεπαγωγής μαγνήτισης και σκέδασης της μηχανής λόγω απουσίας των αυλάκων
- Πολύ χαμηλή έως μηδαμινή ροπή ευθυγράμμισης λόγω απουσίας των αυλάκων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω, η απουσία των αυλάκων οδηγεί στη χρήση μεγαλύτερων μαγνητών κι επομένως στην αύξηση του κόστους της μηχανής.

### **2.3.6 Η συνήθης επιλεγμένη τοπολογία: διπλός δρομέας-μονός στάτης χωρίς πυρήνα σιδήρου**

Η γεννήτρια που συνήθως κατασκευάζεται στα πλαίσια αγροτικών εφαρμογών είναι μία σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών αξονικής ροής, διπλού δρομέα-μονού στάτη χωρίς πυρήνα σιδήρου, για λειτουργία χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων.

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

ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ	ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΠΟΥ ΙΚΑΝΟΠΟΙΕΙΤΑΙ
Γεννήτρια μόνιμων μαγνητών	Δεν υπάρχουν ψήκτρες για τη διέγερση	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Απλή κατασκευή</li> <li>• Ελαφριά και συμπαγής κατασκευή [3]</li> <li>• Λιγότερες απώλειες (καλύτερη απόδοση)</li> <li>• Λίγες απαιτήσεις σε συντήρηση</li> </ul>
	Δεν απαιτείται ηλεκτρική παροχή ή μπαταρίες για τη διέγερση της γεννήτριας	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Αυτονομία</li> <li>• Λιγότερες απώλειες (καλύτερη απόδοση)</li> </ul>
Γεννήτρια αξονικής ροής	Δισκοειδής κατασκευή	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Απλή κατασκευή</li> <li>• Συμπαγής κατασκευή [24]</li> </ul>
	Χρήση λιγότερου σιδήρου και λιγότερου μαγνητικού υλικού <sup>1</sup> [24]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Χαμηλό κόστος</li> </ul>
	Εύκολη ψύξη χωρίς εξωτερικό μηχανισμό	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Λίγες απαιτήσεις σε συντήρηση</li> </ul>
Διπλός δρομέας-μονός στάτης χωρίς πυρήνα σιδήρου	Δεν υπάρχουν απώλειες πυρήνα	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Καλή απόδοση</li> </ul>
	Δεν υπάρχουν αύλακες ούτε σιδηροπυρήνας	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Απλή κατασκευή</li> <li>• Ελαφριά κατασκευή</li> </ul>
	Δεν υπάρχει ροπή ευθυγράμμισης ούτε έλξη στάτη-δρομέα	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Εκκίνηση σε χαμηλούς ανέμους</li> <li>• Εύκολη συναρμολόγηση</li> </ul>
Direct-drive ανεμογεννήτρια	Δεν υπάρχει κιβώτιο ταχυτήτων	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Λίγες απαιτήσεις σε συντήρηση</li> <li>• Απλή κατασκευή</li> <li>• Ελαφριά κατασκευή</li> <li>• Χαμηλό κόστος</li> <li>• Λιγότερες απώλειες (καλύτερη απόδοση)</li> </ul>

**Πίνακας 2.1:** Πλεονεκτήματα της τοπολογίας, διπλού στάτη-μονού δρομέα, βάσει συγκεκριμένων κριτηρίων

<sup>1</sup> σε σχέση με τη γεννήτρια ακτινικής ροής

## Συνοπτική επεξήγηση κριτηρίων

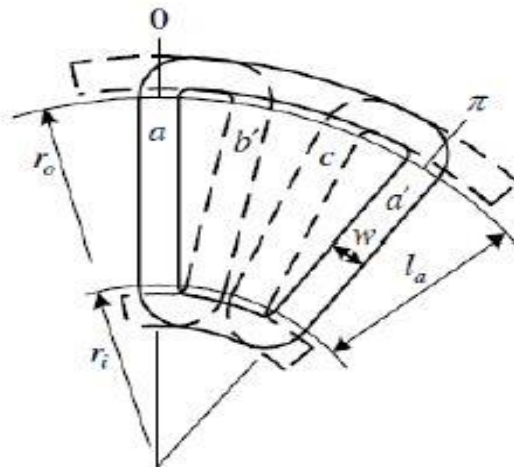
- *Απλή κατασκευή:* Δυνατότητα κατασκευής της ανεμογεννήτριας σε μία απλή βιοτεχνία ή εργαστήριο, χωρίς εξειδικευμένα εργαλεία από ανθρώπους χωρίς ιδιαίτερη προηγούμενη κατασκευαστική εμπειρία.
- *Ελαφριά και συμπαγής κατασκευή – Εύκολη συναρμολόγηση:* Δυνατότητα συναρμολόγησης και ανύψωσης χωρίς εξειδικευμένα μηχανήματα.
- *Χαμηλό κόστος:* Ανεμογεννήτρια οικονομικά προσβάσιμη από ομάδες ανθρώπων με λιγότερες ευκαιρίες.
- *Καλή απόδοση:* Σε εφαρμογές χαμηλού κόστους επιδιώκονται μεγάλες αποδόσεις ώστε να μην έχουμε πολλές απώλειες και άρα η γεννήτρια να δουλεύει όσο το δυνατόν πιο αποδοτικά.
- *Εκμετάλλευση χαμηλών ανέμων:* Εφαρμογές και σε περιοχές όπου οι ταχύτητες ανέμου δεν είναι ιδιαίτερα υψηλές.
- *Αυτονομία:* Σημαντική παράμετρος για εφαρμογές σε απομονωμένες, αγροτικές εγκαταστάσεις, όπου πιθανώς δεν υπάρχει εύκολη πρόσβαση σε υλικά και τεχνικούς.
- *Λίγες απαιτήσεις σε συντήρηση:* Καταλληλότητα για εφαρμογές σε απομονωμένες, αγροτικές εγκαταστάσεις με μειωμένη πρόσβαση σε υλικά και τεχνικούς συντήρησης. Δυνατότητα λειτουργίας από ανθρώπους χωρίς εξειδικευμένες γνώσης.

## **2.4 Τα τυλίγματα**

Στην τοπολογία διπλού δρομέα-μονού στάτη χωρίς πυρήνα, ο πυρήνας κατασκευάζεται ουσιαστικά από κάποιο διαμαγνητικό υλικό (συνήθως ρητίνη) και εκεί τοποθετείται το τύλιγμα. Κάθε πλευρά πηνίου αντιστοιχίζεται στην αντίστοιχη αύλακα ενός πυρήνα σιδήρου.

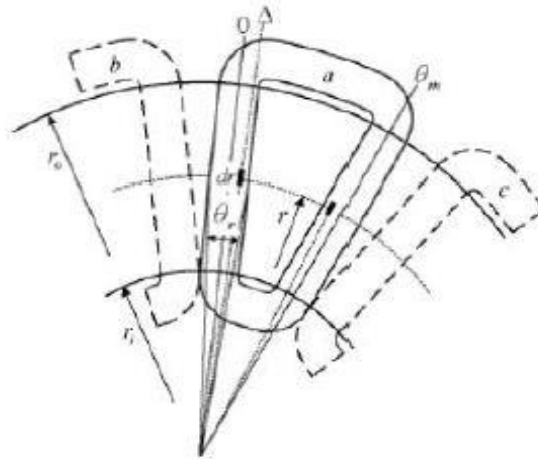
Οι διάφοροι τύποι τυλιγμάτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι οι εξής [18]:

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



**Σχήμα 2.14:** Επικαλυπτόμενο τύλιγμα.

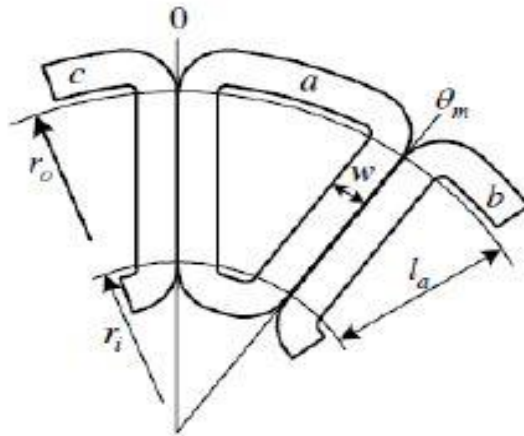
2. Συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα μονής στρώσης: Τα πηνία σε αυτήν την περίπτωση είναι μη επικαλυπτόμενα. Σε κάθε ιδεατή αύλακα έχω μία πλευρά πηνίου ενώ τα πηνία έρχονται σε επαφή μόνο στην εσωτερική ακτίνα του στάτη.



**Σχήμα 2.15:** Συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα μονής στρώσης.

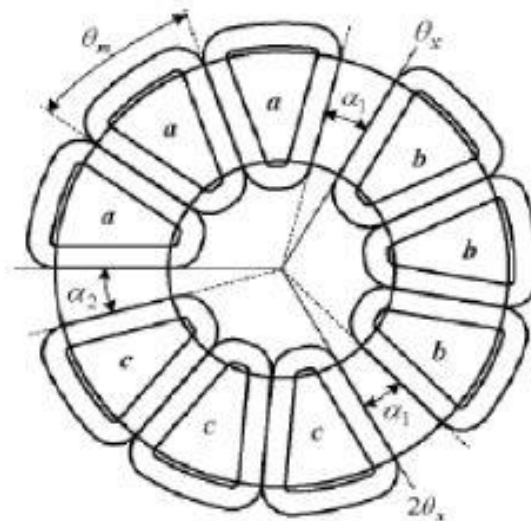
3. Συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα διπλής στρώσης: Όπως και πριν, τα πηνία είναι μη επικαλυπτόμενα. Σε κάθε, όμως, ιδεατή αύλακα συναντάμε δύο πλευρές διαφορετικών πηνίων. Οι δύο πλευρές εφάπτονται μεταξύ τους τόσο στην εσωτερική όσο και στην εξωτερική ακτίνα.





**Σχήμα 2.16:** Συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα διπλής στρώσης.

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



**Σχήμα 2.17:** Συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα χωρισμένο σε ομάδες φάσεων.

Στο συγκεντρωμένο τύλιγμα, τα άκρα τυλίγματος δεν χρειάζεται να λυγίσουν, αντίθετα με ότι συμβαίνει στο επικαλυπτόμενο, με αποτέλεσμα να είναι μικρότερο το συνολικό μήκος των πηνίων. Αυτό προσφέρει και ορισμένα πλεονεκτήματα [9]:

- Μικρότερο συνολικό όγκο χαλκού που χρειάζεται για τα πηνία
- Λιγότερες απώλειες χαλκού (λόγω του μικρότερου όγκου χαλκού)
- Αυξημένη απόδοση

- Χαμηλότερο κόστος (λόγω του μικρότερου αριθμού πηνίων και της απλούστερης δομής του τυλίγματος)
- Ευκολότερη κατασκευή του στάτη

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

Σύμφωνα δε με το [25], όσο αυξάνεται ο αριθμός των πόλων τόσο αυξάνεται και η απόδοση του συγκεντρωμένου τυλίγματος έναντι του επικαλυπτόμενου. Έτσι, η χρήση συγκεντρωμένου τυλίγματος θα λέγαμε ότι επιβάλλεται σε γεννήτριες με μεγάλο αριθμό πόλων.

Στο [25] συγκρίνονται τα διάφορα είδη τυλιγμάτων που αναφέραμε παραπάνω και αποδεικνύεται πως το συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσης αναπτύσσει υψηλότερη ροπή από τα υπόλοιπα. Αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς η πεπλεγμένη ροή είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση αυτή. Επίσης, όπως αναφέραμε και παραπάνω η μάζα του χαλκού που χρησιμοποιείται είναι σημαντικά μικρότερη από ότι με το επικαλυπτόμενο τύλιγμα και τέλος η κυματομορφή της τάσης είναι πιο ημιτονοειδής σε σχέση με αυτή που προκύπτει με χρήση επικαλυπτόμενου τυλίγματος. Πρέπει, όμως, εδώ να σημειώσουμε ότι το τύλιγμα αυτό έχει μεγαλύτερα άκρα σε σχέση με το συγκεντρωμένο μονής στρώσης.

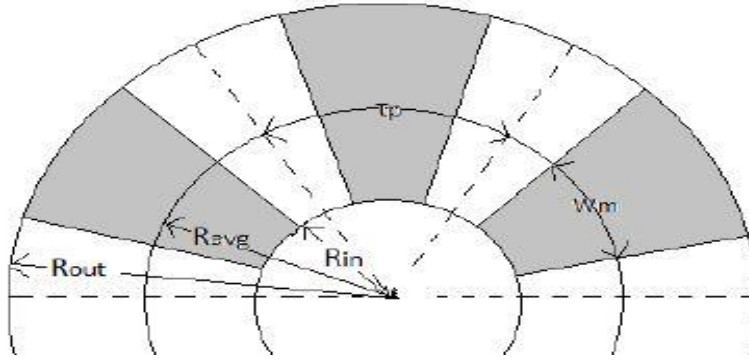
## 2.5 Θεωρητική Ανάλυση

### 2.5.1 Μαγνητική Ροή-ΗΕΔ

Έστω γεννήτρια αξονικής ροής με τραπεζοειδείς μαγνήτες και πηνία. Το πολικό βήμα  $\tau_p$  καθώς και το πλάτος του μαγνήτη  $w_m$  δεν είναι σταθερά αλλά εξαρτώνται από την ακτίνα στην οποία αναφερόμαστε [17]. Για το πολικό βήμα μπορούμε να γράψουμε:

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

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

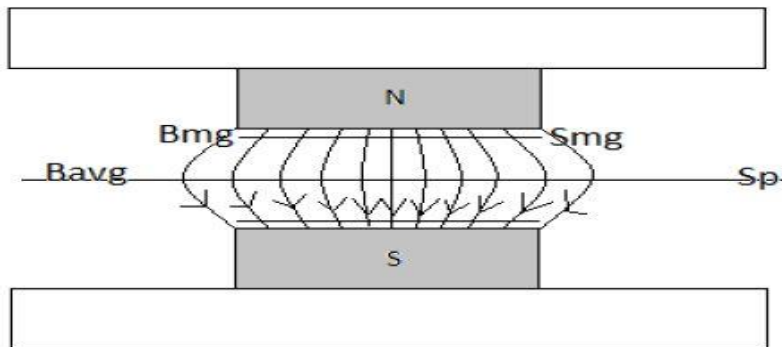


**Σχήμα 2.18:** Τα βασικά γεωμετρικά μεγέθη μιας γεννήτριας αξονικής ροής.

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

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

Ο λόγος αυτός εξαρτάται από την ακτίνα αναφοράς  $r$ . Ας υποθέσουμε τώρα την παρακάτω διάταξη μηχανής αξονικής ροής:



**Σχήμα 2.19:** Πλάγια όψη ενός πολικού βήματος μιας γεννήτριας αξονικής ροής.

Μπορούμε να πούμε παρατηρώντας το σχήμα ότι όλες οι δυναμικές γραμμές διέρχονται από ένα εμβαδόν  $S_{mg}$  πολύ κοντά στην επιφάνεια του μαγνήτη και από ένα άλλο εμβαδόν  $S_p$  στη μέση της γεννήτριας. Μπορούμε, επομένως, να γράψουμε:

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

$$a_i(r) = \frac{w_m(r)}{\tau_p(r)} = \frac{B_{avg}}{B_{mg}} \quad (2.2)$$

όπου,

- $B_{avg}$  η μέση πυκνότητα μαγνητικής ροής στο διάκενο
- $B_{mg}$  η πυκνότητα μαγνητικής ροής στην επιφάνεια του μαγνήτη

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

Έστω τώρα ότι θέλουμε να υπολογίσουμε τη μαγνητική ροή ανά πόλο  $\Phi_f$ :

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

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

Θεωρώντας  $B = B_{avg}$  έχουμε:

$$\Phi_f = \int_{r_{in}}^{r_{out}} a_i B_{mg} \frac{2\pi r}{p} dr = a_i B_{mg} \frac{\pi}{p} (r_{out}^2 - r_{in}^2) \quad (2.3)$$

Η ΗΕΔ μπορεί να υπολογιστεί παραγωγίζοντας τη θεμελιώδη συνιστώσα της κυματομορφής της μαγνητικής ροής [16]:

$$\Phi_{f1} = \Phi_f \sin \omega t \rightarrow$$

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

και η ενεργός τιμή της ΗΕΔ προκύπτει:

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

$$E_f = \frac{\pi \cdot p \cdot n \cdot q \cdot N_c \cdot k_w \cdot \Phi_f}{60 \sqrt{2}} \quad (2.4)$$

όπου,

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

Σύμφωνα με το [17] η ηλεκτρομαγνητική δύναμη  $F_x$  στο δρομέα μπορεί να υπολογιστεί από το γινόμενο της μαγνητικής και ηλεκτρικής φόρτισης  $B_{avg} \cdot A$  και της ενεργούς επιφάνειας των μαγνητών  $S = \pi(r_{out}^2 - r_{in}^2)$ .

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

$$A = \frac{m_1 N_\phi I_\alpha}{\pi r_{in}} \quad (2.5)$$

Έτσι, η μέση ηλεκτρομαγνητική ροπή σύμφωνα με το [8] ισούται με:

$$T_d = F_x r_{in} = 2\pi B_{avg} A (r_{out}^2 - r_{in}^2) r_{in} = 2\pi B_{avg} A r_{out}^3 (k_d - k_d^3) \quad (2.6)$$

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

$$k_d = \frac{r_{in}}{r_{out}} \quad (2.7)$$

Ο λόγος αυτός είναι ένας σημαντικός συντελεστής της σχεδίασης.

Από τη σχέση (2.6) βλέπουμε ότι η ηλεκτρομαγνητική ροπή στις μηχανές αξονικής ροής είναι ανάλογη με την εξωτερική ακτίνα στον κύβο.

## 2.5.2 Ανάλυση του τυλίγματος

### 2.5.2.1 Πυκνότητα ρεύματος

Ένα στοιχείο το οποίο είναι πολύ σημαντικό όσον αφορά το τύλιγμα και επηρεάζει όλη τη δομή και το μέγεθος της γεννήτριας είναι η μέγιστη πυκνότητα ρεύματος που μπορεί να υποστεί το τύλιγμα.

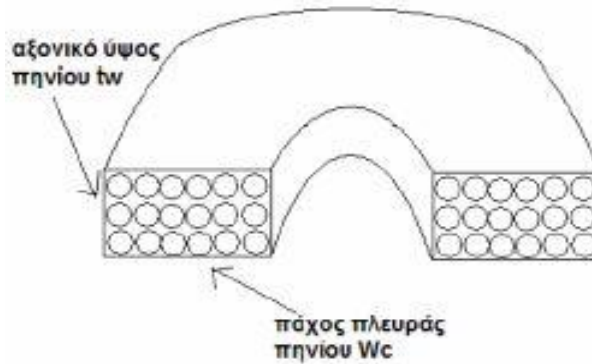
Πιο συγκεκριμένα ισχύει το εξής:

$$J_{max} = \frac{I_{a,max}}{s_c} \quad (2.8)$$

όπου,

- $I_{a,max}$ , το μέγιστο ρεύμα της γεννήτριας
- $s_c$ , το εμβαδόν διατομής μιας σπείρας ενός πηνίου

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



**Σχήμα 2.20:** Το αξονικό ύψος, το πάχος πλευράς και τα ελίγματα ενός πηνίου.

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

$$k_f = \frac{S_{copper}}{w_c \cdot t_w} = \frac{N_c \cdot s_c}{w_c \cdot t_w} \quad (2.9)$$

όπου  $N_c$  ο αριθμός των ελιγμάτων του πηνίου,  $w_c$  το πάχος του πηνίου και το  $t_w$  το αξονικό ύψος του πηνίου, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.20.

Το εμβαδόν διατομής μιας σπείρας μπορεί να εκφραστεί:

$$s_c = \frac{k_f \cdot w_c \cdot t_w}{N_c} \quad (2.10)$$

Άρα, η πυκνότητα ρεύματος γράφεται:

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

### 2.5.2.2 Αντίσταση και αυτεπαγωγή τυλίγματος

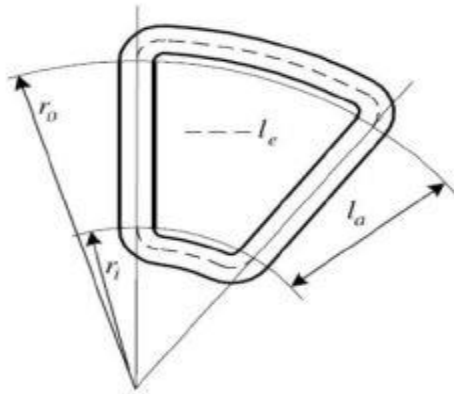
Στη συνέχεια, θα υπολογίσουμε την τιμή της αντίστασης και της αυτεπαγωγής του τυλίγματος, καθώς και τη συνολική μάζα του χαλκού. Αυτό θα βοηθήσει στην εκτίμηση τόσο του κόστους όσο και του βάρους της γεννήτριας. Ιδιαίτερα η αντίσταση του τυλίγματος και κατ' επέκταση οι απώλειες που προκαλεί είναι σημαντικοί παράγοντες για την βελτιστοποίηση της γεννήτριας.

Για το συγκεντρωμένο τύλιγμα, το μέσο μήκος ελίγματος  $l_{avg}$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$l_{avg} = 2l_a + l_{ec} \quad (2.11)$$

όπου,

- $l_a = R_{out} + R_{in}$  το ενεργό μήκος της γεννήτριας
- $l_{ec} = 2(R_{out} + R_{in}) \frac{\theta_m^{-0.6} \theta_{re}}{p}$  τα άκρα του τυλίγματος
- $\theta_m = \frac{\pi p}{Q}$  η ηλεκτρική γωνία βήματος πηνίου (Q ο συνολικός αριθμός πηνίων της γεννήτριας)
- $\theta_{re}$  η ηλεκτρική γωνία πάχους πλευράς πηνίου, της οποίας χρησιμοποιούμε τη μέγιστη τιμή [16]  $\theta_{re} = \frac{k_d}{1+k_d} \theta_m$



**Σχήμα 2.21:** Κάτοψη του πηνίου όπου φαίνονται και τα άκρα τυλίγματος.

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

$$R_c = N_c \rho_t \frac{l_{avg}}{s_c} = N_c \rho_t \frac{(2l_a + l_{ec})}{s_c} \quad (2.12)$$

όπου  $s_c$  η διατομή του αγωγού χαλκού και  $\rho_t$  η ειδική αντίσταση του χαλκού και δίνεται από την κάτωθι σχέση:

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

όπου,  $\rho_{20} = 1.68 \cdot 10^{-8}$  και  $t_c$  η θερμοκρασία στην οποία λειτουργεί η γεννήτρια.

Η αυτεπαγωγή μιας φάσης του τυλίγματος  $L_s$  έχει υπολογιστεί στο [7] και είναι:

$$L_s = \frac{q \cdot l_{avg}^2 \cdot N_c^2}{t_w} 10^{-7} \cdot K_n \quad (2.13)$$

όπου  $K_n$  η σταθερά του Nagaoka:

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

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

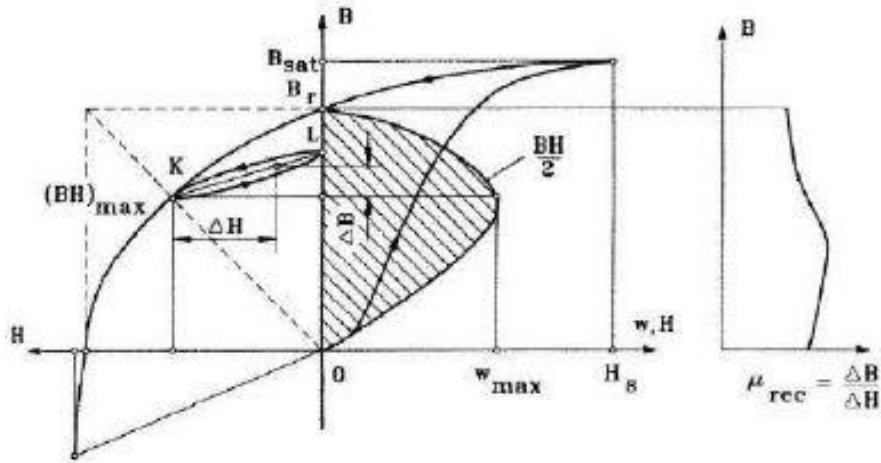
### 2.5.3 Το μαγνητικό κύκλωμα

Πολύ σημαντική είναι η ανάλυση του μαγνητικού κυκλώματος της γεννήτριας κι επομένως παρακάτω θα παρουσιαστούν τα χαρακτηριστικά ενός μόνιμου μαγνήτη.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι μόνιμοι μαγνήτες δημιουργούν μαγνητική ροή χωρίς την παρουσία τυλίγματος διέγερσης και την κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος. Όπως όλα τα σιδηρομαγνητικά υλικά, περιγράφονται από τον βρόχο υστέρησης B-H και επιπλέον μπορούν να χαρακτηριστούν και ως σκληρομαγνητικά, όπως όλα τα σιδηρομαγνητικά υλικά με ευρύ βρόχο υστέρησης.

Συγκεκριμένα, η βάση για την εκτίμηση των ιδιοτήτων του μαγνήτη είναι το τμήμα του βρόχου υστέρησης που διακρίνεται στο αριστερό πάνω τεταρτημόριο στο σχήμα 2.22 και ονομάζεται καμπύλη απομαγνήτισης [10]. Ας μεταφράσουμε αυτό το διάγραμμα με ένα παράδειγμα. Αν σε ένα τοροειδές δείγμα, το οποίο έχει προηγουμένως μαγνητισθεί, εφαρμόσουμε ανάστροφη ένταση μαγνητικού πεδίου, το πλάτος της πυκνότητας μαγνητικής ροής θα πέσει στο επίπεδο που ορίζεται από το σημείο K. Όταν η ανάστροφη πυκνότητα μαγνητικού πεδίου απομακρυνθεί, η πυκνότητα ροής θα επιστρέψει στο σημείο L σύμφωνα με τον μικρό βρόχο υστέρησης. Από την εφαρμογή δηλαδή του ανάστροφου πεδίου, μειώθηκε η παραμένουσα μαγνήτιση. Εφαρμόζοντας πάλι την ένταση μαγνητικού πεδίου, η πυκνότητα ροής θα μειωθεί πάλι επιστρέφοντας στο σημείο K και ολοκληρώνοντας έτσι αυτό το μικρό βρόχο. Αυτός ο βρόχος υστέρησης μπορεί να αντικατασταθεί με μικρό σφάλμα από μία γραμμή από της οποίας την κλίση μπορούμε να βρούμε την μαγνητική διαπερατότητα  $\mu_{rec}$ . Όσο η αρνητική τιμή της εφαρμοζόμενης έντασης μαγνητικού πεδίου δεν ξεπερνάει την τιμή που εκφράζεται από το σημείο K η μαγνήτιση μπορεί να θεωρηθεί μόνιμη. Αν όμως εφαρμοσθεί ακόμα μεγαλύτερη αρνητική ένταση μαγνητικού πεδίου H, η πυκνότητα μαγνητικής ροής θα μειωθεί περισσότερο ξεπερνώντας το σημείο K και με την αφαίρεση του πεδίου H θα έχουμε μια νέα χαμηλότερη μαγνητική διαπερατότητα.





**Σχήμα 2.22:** Καμπύλη απομαγνήτισης, ενέργεια ενός μόνιμου μαγνήτη και μαγνητική διαπερατότητα.

Η παραμένουσα πυκνότητα μαγνητικής ροής  $B_r$  που διακρίνεται στο σχήμα, είναι η πυκνότητα μαγνητικής ροής που αντιστοιχεί στη μηδενική ένταση μαγνητικού πεδίου.

Η ένταση πεδίου  $H_c$ , είναι η τιμή της έντασης του πεδίου απομαγνήτισης που χρειάζεται ώστε να μηδενιστεί η πυκνότητα μαγνητικής ροής σε ένα υλικό που προηγουμένως έχει μαγνητιστεί.

Οι δύο αυτές μεταβλητές,  $B_r$  και  $H_c$ , μειώνονται με αύξηση της θερμοκρασίας και η μείωση αυτή εκφράζεται από τους παρακάτω τύπους [9]:

$$B_r = B_{r20} \left[ 1 + \frac{a_B}{100} (\theta_{PM} - 20) \right]$$

$$H_c = H_{c20} \left[ 1 + \frac{a_H}{100} (\theta_{PM} - 20) \right]$$

Όπου  $\theta_{PM}$  είναι η θερμοκρασία του μαγνήτη,  $B_{r20}$  και  $H_{c20}$  είναι η παραμένουσα πυκνότητα μαγνητικής ροής και η ένταση αντίστοιχα στους  $20^\circ\text{C}$ , και  $a_B < 0$  και  $a_H < 0$  είναι θερμοκρασιακοί συντελεστές με μονάδες μέτρησης  $\% / ^\circ\text{C}$ .

Αντιλαμβανόμαστε, λοιπόν, ότι η καμπύλη απομαγνήτισης εξαρτάται από την θερμοκρασία.

Η πυκνότητα μαγνητικής ροής κορεσμού  $B$ , αναφέρεται σε μεγάλες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου όπου περαιτέρω αύξηση αυτού δεν έχει πλέον επίδραση στην πυκνότητα μαγνητικής ροής. Στην περιοχή του κορεσμού η ευθυγράμμιση του πεδίου είναι στην ίδια διεύθυνση με το εξωτερικά εφαρμοζόμενο πεδίο.

Η μαγνητική διαπερατότητα  $\mu_{rec}$ , είναι ο λόγος της πυκνότητας μαγνητικής ροής προς την ένταση του μαγνητικού πεδίου σε κάθε σημείο της καμπύλης απομαγνήτισης:

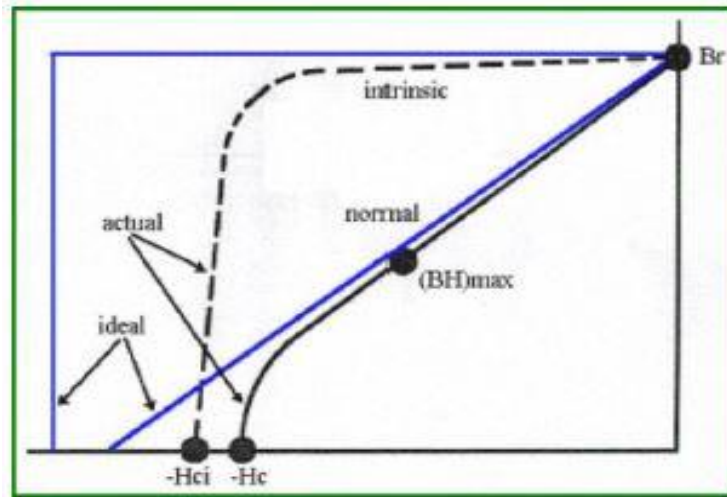
$$\mu_{rec} = \mu_0 \mu_{rrec} = \frac{\Delta B}{\Delta H}$$

Όπου η σχετική μαγνητική διαπερατότητα παίρνει τιμές  $\mu_{rrec}=1...4.5$

Η μέγιστη μαγνητική ενέργεια ανά μονάδα που παράγεται από ένα μόνιμο μαγνήτη σε έναν εξωτερικό χώρο είναι ίση με τη μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ενέργειας ανά όγκο:

$$w_{max} = \frac{(BH)_{max}}{2} \quad (J/m^3)$$

Όπου το γινόμενο  $(BH)_{max}$  αναφέρεται στο σημείο μέγιστης πυκνότητας μαγνητικής ενέργειας στην καμπύλη απομαγνήτισης με συντεταγμένες  $B_{max}$  και  $H_{max}$ .



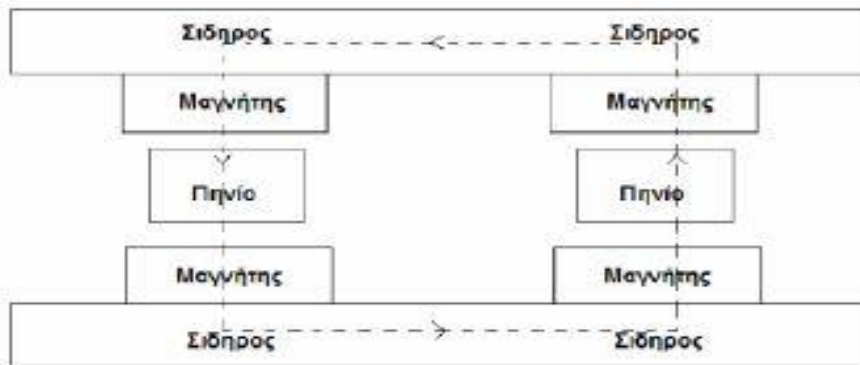
**Σχήμα 2.22:** Γενική μορφή της καμπύλης απομαγνήτισης.

Ένας μόνιμος μαγνήτης χαρακτηρίζεται σχεδόν πλήρως από την καμπύλη απομαγνήτισης του, που παρουσιάζεται παραπάνω. Στην καμπύλη αυτή μας ενδιαφέρει το μέγεθος της παραμένουσας μαγνήτισης  $B_r$  (Tesla) περισσότερο, καθώς και η συνεχούσα δύναμη  $H_c$  (kA/m). Ο μαγνήτης πρέπει να λειτουργεί στο σημείο εκείνο που θα μπορεί να αποδώσει τη μέγιστη ενέργεια  $(BH)_{max}$ . Το σημείο αυτό είναι στο γόνατο της καμπύλης απομαγνήτισης και επομένως μπορούμε να υποθέσουμε για την πυκνότητα μαγνητικής στην επιφάνεια των μαγνητών:

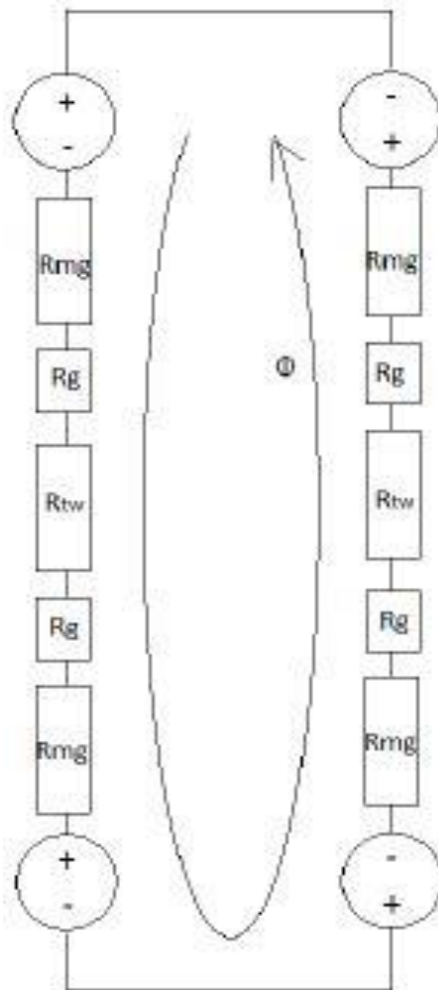
$$B_{mg} = \frac{B_r}{2} \quad (2.14)$$

Κάθε μαγνήτης έχει δικές του χαρακτηριστικές ανάλογα με το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένος και από το βαθμό του μαγνήτη, δηλαδή το πόσο ισχυρό είναι το μαγνητικό του πεδίο.

Μία πλάγια όψη της γεννήτριας καθώς και το αντίστοιχο κύκλωμα που προκύπτει από αυτή παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 2.23:** Η πλάγια όψη της γεννήτριας που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή του κυκλώματος.



**Σχήμα 2.24:** Το μαγνητικό κύκλωμα της γεννήτριας.

Η ανάλυση του μαγνητικού κυκλώματος έχει γίνει στο [10] από όπου προκύπτει η σχέση:

$$B_{mg} = \frac{B_r}{1 + \mu_{rrec} \frac{(g + 0.5t_w)}{h_m} k_{sat}} \quad (2.15)$$

όπου,

- $\mu_{rrec}$  η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του μαγνήτη ίση με  $\mu_{rrec} = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_r}{H_c}$  και  $\mu_0$  η μαγνητική διαπερατότητα του κενού ίση με  $4\pi \cdot 10^{-7}$
- $k_{sat}=1$  όταν δεν υπάρχει πυρήνας κι επόμενες κορεσμός
- $h_m$  το πάχος του μαγνήτη (αξονικό ύψος)
- $g$  το αξονικό ύψος του διακένου

Η ανάλυση αυτή υποθέτει ότι το πεδίο  $B_{mg}$  στην επιφάνεια του μαγνήτη διατηρείται σε όλο το αξονικό ύψος της γεννήτριας, υπόθεση που βασίζεται στην ύπαρξη πυρήνα στη γεννήτρια. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει πυρήνας, θα πρέπει να θεωρήσουμε ότι το πεδίο εξασθενεί στο μέσο τουλάχιστον της γεννήτριας. Έτσι, μία πιο καλή προσέγγιση θα μπορούσε να γίνει θεωρώντας ότι στα διάκενα της γεννήτριας έχουμε πεδίο  $B_{mg}$  ενώ στην περιοχή των πηνίων (ύψος  $t_w$ ) έχουμε  $B_{max}$ , τη μέγιστη δηλαδή τιμή της κυματομορφής του  $B$  όπου αναφερόμαστε στο σημείο που βρίσκεται στο μέσο της γεννήτριας.

Για το μαγνητικό κύκλωμα θεωρούμε τους μαγνήτες πηγές τάσης με τιμή τάσης ίση με:

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

Επίσης θεωρούμε τη μαγνητική ροή  $\Phi$  ρεύμα με μέτρο:

$$I = B \cdot S$$

Και τα υλικά στα οποία ταξιδεύει η μαγνητική ροή (αέρας και μαγνήτης) αντιστάσεις:

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

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

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

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

$$t_w = \frac{2}{B_{max}} \left[ \frac{h_m}{\mu_{rrec}} (B_r - B_{mg}) - B_{mg}g \right] \quad (2.16)$$

#### 2.5.4 Μελέτη απωλειών και ισοδύναμο κύκλωμα

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

##### 2.5.4.1 Μελέτη απωλειών

###### ➤ Απώλειες στο στάτη

- **Απώλειες χαλκού:** Οι απώλειες χαλκού αποτελούν τη μεγαλύτερη συνιστώσα απωλειών και πρόκειται για τις ωμικές απώλειες των τυλιγμάτων του στάτη:

$$P_{cu} = 3I_{ac}^2 R_{phase} \quad (2.17)$$

Στην παρούσα εργασία το επιδερμικό φαινόμενο έχει αγνοηθεί. Στο [10] υπολογίζονται οι απώλειες χαλκού συμπεριλαμβανομένου και του επιδερμικού φαινομένου.

- **Απώλειες δινορρευμάτων:** Συνήθως οι απώλειες δινορρευμάτων εμφανίζονται στον πυρήνα της γεννήτριας. Η ανυπαρξία πυρήνα εξαλείφει τις απώλειες αυτές. Απώλειες δινορρευμάτων εξακολουθούν, όμως, να υπάρχουν στο τύλιγμα σε τέτοιο βαθμό που κρίνεται σκόπιμο να υπολογιστούν [9].

Προκαλούνται από τα εναλλασσόμενα μαγνητικά πεδία στο τύλιγμα, τα οποία δημιουργούνται όταν οι μόνιμοι μαγνήτες περνούν πάνω από τους αγωγούς του τυλίγματος. Σε περίπτωση που η μηχανή λειτουργεί σε σχετικά υψηλές συχνότητες, τα παραγόμενα δινορρεύματα προκαλούν σημαντικές απώλειες στη μηχανή. Οι απώλειες αυτές οδηγούν σε αύξηση της θερμοκρασίας του τυλίγματος και σε μείωση της απόδοσης της μηχανής.

Το επιδερμικό φαινόμενο, που εμφανίζεται σαν αποτέλεσμα των απωλειών αυτών, μπορεί να περιοριστεί με χρήση πολύκλωνων αγωγών στο τύλιγμα [9].

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

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

$$P_{eddy} = \frac{\pi I_a s c^4 B_p^2 \omega_e^2 Q N_c N_p}{32 \rho_{cu}} \quad (2.18)$$

όπου,

- $N_p=1$ , ο αριθμός των παράλληλων κλώνων ανά αγωγό
- $\omega_c$ , η ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα
- $\rho_{cu}$ , η ειδική αντίσταση του χαλκού

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

#### ➤ Απώλειες στο δρομέα

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

#### ➤ Απώλειες περιστροφής

Οι απώλειες περιστροφής ή μηχανικές απώλειες αποτελούνται από δύο συνιστώσες: τις απώλειες τριβών στα ρουλεμάν και τις απώλειες ανεμισμού. Οι τελευταίες είναι πολύ μικρές και αγνοούνται. Για τις απώλειες τριβών σε μικρές μηχανές δίνεται ο τύπος [10]:

$$P_{rot} = 0.06 k_{fb} (m_r + m_{sh}) n \quad (2.19)$$

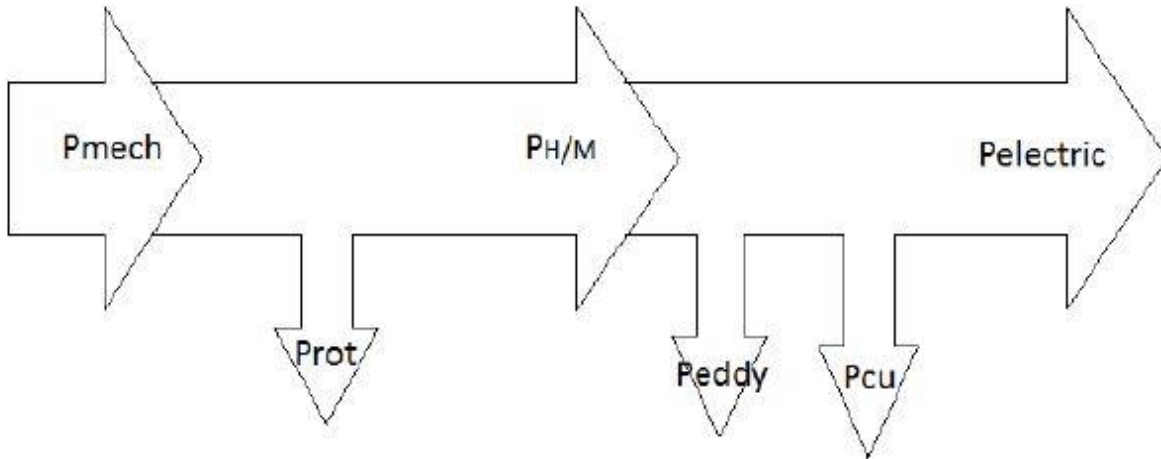
όπου,

- $k_{fb}$ , ο συντελεστής τριβών με τιμές 1-3  $m^2/s^2$
- $m_r$ , η μάζα του δρομέα
- $m_{sh}$ , η μάζα του άξονα

- ο οι στροφές της γεννήτριας

### 2.5.4.2 Ισοζύγιο Ενέργειας-Ισοδύναμο Κύκλωμα

Με βάση την παραπάνω ανάλυση σχηματίζουμε το ισοζύγιο ενέργειας:



**Σχήμα 2.25:** Το ισοζύγιο ενέργειας της γεννήτριας αξονικής ροής μονίμων μαγνητών χωρίς πυρήνα.

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

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

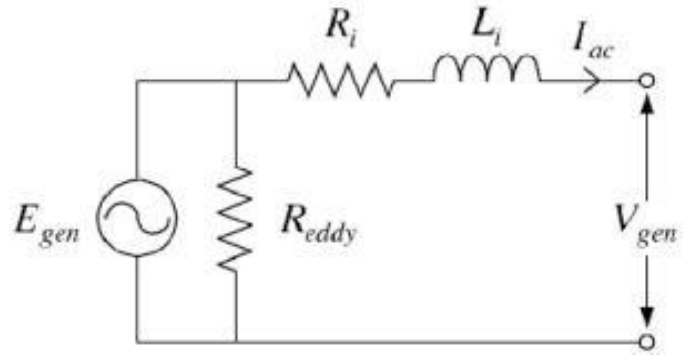
Στη συνέχεια, αφαιρώντας τις απώλειες του τυλίγματος (δινορρευμάτων και ωμικές) προκύπτει η ηλεκτρική ισχύς (ισχύς εξόδου):

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

Οι παραπάνω απώλειες παρουσιάζονται και στο παρακάτω ισοδύναμο κύκλωμα, όπου η  $R_{eddy}$  έχει τοποθετηθεί παράλληλα με την αντί-ΗΕΔ, για να παρουσιάσει τις απώλειες δινορρευμάτων και δεν είναι για μία πραγματική αντίσταση. Η τιμή της δίνεται από τον τύπο:

$$R_{eddy} = \frac{3E_{gen}^2}{P_{eddy}}$$

όπου η  $E_{gen}$  είναι η RMS τιμή της αντί-ΗΕΔ.



**Σχήμα 2.26:** Το ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας.

Στη συνέχεια, η απόδοση υπολογίζεται από τον τύπο:

$$n = \frac{P_{\eta\lambda}}{P_{\eta\lambda} + P_{cu} + P_{eddy} + P_{rot}} \quad (2.20)$$



## **Κεφάλαιο 3: Σύνδεση ανεμογεννητριών**

Στο Κεφάλαιο αυτό, θα εξεταστούν οι δύο τρόποι σύνδεσης μιας ανεμογεννήτριας οι οποίοι είναι η AC και η DC σύνδεση. Πιο συγκεκριμένα θα γίνει αναφορά στις συνδέσεις αυτές και θα μελετηθούν τα τμήματα από τα οποία αποτελούνται.

### **3.1 Μικροδίκτυα**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το συγκεντρωτικό μοντέλο παραγωγής ενέργειας, το οποίο είναι επιφορτισμένο με τη διανομή ενέργειας σε μεγάλες, συνήθως, αποστάσεις κα αποτελείται από συμβατικές μορφές καυσίμων, παρουσιάζει αρκετά προβλήματα κάποια από τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω [26]:

- Οι μεγάλες αποστάσεις διανομής έχουν ως φυσικό επακόλουθο μεγάλες απώλειες κατά τη μεταφορά, αλλά και αυξημένο κόστος για τη δημιουργία ενός τόσο μεγάλου δικτύου.
- Περιβαλλοντικά προβλήματα λόγω καύσης ορυκτών καυσίμων τα οποία ούτε ανεξάντλητα είναι αλλά ούτε και ιδιαίτερα φιλικά προς το περιβάλλον.
- Κοινωνικά προβλήματα, καθώς η απαγόρευση των διεσπαρμένων κοινοτήτων να επηρεάζουν τόσο τον τρόπο αλλά και το κόστος της ενέργειας που παράγουν – καταναλώνουν έχει ως αποτέλεσμα πρώτον τη μη ορθολογική παραγωγή και κατανάλωση αλλά και τη μη διάχυση της γνώσης, των εργαλείων και των μεθόδων που είναι ουσιώδη για την επιβίωση και την πρόοδο των κοινωνιών.

Μία λύση, τουλάχιστον σε τεχνικό επίπεδο, των άνωθι προβλημάτων είναι η ανάπτυξη και η οργάνωση της παραγωγής σε μικροδίκτυα, τα οποία οδηγούν σε διεσπαρμένη παραγωγή δηλαδή σε μοντέλο παραγωγής που αποτελείται από μικρούς σταθμούς κοντά στα φορτία. Τα μικροδίκτυα αποτελούνται, συνήθως, από ένα συνδυασμό συμβατικών και ανανεώσιμων πηγών, κάτι που σε πρώτο επίπεδο τα κάνει εξαιρετικά φιλικά προς το περιβάλλον. Οι μέθοδοι και οι πηγές ενέργειας επιλέγονται με βάση τα χαρακτηριστικά κάθε περιοχής και αξιοποιούνται όλες οι δυνατότητες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας.

Έτσι, τα μικροδίκτυα μπορεί να περιλαμβάνουν ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά, μικρά υδροηλεκτρικά, κυψέλες καυσίμου, γεννήτριες Diesel και άλλα. Ακόμα, περιλαμβάνουν μονάδες αποθήκευσης όπως συσσωρευτές και σφονδύλους και μπορούν να λειτουργήσουν είτε αυτόνομα είτε σε επικοινωνία με το κεντρικό δίκτυο. Στην πρώτη περίπτωση πρέπει να ελέγχονται συνεχώς τα επίπεδα τάσης και συχνότητας όπως επίσης και η ισχύς. Στην δεύτερη περίπτωση το κεντρικό δίκτυο καθορίζει τα παραπάνω επίπεδα ανάλογα με τις ενεργειακές ανάγκες.

### 3.1.1 Διάταξη Μικροδικτύου

Μία τυπική διάταξη μικροδικτύου περιλαμβάνει φορτία και μικροπηγές που συνδέονται μέσω ενός Low Voltage δικτύου, για τάσεις μικρότερες του 1kV. Τα φορτία καθώς και οι πηγές τοποθετούνται κοντά μεταξύ τους για να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες κατά τη διανομή. Στο σχήμα 3.1 φαίνεται μια τυπική διάταξη μικροδικτύου που αποτελείται από 3 κλάδους A,B και C οι οποίοι ονομάζονται feeders και αξιοποιούνται για την τροφοδοσία. Περιλαμβάνει ακόμα δύο μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (CPH) και δύο μονάδες όπου δεν γίνεται συμπαραγωγή (non-CPH). Οι μικροπηγές καθώς και τα μέσα αποθήκευσης συνδέονται στους κλάδους A και C μέσω ελεγκτών (microsource controllers – MC). Από τα φορτία κάποια θεωρούνται ότι απαιτούν συνεχή τροφοδοσία και επομένως έχουν προτεραιότητα ενώ κάποια όχι.

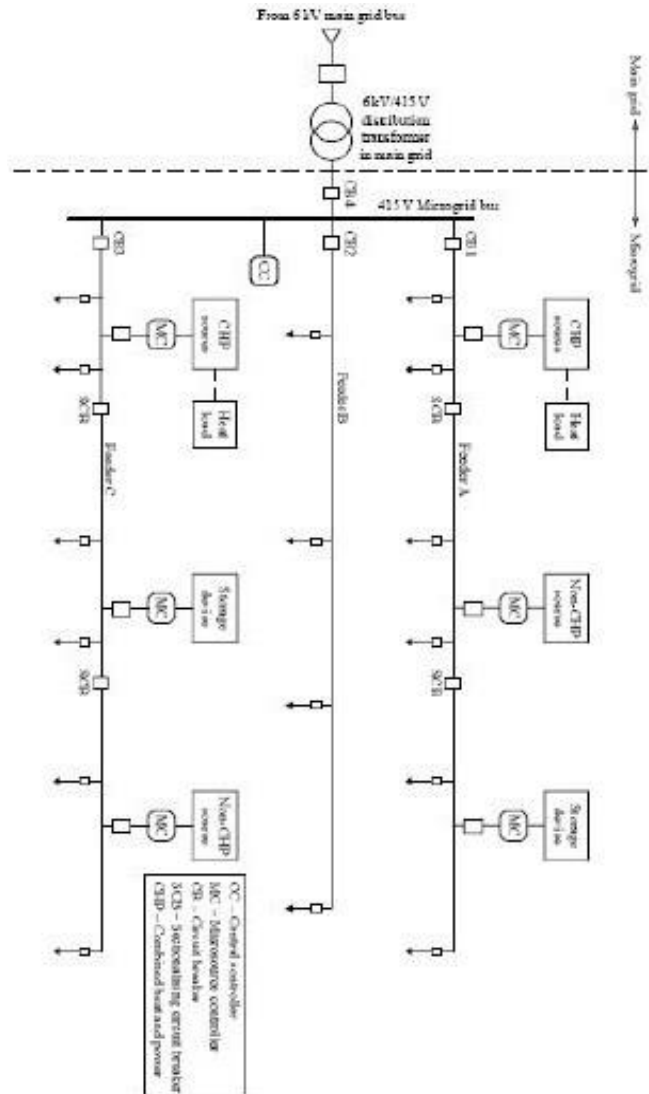
Μέσω διακοπών, και πιο συγκεκριμένα μέσω του διακόπτη CB4, το μικροδίκτυο συνδέεται με το δίκτυο μέσης τάσης στο σημείο κοινής ζεύξης (point of common coupling-PCC). Οι εν λόγω διακόπτες υπάρχουν με σκοπό να ελέγχουν την επικοινωνία του μικροδικτύου με το κεντρικό δίκτυο. Επίσης, οι πηγές δεν είναι συνδεδεμένες στο ζυγό του μικροδικτύου αλλά είναι απομακρυσμένες με σκοπό να μειωθούν οι θερμικές απώλειες, να βελτιωθεί η ποιότητα της τάσης και να εξασφαλιστεί ο βέλτιστος τρόπος αποβολής της θερμότητας.

Μπορούμε να διακρίνουμε δύο διακριτούς τρόπους λειτουργίας του μικροδικτύου:

- λειτουργία σε σύνδεση με το δίκτυο (grid-connected)
- απομονωμένη λειτουργία (stand-alone).

Στον πρώτο τρόπο λειτουργίας, το μικροδίκτυο παραμένει ολικώς ή μερικώς συνδεδεμένο με το κεντρικό δίκτυο και ανταλλάσσει ενέργεια με αυτό. Αν υπάρξει κάποιο πρόβλημα με το κεντρικό δίκτυο τότε αλλάζει τη λειτουργία του σε απομονωμένη και συνεχίζει να τροφοδοτεί τα φορτία προτεραιότητας. Αυτό επιτυγχάνεται με αποτελεσματική διαχείριση των διακοπών CB1-CB4.

Η λειτουργία και η διαχείριση του μικροδικτύου γίνεται μέσω των ελεγκτών μικροπηγών MC's καθώς και του κεντρικού ελεγκτή (Central Controller – CC) που περιγράφονται στο παρακάτω διάγραμμα:



**Σχήμα 3.1:** Η διάταξη ενός τυπικού μικροδικτύου.

- *Ελεγκτής Μικροπηγών (Microsource Controller-MMC):* Κεντρική του λειτουργία είναι ο αυτόνομος έλεγχος της ροής ισχύος, δηλαδή χωρίς τη διαμεσολάβηση του CC, καθώς και της τάσης εξόδου των πηγών σε περιπτώσεις προβλήματος ή μεταβολής φορτίου στο μικροδίκτυο. Επίσης, συμμετέχει στον οικονομικότερο προγραμματισμό της παραγωγής, στον έλεγχο των φορτίων και των μέσων αποθήκευσης. Τέλος, εξασφαλίζει ότι κάθε πηγή θα παράγει την ισχύ εκείνη που απαιτείται στην περίπτωση απομονωμένης λειτουργίας και ότι άμεσα θα επανέρχεται σε λειτουργία σύνδεσης στο δίκτυο όταν απαιτείται.
- *Κεντρικός ελεγκτής (Central Controller-CC) :* Είναι υπεύθυνος για το συνολικό έλεγχο και την προστασία του μικροδικτύου. Κάποιοι από τους στόχους του είναι η διατήρηση των επιπέδων της τάσης και της συχνότητας στα επιθυμητά επίπεδα μέσω ελέγχου ισχύος – συχνότητας

(Power–Frequency, P–f) και τάσης και η βέλτιστη ενεργειακή απόδοση του μικροδικτύου. Επιπλέον, είναι υπεύθυνος για την προστασία μέσω του συντονισμού των MC's και ορίζει τα σημεία λειτουργίας τους. Οι δύο βασικές λειτουργίες που εκτελεί είναι οι εξής:

#### 1. Ενεργειακός έλεγχος (Energy Management Module-EMM)

Καθορίζονται τα σημεία λειτουργίας κάθε MC όσον αφορά την ενεργό και άεργο ισχύ, την τάση και τη συχνότητα, τα οποία με τη σειρά τους καθορίζονται από τις λειτουργικές ανάγκες του μικροδικτύου. Ο ενεργειακός αυτός έλεγχος οφείλει να εξασφαλίζει ότι:

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

#### 2. Συντονισμός Προστασίας (Protection Co-ordination Module-PCM)

Η εν λόγω λειτουργία έχει ως σκοπό τη διασφάλιση της αντίδρασης σε βλάβες του δικτύου ή στην απώλεια αυτού, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η προστασία του μικροδικτύου. Επίσης, σχετίζεται με την προσαρμογή στα επίπεδα ρεύματος που προκύπτουν από την αλλαγή της λειτουργίας από συνδεδεμένη σε αυτόνομη. Κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί μέσω κατάλληλης επικοινωνίας PCM και MC's. Έτσι, σε περίπτωση βλάβης στο κεντρικό δίκτυο το PCM οδηγεί το μικροδίκτυο σε απομονωμένη λειτουργία με σκοπό να εξασφαλιστεί η τροφοδοσία των φορτίων προτεραιότητας με χαμηλό κόστος. Για κάποια μικρά σφάλματα το PCM επιτρέπει στο μικροδίκτυο να παραμείνει συνδεδεμένο μέχρι να διορθωθούν τα σφάλματα. Αν το σφάλμα συμβεί σε κάποιο κλάδο, τότε απομονώνεται το μικρότερο δυνατό κομμάτι του κλάδου έτσι ώστε να διασφαλιστεί η λειτουργία στα υγιή κομμάτια.

Συνοψίζοντας, λοιπόν, οι λειτουργίες του κεντρικού ελεγκτή για σύνδεση στο δίκτυο περιλαμβάνουν μεταξύ των άλλων:

- Επίβλεψη της ευεξίας του συστήματος συγκεντρώνοντας και αξιοποιώντας πληροφορίες από τις μικροπηγές και τα φορτία.
- Εκτέλεση εκτίμησης της κατάστασης καθώς και του επιπέδου ασφαλείας, οικονομικός προγραμματισμός της παραγωγής και έλεγχος ενεργού και άεργου ισχύος των μικροπηγών. Τέλος, εξάγει συναρτήσεις για τη ζήτηση των φορτίων αξιοποιώντας τις πληροφορίες που έχει συλλέξει.
- Διασφάλιση της συγχρονισμένης με το κεντρικό δίκτυο λειτουργίας.

Επιπρόσθετα, οι λειτουργίες του κεντρικού ελεγκτή για απομονωμένη λειτουργία είναι:

- Έλεγχος ενεργού και άεργου ισχύος των μικροπηγών προκειμένου να εξασφαλιστεί σταθερή τάση και συχνότητα στα φορτία.
- Υιοθέτηση στρατηγικών διακοπής φορτίων και διαχείρισης τους.

### 3.2 Τρόποι σύνδεσης ανεμογεννητριών

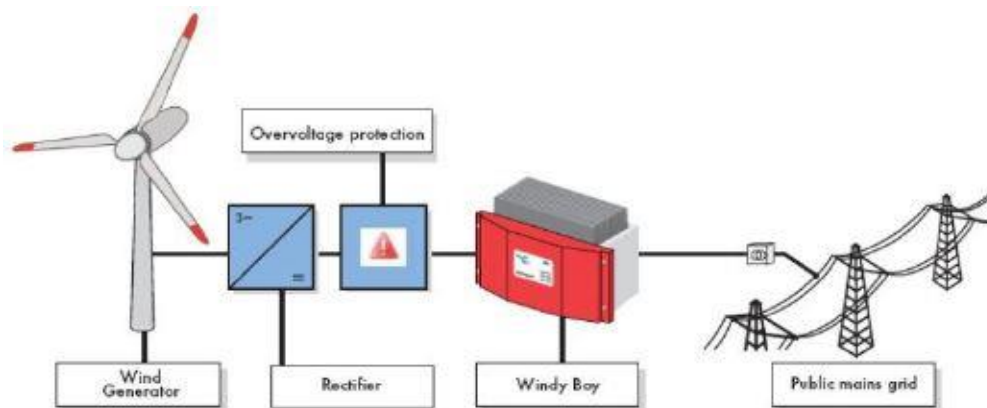
Οι πιο συχνά εμφανιζόμενες πηγές σε ένα μικροδίκτυο είναι τα φωτοβολταϊκά και οι μικρές ανεμογεννήτριες. Η σύνδεση των πηγών μπορεί να γίνει στο ζυγό AC του μικροδικτύου (εναλλακτικά στο ζυγό χαμηλής τάσης του δικτύου) ή σε ένα ζυγό DC που περιλαμβάνει μέσα αποθήκευσης. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε σύνδεσης περιγράφονται και αναλύονται παρακάτω.

#### 3.2.1 AC Σύνδεση

Η σύνδεση στον AC ζυγό ενός μικροδικτύου γίνεται μέσω ενός αντιστροφέα. Το βασικό πλεονέκτημα της σύνδεσης αυτής είναι ότι στον ίδιο ζυγό μπορούν να συνδεθούν πολλές διαφορετικές πηγές που μπορεί να βρίσκονται και σε απομακρυσμένες περιοχές. Αυτό σημαίνει ότι η σύνδεση αυτή είναι κατάλληλη για ένα μεγάλο μικροδίκτυο (οικισμός) και όχι για μια μεμονωμένη οικία. Επίσης, τα υψηλά επίπεδα τάσης έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλότερες απώλειες αν και πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν και το επιπλέον κόστος ηλεκτρονικών ισχύος όπως είναι οι ελεγκτές.

##### 3.2.1.1 Δομή της AC σύνδεσης

Το παρακάτω σχήμα περιγράφει τη γενική δομή της AC σύνδεσης:



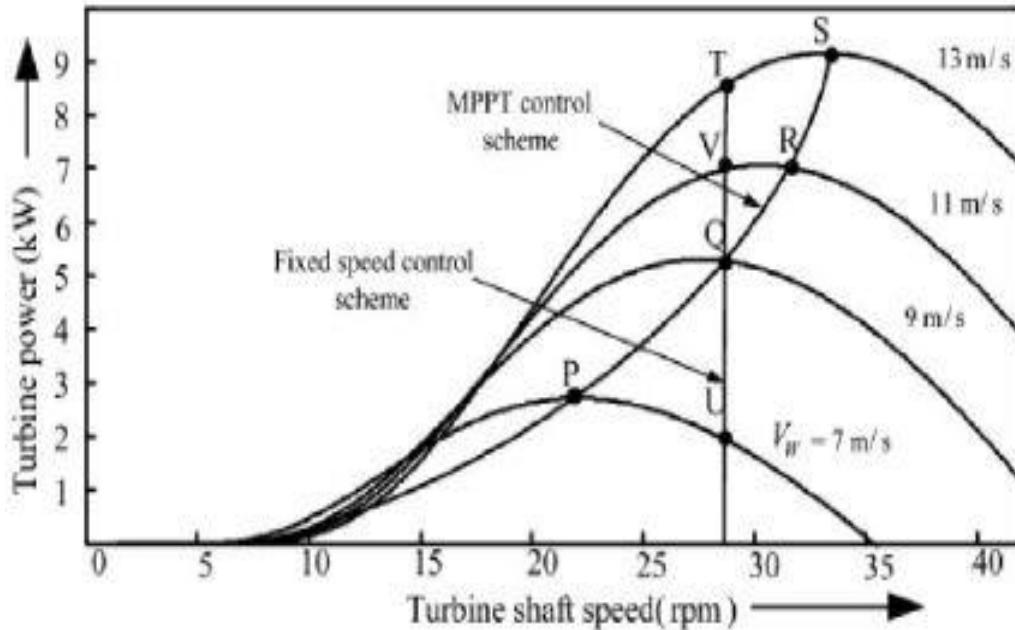
Σχήμα 3.2: Η γενική δομή μιας AC σύνδεσης.

Αρχικά παρατηρούμε ότι η έξοδος της γεννήτριας ανορθώνεται μέσω μιας μη ελεγχόμενης ανόρθωσης ενώ στη συνέχεια περνά από ένα μονοφασικό αντιστροφέα όπου εκεί εκτελείται η λειτουργία MPPT. Τέλος, αφού η έξοδος γίνει πάλι AC, όλο το σύστημα ξανασυνδέεται στο δίκτυο.

Τον ανορθωτή συνοδεύει η προστασία υπέρτασης η οποία προστατεύει τον αντιστροφέα από υπερτάσεις αλλά και την φτερωτή από ανάπτυξη μεγάλων επιταχύνσεων. Καθώς, αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου, η ΗΕΔ της γεννήτριας και επομένως η τάση στον ανορθωτή και κατ' επέκταση του αντιστροφέα, που χρειάζεται προστασία, αυξάνεται. Έτσι, όταν φυσήσει πάνω από τα ονομαστικά μεγέθη και πριν προλάβει να επενεργήσει το σύστημα Furling, η γεννήτρια θα δώσει ισχύ στην προστασία υπέρτασης, που πλέον λειτουργεί σαν απορριπτικό φορτίο. Κατ' αυτόν τον τρόπο θα περάσουν μεγαλύτερα ρεύματα από το τύλιγμα της με αποτέλεσμα να επιβραδυνθεί, αυξάνοντας την ηλεκτρομαγνητική ροπή. Ουσιαστικά, πρόκειται για σταδιακή βραχυκύκλωση της γεννήτριας με σταδιακή αφαίρεση αντιστάσεων ώστε να περνάει μεγαλύτερο ρεύμα [27], που ειδικά στις μικρές γεννήτριες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σύστημα πέδησης τους. Αυτό έχει ως συνέπεια, όμως, την έντονη φθορά των γεννητριών. Τέλος, στην περίπτωση που ξαφνικά χαθεί το δίκτυο που τροφοδοτεί η γεννήτρια τότε όλη η ισχύς παρέχεται στο απορριπτικό φορτίο [17].

### **3.2.1.2 Λειτουργία μεγιστοποίησης αποδιδόμενης ισχύος (MPPT)**

Λαμβάνοντας υπ' όψιν την καμπύλη  $c_p$ - $\lambda$  μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί ότι ο αεροδυναμικός συντελεστής μεγιστοποιείται για συγκεκριμένες τιμές του αεροδυναμικού λόγου του ακροπερυγίου  $\lambda$ . Συνεπώς, για τις τιμές αυτές θα έχουμε και μέγιστη παραγόμενη ισχύ από την γεννήτρια. Επομένως, στο διάγραμμα ισχύος και στροφών, θα ήταν επιθυμητό η γεννήτρια να λειτουργεί στα σημεία εκείνα όπου μεγιστοποιείται η παραγόμενη ισχύς. Αυτό επιτυγχάνεται αν ακολουθεί την καμπύλη που ενώνει όλες τις κορυφές, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Έτσι, τόσο το  $\lambda$  όσο και το  $c_p$  παραμένουν στις μέγιστες τιμές τους και έχουμε μέγιστη ενέργεια και ισχύ.



Σχήμα 3.3: Οι αεροδυναμικές καμπύλες και η καμπύλη MPPT .

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται, επίσης, και η καμπύλη που θα ακολουθούσε μία γεννήτρια σταθερών στροφών. Από τη μορφή της καμπύλης είναι κατανοητό ότι μία τέτοιου είδους γεννήτρια δε λειτουργεί πάντα στο σημείο μέγιστης ισχύος καθώς δεν μπορεί να μεταβάλλει τις στροφές της. Αυτός είναι και ένας από τους λόγους που οι γεννήτριες σταθερών στροφών χρησιμοποιούνται πιο σπάνια.

Δύο από τους τρόπους με τους οποίους επιτυγχάνεται η λειτουργία MPPT (Maximum Power Point Tracking) παρουσιάζονται παρακάτω [28] :

- Επαναληπτική μέθοδος

Στη μέθοδο αυτή εξετάζεται με επαναληπτικές διαδικασίες η ισχύς που παράγει η ανεμογεννήτρια και σε κάθε επανάληψη με τη βοήθεια ενός μετατροπέα αλλάζει το φορτίο της γεννήτριας. Έτσι, η ισχύς που παράγεται σε μια δεδομένη χρονική στιγμή συγκρίνεται με αυτή του επόμενου βήματος. Αν είναι μεγαλύτερη από την επιθυμητή μεταβάλλεται το φορτίο. Αν είναι μικρότερη από την επιθυμητή, τότε πάλι έχουμε μεταβολή του φορτίου με σκοπό να πετύχουμε τη μέγιστη τιμή. Η μέθοδος αυτή, στην περίπτωση των ανεμογεννητριών όπου έχουμε πολλές και συχνές μεταβολές των τιμών του ανέμου, θα έχει καθυστερήσεις. Βελτιώσεις αυτής της μεθόδου αναφέρουν ότι οι αποκλίσεις του φορτίου θα πρέπει να είναι μεγάλες όταν έχουμε μεγάλες αποκλίσεις από τις βέλτιστες τιμές και ομοίως για τις μικρές μεταβολές. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα πιο γρήγορη σύγκλιση της μεθόδου.

- Μέθοδος με πίνακα ή εξίσωση βέλτιστων φορτίων για κάθε τιμή ανέμου

Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην ύπαρξη έτοιμων πινάκων ή εξισώσεων, και επομένως για κάθε τιμή του ανέμου που μπορεί πολύ εύκολα να μετρηθεί με τη βοήθεια ενός ανεμόμετρου, υπολογίζεται το κατάλληλο φορτίο. Συγκριτικά με την επαναληπτική μέθοδο είναι πιο γρήγορη λόγω έλλειψης καθυστερήσεων κατά την υλοποίηση της.

### 3.2.2 DC σύνδεση

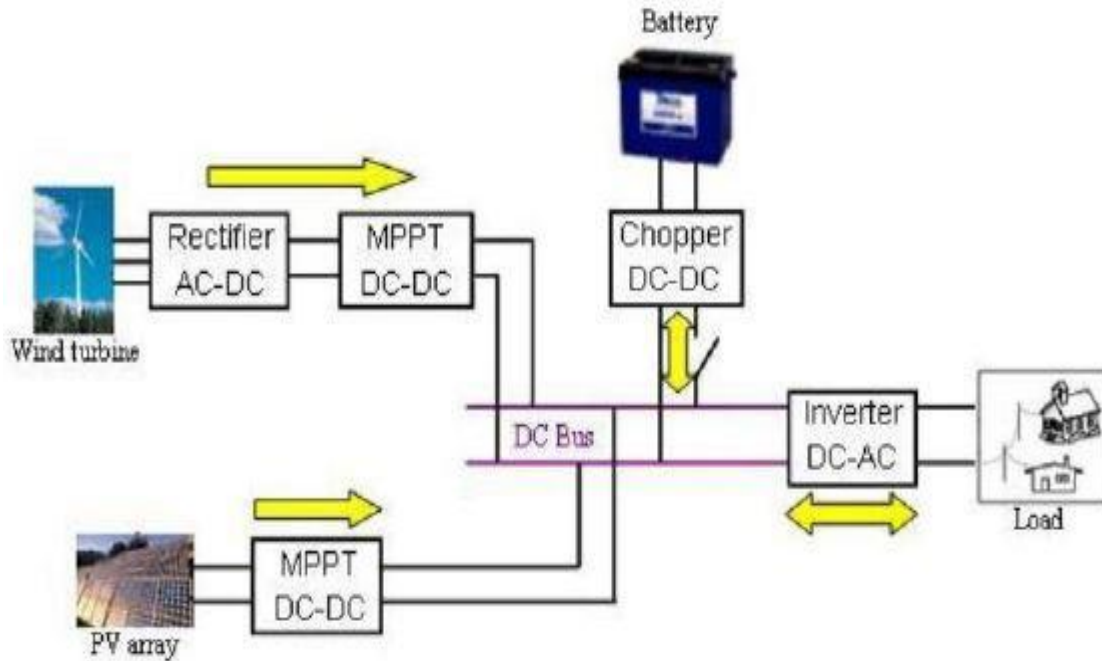
Θα πρέπει να σημειωθεί πως στην περίπτωση μιας αυτόνομης εγκατάστασης, προτιμάται η DC σύνδεση καθώς αποφεύγονται οι τουλάχιστον δύο αντιστροφείς της AC σύνδεσης και συνεπώς το κόστος γίνεται αρκετά μικρότερο. Συνήθως, μία τέτοιου είδους εγκατάσταση περιλαμβάνει φωτοβολταϊκά και μικρές ανεμογεννήτριες και είναι αρκετά εύκολο να υλοποιηθεί ακόμα και σε αμιγώς αστικά τοπία.

Όλες οι πηγές συνδέονται άμεσα στον DC ζυγό συσσωρευτών, η τάση των οποίων αντιστρέφεται και λαμβάνει την κατάλληλη τιμή (τάση – συχνότητα) μέσω ενός αντιστροφέα πηγής τάσης. Εν συνεχεία, ο αντιστροφέας αυτός τροφοδοτεί φορτίο.

Η έξοδος της γεννήτριας ανορθώνεται με βοήθεια ενός τριφασικού ανορθωτή γέφυρας. Επομένως, πλέον, η γεννήτρια μπορεί να συνδεθεί στις μπαταρίες. Ένας διπολικός διακόπτης παρεμβάλλεται μεταξύ της γεννήτριας και του ανορθωτή και στόχο έχει την βραχυκύκλωση της γεννήτριας ώστε αυτή να μην περιστρέφεται σε περιπτώσεις εργασιών συντήρησης. Επίσης, για να ελέγχεται το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών συνδέεται στο σύστημα και ένας ρυθμιστής φόρτισης, ο ρόλος του οποίου είναι να ελέγχει τόσο τον τρόπο φόρτισης και εκφόρτισης, καθ' ότι αυτοί πρέπει να ακολουθούν συγκεκριμένους αλγορίθμους, όσο και τον τρόπο με τον οποίο εισάγεται και εξάγεται το απορριπτικό φορτίο από το σύστημα.

Στη συνέχεια, η σύνδεση απευθείας σε συσσωρευτές έχει το χαρακτηριστικό ότι η τάση της γεννήτριας παραμένει σταθερή και ίση περίπου με αυτή των συσσωρευτών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η τάση να μην μπορεί να ρυθμίζεται διαρκώς κι επομένως δεν έχουμε τη μέγιστη παραγόμενη ισχύ. Για να επιλυθεί το παραπάνω πρόβλημα, χρησιμοποιείται ένας DC/DC μετατροπέας ο οποίος συνδέεται μεταξύ ανορθωτή και συσσωρευτών και ενώ διατηρεί την τάση στην έξοδο του σταθερή και ίση με αυτή των συσσωρευτών έχει την δυνατότητα να ελέγχει την τάση στην είσοδο του ώστε η ανεμογεννήτρια να λειτουργεί πάντα σε βέλτιστες τιμές  $c_p$  και  $\lambda$ . Μία τέτοια υλοποίηση παρουσιάζεται παρακάτω:

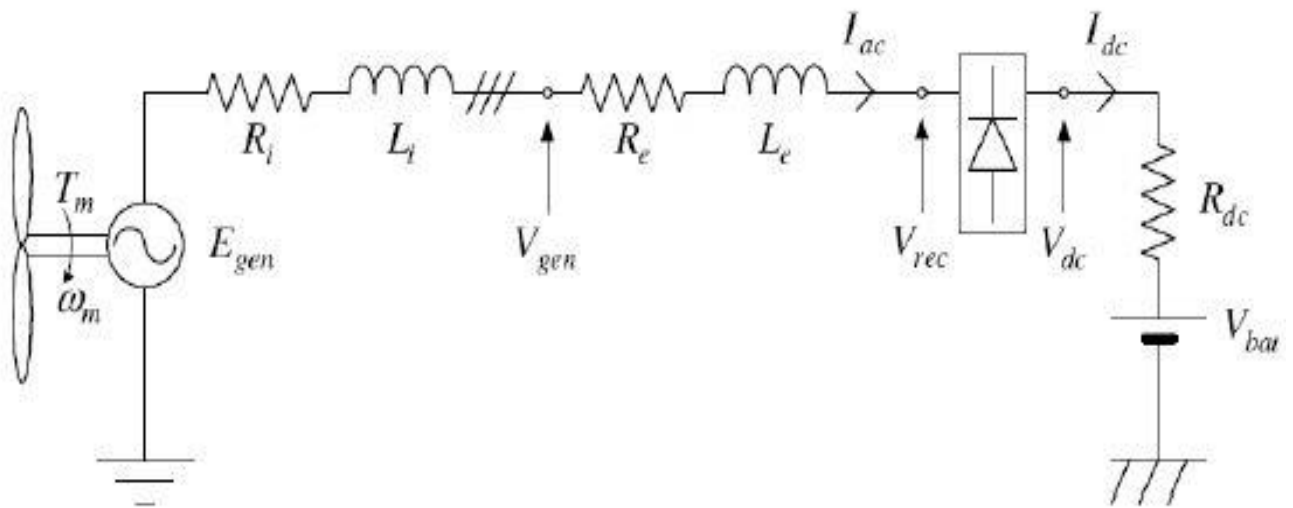




Σχήμα 3.4: Σύστημα ανεμογεννήτριας και φωτοβολταϊκού σε DC σύνδεση με δυνατότητα MPPT.

### 3.2.2.1 Σύστημα συνδεδεμένο απευθείας σε μπαταρίες

Σε αυτό το μοντέλο ανάλυσης, η ανεμογεννήτρια συνδέεται μέσω καλωδίου με τον ανορθωτή που με τη σειρά του τροφοδοτεί τις μπαταρίες απευθείας χωρίς τη χρήση μετατροπέα. Οι μπαταρίες μπορούν να παρασταθούν από μία DC τάση και την εσωτερική τους αντίσταση [9]. Το σύστημα αυτό παρουσιάζεται κυκλωματικά παρακάτω:



Σχήμα 3.5: Ισοδύναμο κύκλωμα ανά φάση γεννήτριας σε απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές.

Για την παραπάνω διάταξη ισχύουν τα εξής:

- $R_i$  : η εσωτερική αντίσταση μιας φάσης της γεννήτριας και επομένως ισχύει  $R_i = qR_c$  (σχέση 2.12)
- $L_i$  : η αυτεπαγωγή μιας φάσης του τυλίγματος της γεννήτριας (σχέση 2.13)
- $R_e$  και  $L_e$  : η αντίσταση και η αυτεπαγωγή του καλωδίου μέσω του οποίου συνδέεται η γεννήτρια με τον ανορθωτή
- $R_{dc}$  και  $V_{bat}$  : η εσωτερική αντίσταση και η τάση των συσσωρευτών

Στην παρούσα μελέτη επικεντρωνόμαστε στη σύνδεση της ανεμογεννήτριας απευθείας σε συσσωρευτές και επομένως το μοντέλο της παραπάνω διάταξης έχει ιδιαίτερη σημασία.

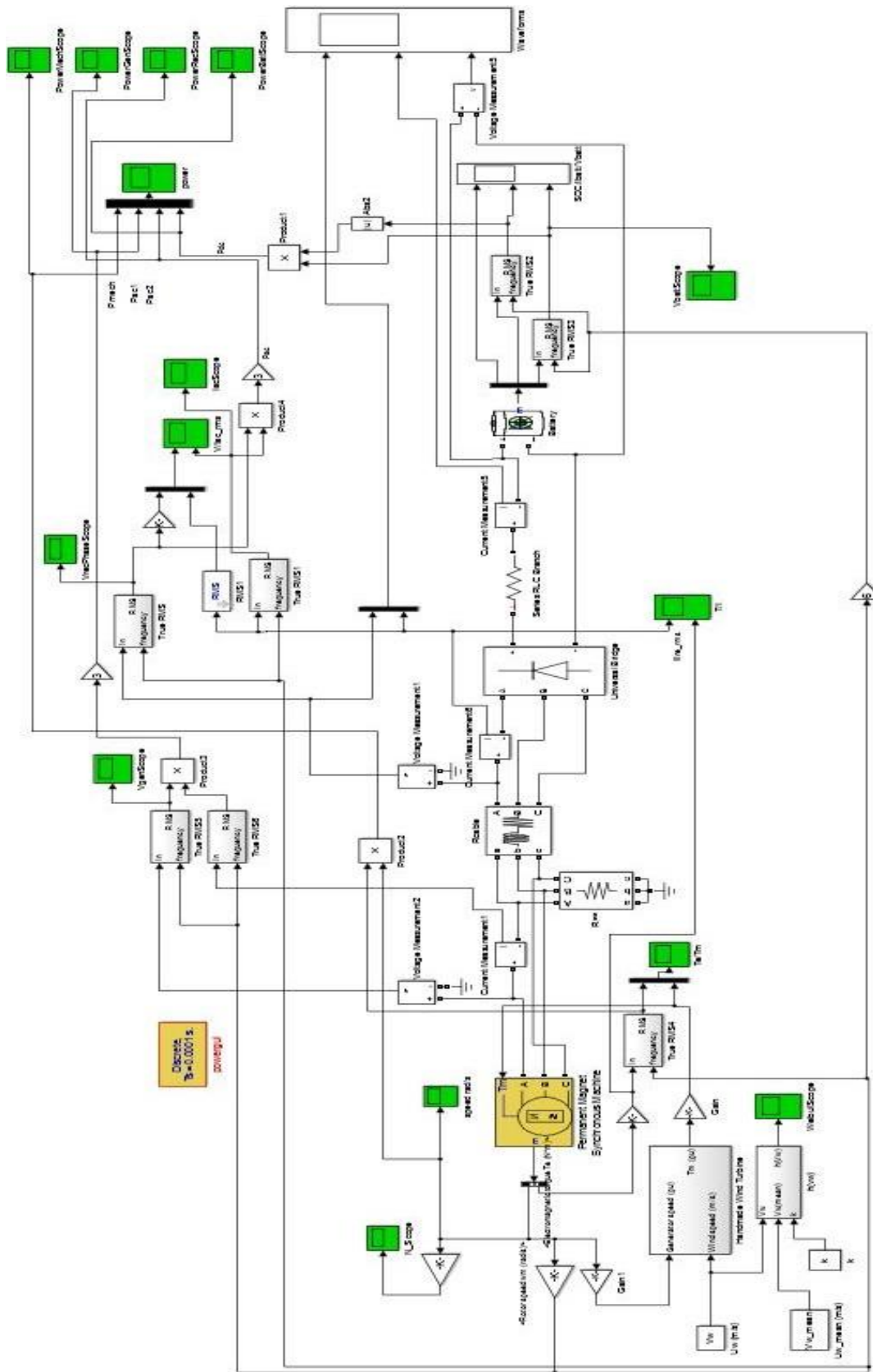
## **Κεφάλαιο 4: Μοντελοποίηση σύνδεσης ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές**

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγραφεί η μοντελοποίηση της απευθείας σύνδεσης μιας ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές, και συγκεκριμένα μιας γεννήτριας αξονικής ροής με μόνιμους μαγνήτες ονομαστικής ισχύος 850W, που πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα Matlab Simulink. Η διαδικασία βασίζεται στα θεωρητικά στοιχεία των προηγούμενων κεφαλαίων και θα γίνει εκτενής ανάλυση των διαφόρων συντελεστών που εμπλέκονται στη διαδικασία. Συνοπτικά, η μηχανική ισχύς που αποσπά η φτερωτή από τον άνεμο εισάγεται στη γεννήτρια και μετατρέπεται σε ηλεκτρική, στη συνέχεια η έξοδος της γεννήτριας (AC) ανορθώνεται με τριφασικό ανορθωτή διόδων και έπειτα εισέρχεται στη συστοιχία συσσωρευτών 48V με σκοπό την αποθήκευση της ενέργειας που παράγει η ανεμογεννήτρια.

Αρχικά, στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η μοντελοποίηση της απευθείας σύνδεσης της ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές 48V που πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab Simulink και στις επόμενες ενότητες αναλύονται τα επιμέρους μοντέλα τα οποία είναι:

- Μοντέλο αεροδυναμικού μέρους της ανεμογεννήτριας
- Μοντέλο της γεννήτριας
- Μοντέλο του ανορθωτή
- Μοντέλο της συστοιχίας των συσσωρευτών

Επιπλέον, χρησιμοποιείται μοντέλο αντίστασης για τη μοντελοποίηση του καλωδίου AC που συνδέει τη γεννήτρια με τον ανορθωτή καθώς και για τη μοντελοποίηση του καλωδίου DC που συνδέει τον ανορθωτή με τη συστοιχία των συσσωρευτών. Τέλος, χρησιμοποιούνται μετρητικά στοιχεία ώστε να μετρηθούν τα απαραίτητα μεγέθη για την επαλήθευση της ορθότητας του μοντέλου προσομοίωσης που πραγματοποιήσαμε.



Σχήμα 4.1: Μοντελοποίηση της απευθείας σύνδεσης της ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές.

#### 4.1 Μοντελοποίηση αεροδυναμικού μέρους της ανεμογεννήτριας

Ξεκινώντας τη μοντελοποίηση της σύνδεσης μιας ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές θα πρέπει, αρχικά, να αναλυθεί το μοντέλο του αεροδυναμικού μέρους της ανεμογεννήτριας, της φτερωτής. Για τη συγκεκριμένη μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο “Wind Turbine” του Simulink Matlab το οποίο επεξεργάστηκε κατάλληλα αλλάζοντας τις εξισώσεις  $c_p(\lambda)$  που χρησιμοποιούνται. Σ’ αυτό το σημείο θα πρέπει να τονιστεί ότι η μεταβλητή είσοδος του συστήματος είναι η ταχύτητα του ανέμου (m/s), η οποία εισέρχεται στο μοντέλο της φτερωτής. Επιπρόσθετα, στο μοντέλο της φτερωτής ως είσοδος εισέρχεται η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της γεννήτριας η οποία προφανώς αλληλεπιδρά με το αεροδυναμικό κομμάτι της ανεμογεννήτριας ενώ εξάγεται από το μοντέλο της φτερωτής η μηχανική ροπή και επομένως υπολογίζεται σε αυτό η μηχανική ισχύς που αποσπά η φτερωτή από τον άνεμο και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_{air} = \frac{1}{2} \rho c_p \pi R_{turb}^2 v_w^3 \quad (4.1)$$

Όσον αφορά τη γεννήτρια αξονικής ροής με μόνιμους μαγνήτες ονομαστικής ισχύος 850W, την οποία εξετάζουμε, η ακτίνα της φτερωτής,  $R_{turb}$ , ισούται με 1,2m και επομένως η μοναδική άγνωστη παράμετρος είναι ο αεροδυναμικός συντελεστής  $c_p$ , ο οποίος υπολογίζεται στο μοντέλο της φτερωτής μέσω των καμπυλών  $c_p$ - $\lambda$  που εισάγονται.

Για την εκτίμηση της σχέσης του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος  $c_p$  των πτερυγίων συναρτήσει του λόγου ταχυτήτων ακροπτερυγίου  $\lambda$  χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις  $c_p$ - $\lambda$  που έγιναν σε αεροδυναμική σήραγγα για ταχύτητες ανέμου μέχρι 3m/s, 3.7m/s, 4.4m/s, 5.5m/s και 7.2m/s [29]. Για παράδειγμα, στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι μετρήσεις  $c_p$ - $\lambda$  για ταχύτητες ανέμου μέχρι 3m/s, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της εξίσωσης  $c_{p,3}=f(\lambda)$ :

- Για ταχύτητες ανέμου μέχρι 3m/s:

$\lambda$	$c_p$
0,9500000000	0,0300000000
1,8800000000	0,0700000000
2,9136068853	0,125423321
3,4095399722	0,160160520
3,7194981515	0,182023413
4,2154312384	0,214569759
4,2360951170	0,215621571
4,6080449321	0,234554197
4,7940198397	0,234607954
4,9593308687	0,242697884

$\lambda$	$c_p$
5,0006586259	0,244720366
5,7445582562	0,292403887
5,8065498921	0,295559325
5,8272137707	0,296611137
5,8892054060	0,299766575
5,9511970424	0,302922013
6,0545164355	0,296293666
6,0751803141	0,285376927
6,0958441928	0,298316149
6,1165080714	0,299327390
6,1991635859	0,291200946
6,3644746148	0,311462284
6,4264662507	0,301878314
6,4471301293	0,315507249
6,4677940079	0,316518490
6,5184578865	0,317529731
6,5297856438	0,306731663
6,5917772796	0,309643673
6,6124411582	0,310614343
6,6950966727	0,301351901
6,7364244300	0,303212098
6,7777521872	0,291764888
6,7984160658	0,292654415
6,9017354589	0,283551216
6,9430632162	0,285249128
6,9843909734	0,273233919
7,0257187306	0,274850688
7,1290381237	0,278892610
7,2943491527	0,256716303
7,3563407885	0,258898028
7,3976685458	0,245827964
7,4389963030	0,247201305
7,6456350892	0,224045200
7,7282906037	0,211293622
7,8522738754	0,199266241
8,0000000000	0,170000000
9,0000000000	0,030000000
9,2000000000	0,000000000

**Πίνακας 4.1:** Μετρήσεις  $c_p$ - $\lambda$  για ταχύτητες ανέμου μέχρι 3m/s.

Συνεπώς, με τα ζεύγη των  $c_p$ - $\lambda$  που παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1 και με τη βοήθεια του Matlab, και συγκεκριμένα της λειτουργίας Curve Fitting, σχεδιάστηκε η καμπύλη για ταχύτητες ανέμου μέχρι 3m/s και υπολογίστηκε η εξίσωση:

$$\begin{aligned} c_{p,3}(\lambda) = & 0.1145 - 0.1605 * \cos(\lambda * 0.5274) + 0.04108 * \sin(\lambda * 0.5274) + 0.03085 \\ & * \cos(2 * \lambda * 0.5274) + 0.03547 * \sin(2 * \lambda * 0.5274) + 0.01061 \\ & * \cos(3 * \lambda * 0.5274) - 0.007617 * \sin(3 * \lambda * 0.5274) + 0.001454 \\ & * \cos(4 * \lambda * 0.5274) + 0.002659 * \sin(4 * \lambda * 0.5274) + 0.0002747 \\ & * \cos(5 * \lambda * 0.5274) - 0.001898 * \sin(5 * \lambda * 0.5274) + 0.002665 \\ & * \cos(6 * \lambda * 0.5274) + 0.001646 * \sin(6 * \lambda * 0.5274) \end{aligned}$$

Στο παράρτημα Α, παρουσιάζονται όλες οι μετρήσεις  $c_p$ - $\lambda$  για ταχύτητες ανέμου μέχρι 3.7m/s, 4.4m/s, 5.5m/s και 7.2m/s στους πίνακες Α.1-Α.4.

Συνεπώς, με τα ζεύγη των  $c_p$ - $\lambda$  που παρουσιάζονται στους πίνακες στο Παράρτημα Α σχεδιάζονται οι καμπύλες για ταχύτητες ανέμου μέχρι 3.7m/s, 4.4m/s, 5.5m/s και 7.2m/s και υπολογίζονται οι εξισώσεις για κάθε καμπύλη οι οποίες καταγράφονται παρακάτω:

Για ταχύτητες ανέμου μέχρι 3.7 m/s:

$$\begin{aligned} c_{p,3.7}(\lambda) = & 0.5004 * \sin(0.4552 * \lambda - 0.1637) + 0.3404 * \sin(0.5976 * \lambda + 2.875) \\ & - 0.006589 * \sin(1.185 * \lambda + 1.685) \end{aligned}$$

Για ταχύτητες ανέμου μέχρι 4.4 m/s:

$$\begin{aligned} c_{p,4.4}(\lambda) = & 0.1574 - 0.1691 * \cos(\lambda * 0.5872) - 0.02847 * \sin(\lambda * 0.5872) + 0.000789 \\ & * \cos(2 * \lambda * 0.5872) + 0.039 * \sin(2 * \lambda * 0.5872) - 0.0001974 \\ & * \cos(3 * \lambda * 0.5872) + 0.009314 * \sin(3 * \lambda * 0.5872) + 0.004336 \\ & * \cos(4 * \lambda * 0.5872) + 0.003282 * \sin(4 * \lambda * 0.5872) + 0.005477 \\ & * \cos(5 * \lambda * 0.5872) - 0.005996 * \sin(5 * \lambda * 0.5872) + 0.002626 \\ & * \cos(6 * \lambda * 0.5872) - 0.0006885 * \sin(6 * \lambda * 0.5872) - 0.001315 \\ & * \cos(7 * \lambda * 0.5872) - 0.003084 * \sin(7 * \lambda * 0.5872) \end{aligned}$$

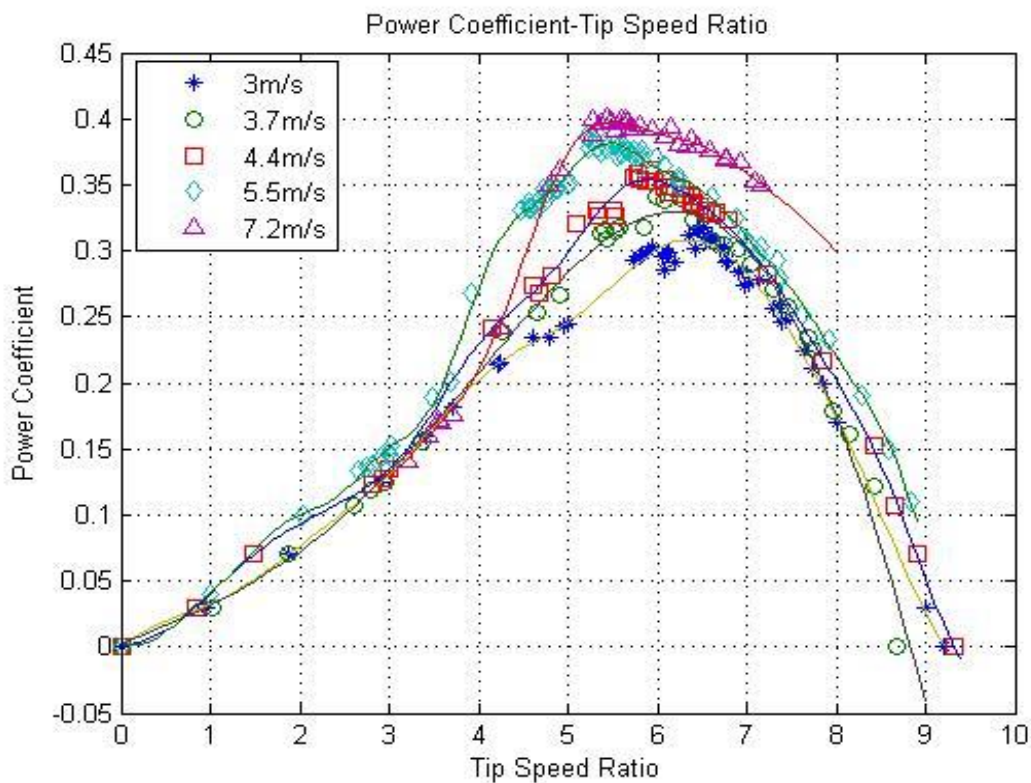
Για ταχύτητες ανέμου μέχρι 5.5 m/s:

$$\begin{aligned} c_{p,5.5}(\lambda) = & 0.2984 * \sin(0.3017 * \lambda - 0.01336) + 0.08385 * \sin(0.8004 * \lambda - 3.344) \\ & + 0.01853 * \sin(1.904 * \lambda - 1.504) + 0.005482 * \sin(2.935 * \lambda + 1.531) \\ & + 0.005597 * \sin(4.381 * \lambda - 4.123) + 0.004484 * \sin(5.474 * \lambda - 2.442) \end{aligned}$$

Για ταχύτητες ανέμου μέχρι 3.7 m/s:

$$\begin{aligned} c_{p,7.2} = & 0.1904 - 0.1799 * \cos(\lambda * 0.5912) - 0.09455 * \sin(\lambda * 0.5912) - 0.01324 \\ & * \cos(2 * \lambda * 0.5912) + 0.01377 * \sin(2 * \lambda * 0.5912) - 0.03049 \\ & * \cos(3 * \lambda * 0.5912) + 0.008142 * \sin(3 * \lambda * 0.5912) + 0.0002713 \\ & * \cos(4 * \lambda * 0.5912) + 0.004727 * \sin(4 * \lambda * 0.5912) - 0.00664 \\ & * \cos(5 * \lambda * 0.5912) + 0.009272 * \sin(5 * \lambda * 0.5912) + 0.0005907 \\ & * \cos(6 * \lambda * 0.5912) + 0.00162 * \sin(6 * \lambda * 0.5912) - 0.0006113 \\ & * \cos(7 * \lambda * 0.5912) + 0.004543 * \sin(7 * \lambda * 0.5912) \end{aligned}$$

Στη συνέχεια, στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζονται οι μετρήσεις  $c_p$ - $\lambda$  καθώς και οι καμπύλες για ταχύτητες ανέμου μέχρι 3m/s, 3.7m/s, 4.4m/s, 5.5m/s και 7.2m/s που σχεδιάζονται με τη βοήθεια της λειτουργίας, Curve Fitting, του προγράμματος Matlab ώστε να αποκτήσουμε συνολική εποπτεία της λειτουργίας της φτερωτής:



**Σχήμα 4.2:** Οι μετρήσεις  $c_p$ - $\lambda$  και οι καμπύλες που σχεδιάζονται για ταχύτητες ανέμου μέχρι 3m/s, 3.7m/s, 4.4m/s, 5.5m/s και 7.2m/s με τη βοήθεια του Matlab.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονιστεί πως υπάρχει διαφορά μεταξύ του πάχους των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας που έγιναν οι μετρήσεις για τα  $c_p$ - $\lambda$  [29] και του πάχους των



πτερυγίων της ανεμογεννήτριας που έχει εγκατασταθεί στο πεδίο δοκιμών στη Ραφήνα, στην οποία έγινε η μέτρηση της καμπύλης ισχύος ώστε να επαληθευτεί το μοντέλο προσομοίωσης. Γι' αυτό το λόγο, κρίθηκε απαραίτητη η μετατόπιση της καμπύλης  $c_p$ - $\lambda$  κατά 0.61 στον άξονα των  $\lambda$ , και επομένως στον πίνακα A.4 καταγράφονται οι τιμές του λόγου ταχυτήτων ακροπτερυγίου  $\lambda$  με προσαύξηση 0.61 στις μετρήσεις που έγιναν στην [29].

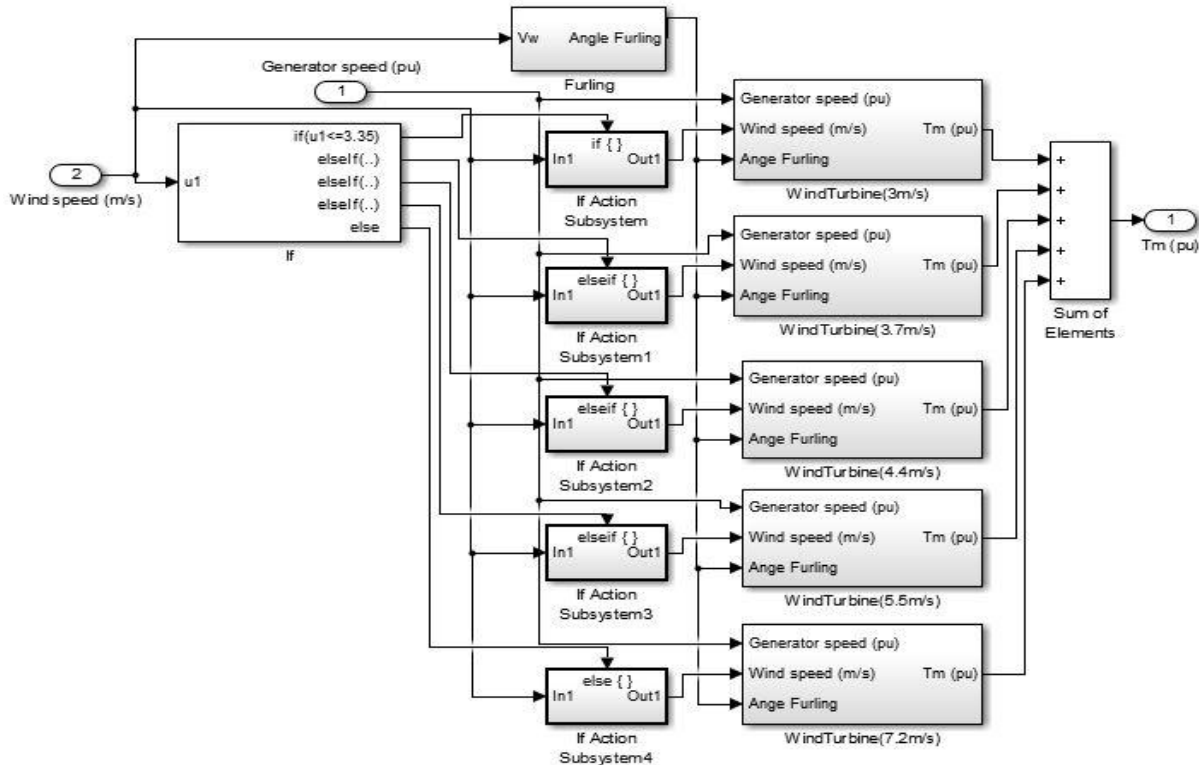
Στη συνέχεια, υπολογίζεται το εύρος ταχυτήτων στο οποίο επιλέγεται κάθε εξίσωση που αναλύθηκε παραπάνω. Τα όρια του κάθε εύρους ορίζονται από το μέσο των ταχυτήτων ανέμου των εκατέρωθεν εξισώσεων και παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Ταχύτητες ανέμου, $v_w$ (m/s)	Εξίσωση $c_p(\lambda)$
$v_w \leq 3.35$	$c_{p,3}(\lambda)$
$3.35 \leq v_w \leq 4.05$	$c_{p,3.7}(\lambda)$
$4.05 \leq v_w \leq 4.95$	$c_{p,4.4}(\lambda)$
$4.95 \leq v_w \leq 6.35$	$c_{p,5.5}(\lambda)$
$v_w > 6.35$	$c_{p,7.2}(\lambda)$

**Πίνακας 4.2:** Εύρος ταχυτήτων κάθε εξίσωσης  $c_p(\lambda)$ .

Συνοπτικά, η λειτουργία του μοντέλου του αεροδυναμικού τμήματος της ανεμογεννήτριας έχει ως εξής: αρχικά εισέρχεται η ταχύτητα ανέμου στο μοντέλο της φτερωτής, στη συνέχεια επιλέγεται η κατάλληλη εξίσωση  $c_p(\lambda)$  σύμφωνα με τον πίνακα 4.2, υπολογίζεται η γωνία Furling και τέλος εξάγεται η μηχανική ισχύς που αποσπά η φτερωτή από τον άνεμο καθώς και η μηχανική ροπή που έπειτα εισέρχεται στο μοντέλο της γεννήτριας.

Στο Σχήμα 4.3, επομένως, εμφανίζεται το μοντέλο της φτερωτής που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση της απευθείας σύνδεσης της ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές στο περιβάλλον του Simulink Matlab.



Σχήμα 4.3: Μοντέλο φτερωτής της ανεμογεννήτριας στο πρόγραμμα Matlab Simulink.

## 4.2 Μοντελοποίηση της γεννήτριας

Στη συγκεκριμένη ενότητα θα αναφερθούν οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο της γεννήτριας ώστε να προσομοιωθεί το ηλεκτρικό μέρος της ανεμογεννήτριας. Αρχικά, θα πρέπει να σημειωθεί πως για τη μοντελοποίηση της γεννήτριας χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο “Permanent Magnet Synchronous Machine” του Simulink Matlab καθώς οι γεννήτριες που μελετήθηκαν είναι σύγχρονες αξονικής ροής μονίμων μαγνητών.

Επιπλέον, οι σταθερές παράμετροι του μοντέλου της γεννήτριας οι οποίες παρέμειναν αμετάβλητες για όλες τις γεννήτριες που μελετήθηκαν είναι οι εξής:

- Ο αριθμός των φάσεων είναι 3 καθώς το σύστημά μας είναι τριφασικό
- Η κυματομορφή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι ημιτονοειδής και έχει εξηγηθεί στο κεφάλαιο 2
- Ο δρομέας που χρησιμοποιείται είναι κυλινδρικός
- Ως μηχανική είσοδος του μοντέλου της γεννήτριας επιλέγεται η μηχανική ροπή που εξάγεται από το μοντέλο της φτερωτής
- Ο συντελεστής αδράνειας ορίζεται:  $J = 0.1 (kg \cdot m^2)$
- Ο συντελεστής απόσβεσης ορίζεται:  $F = 0.001 (N \cdot m \cdot s)$
- Τα ζεύγη πόλων είναι 6

- Ο συντελεστής στατικής τριβής στον άξονα ορίζεται:  $T_f = 0 \text{ (} N \cdot m \text{)}$
- Οι αρχικές συνθήκες για την ταχύτητα περιστροφής και τη γωνιακή θέση του δρομέα καθώς και το ρεύμα του στάτη είναι μηδέν

Οι μεταβλητές παράμετροι του μοντέλου της γεννήτριας εξαρτώνται από την ονομαστική ισχύ της κάθε γεννήτριας που μελετούμε και η διαδικασία υπολογισμού τους θα αναλυθεί λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 8 στο οποίο θα εξηγηθεί το λογισμικό προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε στο περιβάλλον του FEMM. Συγκεκριμένα πρόκειται για τις παρακάτω παραμέτρους:

- Την ισοδύναμη αντίσταση του τυλίγματος του στάτη
- Την ισοδύναμη αυτεπαγωγή του τυλίγματος του στάτη
- Την ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας

Για τη γεννήτρια που αναλύεται στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, αξονικής ροής μονίμων μαγνητών ονομαστικής ισχύος 850W με διάκενο μεταξύ των μαγνητών και πηνίων  $g=3mm$ , η ισοδύναμη αντίσταση του τυλίγματος του στάτη προέκυψε από πειραματικές μετρήσεις στο εργαστήριο και κατά τη σύνδεση με RLC μετρητικό όργανο στη φάση της γεννήτριας  $R_{phase}=0.6567\Omega$ . Παρόμοια, προέκυψε και η ισοδύναμη αυτεπαγωγή του τυλίγματος του στάτη  $L_{phase}=2.1917mH$ . Ακόμη, η ηλεκτρομαγνητική ροπή, της οποίας η διαδικασία υπολογισμού παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 8, είναι  $T_m=2.7356(Nm/A)$  και επειδή η είσοδος της στο μοντέλο της γεννήτριας έχει μονάδα μέτρησης ( $Nm/A_{peak}$ ) θα πρέπει η τιμή να διαιρεθεί με  $\sqrt{2}$ . Επομένως, η ηλεκτρομαγνητική ροπή που εισέρχεται στο μοντέλο είναι  $T_m=1.9344(Nm/A)$ .

Σ' αυτό το σημείο να αναφέρουμε πως στο μοντέλο της γεννήτριας υπολογίζεται η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, η οποία είναι μία από τις δύο εισόδους στο μοντέλο της φτερωτής και με αυτό τον τρόπο τα δύο μοντέλα αλληλεπιδρούν.

Στη συνέχεια το μοντέλο της γεννήτριας συνδέεται μέσω καλωδίου με το μοντέλο του ανορθωτή το οποίο θα αναλυθεί στην επόμενη ενότητα. Όσον αφορά το καλώδιο πρόκειται για καλώδιο μήκους 80m και διατομής  $4mm^2$  και η αντίστασή του υπολογίζεται από την κάτωθι σχέση:

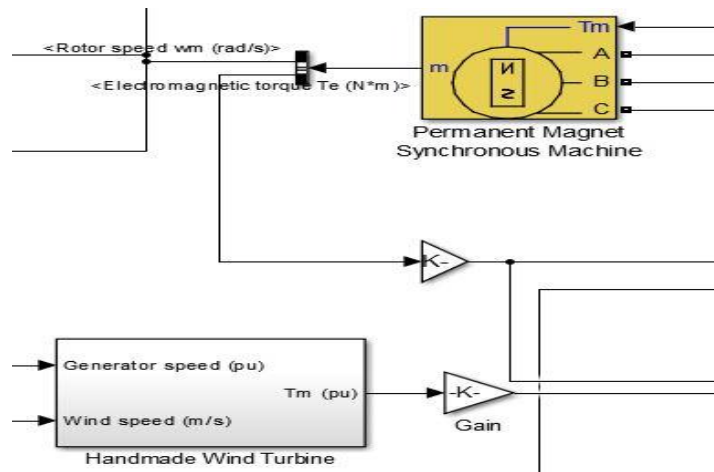
$$R_{cable} = \rho \frac{l}{S} \quad (4.2)$$

όπου,

- R: η αντίσταση του καλωδίου,
- ρ: η ειδική αντίσταση του χαλκού,
- l: το μήκος του καλωδίου,
- S: η διατομή του καλωδίου.

Επομένως, η αντίσταση και η αυτεπαγωγή του καλωδίου που εισάγουμε στο μοντέλο προσομοίωσης είναι  $R_{cable,AC}=0.3707\Omega$  και  $L_{cable,AC}=0.063mH$ .

Στο Σχήμα 4.4, λοιπόν, εμφανίζεται το μοντέλο της γεννήτριας που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση της απευθείας σύνδεσης της ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές στο περιβάλλον του Simulink Matlab ενώ στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζονται οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση της γεννήτριας ονομαστικής ισχύος 850W, 2400mm διάμετρο δρομέα, τιμή διακένου μεταξύ των πηνίων και των μαγνητών 3mm.



**Σχήμα 4.4:** Μοντέλο της αξονικής γεννήτριας μονίμων μαγνητών σε σύνδεση με τη φτερωτή της ανεμογεννήτριας στο πρόγραμμα Matlab Simulink.

Configuration	Parameters	Advanced
Stator phase resistance $R_s$ (ohm):		
0.6567		
Armature inductance (H):		
0.0021917		
Machine constant		
Specify: Torque Constant (N.m / A_peak)		
Flux linkage: 0.22411		
Voltage constant: 243.8982		
Torque constant: 2.7356		
Inertia, viscous damping, pole pairs, static friction [ J(kg.m <sup>2</sup> ) F(N.m.s) p( ) Tf(N.m)]:		
[0.1 0.001 6 0]		
Initial conditions [ $\omega_m$ (rad/s) $\theta_{tam}$ (deg) $i_a, i_b$ (A) ]:		
[0,0, 0,0]		

**Σχήμα 4.5:** Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για το μοντέλο της γεννήτριας στο πρόγραμμα Matlab Simulink.

### 4.3 Μοντελοποίηση του ανορθωτή

Απαραίτητο στοιχείο της σύνδεσης της ανεμογεννήτριας με συσσωρευτές είναι ο τριφασικός ανορθωτής γέφυρας με διόδους ο οποίος ανορθώνει την έξοδο της γεννήτριας και στη συνέχεια η έξοδος του εισέρχεται στους συσσωρευτές.

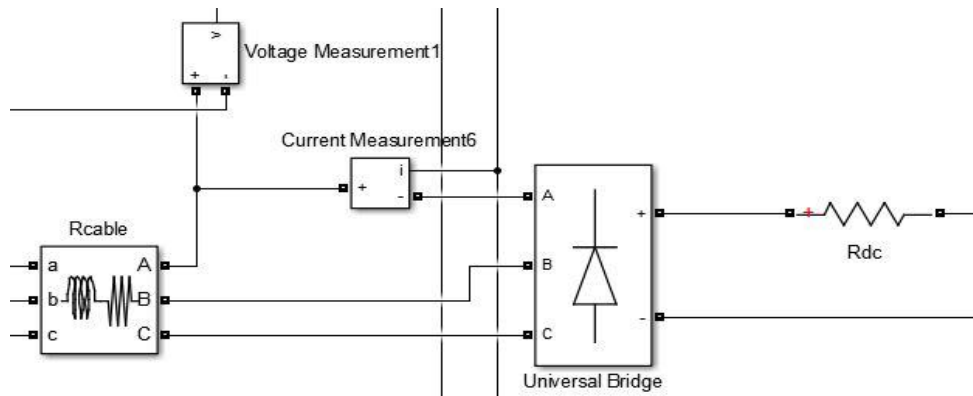
Για τη μοντελοποίηση του ανορθωτή χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο “Universal Bridge” του Simulink Matlab και επιλέχθηκε τριφασικός ανορθωτής διόδων. Οι υπόλοιπες παράμετροι του μοντέλου ορίστηκαν από datasheet [30] του ανορθωτή, που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα για την επαλήθευση του μοντέλου προσομοίωσης, και καταγράφονται παρακάτω:

- Τάση κατωφλίου  $V_f$  των διόδων του ανορθωτή είναι 0.7V
- $R_{on}=0.01\Omega$
- $L_{on}=0$
- $R_{snubber}=100\Omega$
- $C_{snubber}=9mF$

Θα πρέπει να σημειωθεί πως το snubber είναι μια διάταξη η οποία καταστέλλει τα μεταβατικά φαινόμενα της τάσης στα ηλεκτρικά συστήματα και στη μελέτη μας οι ακριβείς τιμές προέκυψαν με δοκιμές που έγιναν στο μοντέλο προσομοίωσης με στόχο τον περιορισμό αυτών των μεταβατικών φαινομένων. Σαφώς, δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή σε τυπικές τιμές που βρέθηκαν και είναι:  $R_{snubber}=10-1000\Omega$  και  $C_{snubber}=0.1-1\mu F$ .

Στη συνέχεια το μοντέλο του ανορθωτή συνδέεται μέσω καλωδίου 2m και διατομής 2.5mm<sup>2</sup> με το μοντέλο των συσσωρευτών και η αντίσταση του καλωδίου υπολογίζεται από τη σχέση (4.2):  $R_{cable,DC}=0.028\Omega$ .

Στο Σχήμα 4.6, συνεπώς, εμφανίζεται το μοντέλο του ανορθωτή που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση της απευθείας σύνδεσης της ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές στο περιβάλλον του Simulink Matlab, καθώς και τα καλώδια, AC που συνδέει την γεννήτρια με τον ανορθωτή και DC που συνδέει τον ανορθωτή με την μπαταρία. Επίσης, στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζονται οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση του ανορθωτή.



**Σχήμα 4.6:** Μοντέλο του ανορθωτή που συνδέεται με τη γεννήτρια μέσω του καλωδίου AC και με τη μπαταρία μέσω του καλωδίου DC στο πρόγραμμα Matlab Simulink.

Parameters	
Number of bridge arms:	3
Snubber resistance Rs (Ohms)	100
Snubber capacitance Cs (F)	0.000009
Power Electronic device	Diodes
Ron (Ohms)	0.01
Lon (H)	0
Forward voltage Vf (V)	0.7
Measurements	None

**Σχήμα 4.7:** Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για το μοντέλο του ανορθωτή στο πρόγραμμα Matlab Simulink.

#### 4.4 Μοντελοποίηση των συσσωρευτών

Για την αποθήκευση της ενέργειας που παράγει η ανεμογεννήτρια χρησιμοποιούνται συσσωρευτές. Συγκεκριμένα στο πείραμα που πραγματοποιήθηκε για την επαλήθευση του μοντέλου προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν μπαταρίες 48V -4 μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης τάσης 12V και 100Ah η καθεμία-.

Για τη μοντελοποίηση των μπαταριών χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο “Battery” του Simulink Matlab το οποίο παραμετροποιήθηκε ως εξής:

- Επιλέχθηκαν μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης (Lead-acid) όπως στο πείραμα
- Ονομαστικής τάσης: 48V
- Ονομαστικής χωρητικότητας: 100Ah
- Αρχικής κατάστασης φόρτισης (Initial State of Charge): 57.47%

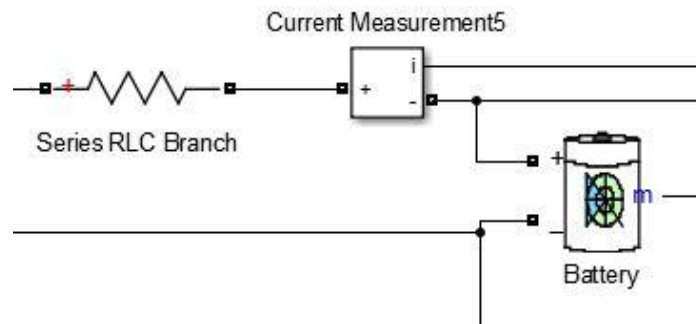
Η αρχική κατάσταση της μπαταρίας επιλέχθηκε στην τιμή 57.47% μετά από δοκιμές στο μοντέλο προσομοίωσης ώστε να ξεκινά η φόρτιση των μπαταριών από την τάση ηρεμίας 49V.

Οι υπόλοιπες παράμετροι του μοντέλου της μπαταρίας, εκτός από την εσωτερική αντίσταση, προκύπτουν σύμφωνα με τις άνωθεν ονομαστικές τιμές των μπαταριών και καταγράφονται παρακάτω:

- Μέγιστη χωρητικότητα μπαταρίας: 105Ah
- Τάση πλήρους φόρτισης: 52V
- Ονομαστικό ρεύμα εκφόρτισης: 12A
- Χωρητικότητα στην ονομαστική τάση: 31Ah
- Εκθετική ζώνη εκφόρτισης της μπαταρίας (exponential zone): [48.3V 5A]
- Εσωτερική αντίσταση: 0.0878Ω

Η τιμή της εσωτερικής αντίστασης της μπαταρίας προέκυψε σε πείραμα που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο το οποίο θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Επομένως, στο Σχήμα 4.8 εμφανίζεται το μοντέλο της μπαταρίας που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση της απευθείας σύνδεσης της ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές στο περιβάλλον του Simulink Matlab. Ενώ, στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζονται οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση της μπαταρίας.



**Σχήμα 4.8:** Μοντέλο της μπαταρίας που συνδέεται με τον ανορθωτή μέσω του καλωδίου DC στο πρόγραμμα Matlab Simulink.

Parameters	View Discharge Characteristics	Battery Dynamics
Battery type	Lead-Acid	
Nominal Voltage (V)	48	
Rated Capacity (Ah)	100	
Initial State-Of-Charge (%)	57.47	
<input checked="" type="checkbox"/> Use parameters based on Battery type and nominal values		
Maximum Capacity (Ah)	105	
Fully Charged Voltage (V)	52	
Nominal Discharge Current (A)	12	
Internal Resistance (Ohms)	0.0878	
Capacity (Ah) @ Nominal Voltage	31	
Exponential zone [Voltage (V), Capacity (Ah)]	[48.3 5]	

**Σχήμα 4.9:** Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για το μοντέλο της μπαταρίας στο πρόγραμμα Matlab Simulink.

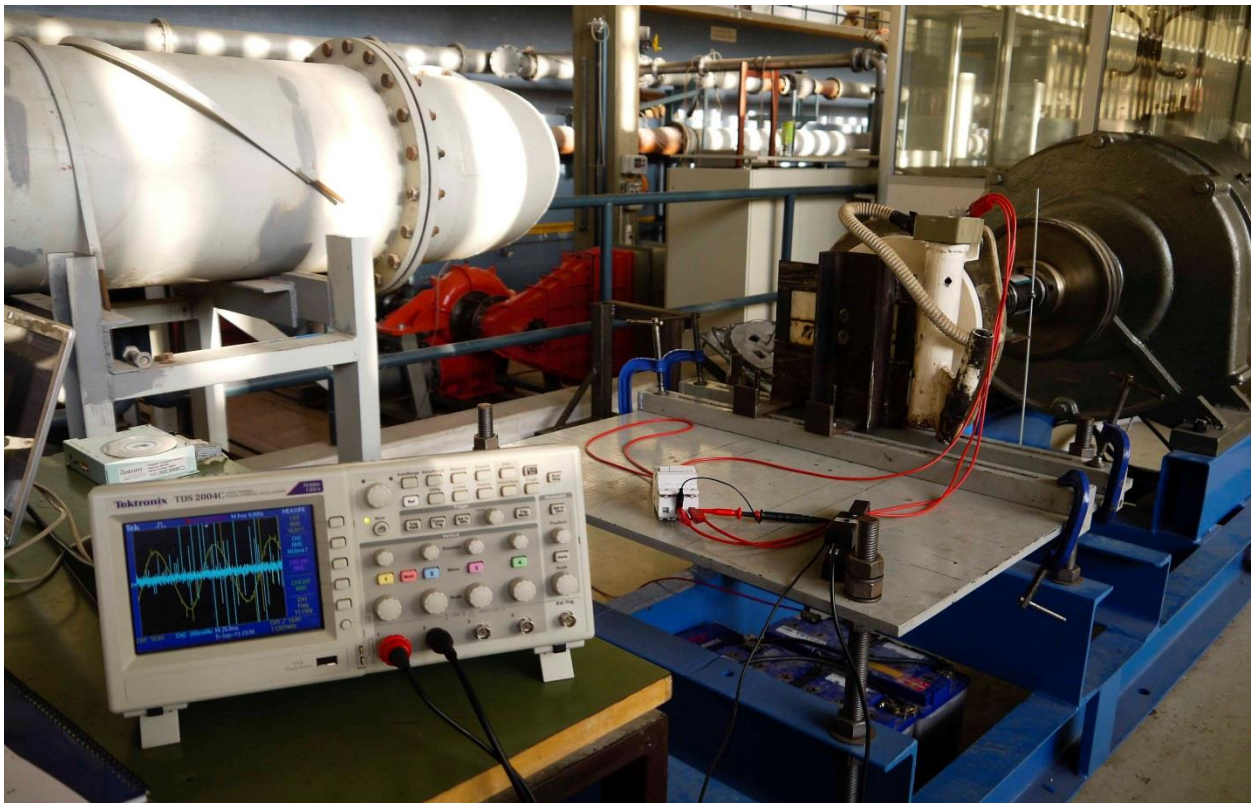


## Κεφάλαιο 5: Μέτρηση της γεννήτριας σε DC σύνδεση

### 5.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Για την επαλήθευση του ηλεκτρικού μέρους της γεννήτριας διεξήχθη πείραμα στο Εργαστήριο Υδροδυναμικής του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πολυτεχνείου. Συγκεκριμένα συνδέθηκε η γεννήτρια των 850W σε συσσωρευτές 48V και μετρήθηκαν τα απαραίτητα μεγέθη για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων των θεωρητικών μετρήσεων, οι οποίες βασίστηκαν στο AC μοντέλο σύνδεσης. Συγκεκριμένα, στη σύνδεση της γεννήτριας με τους συσσωρευτές, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, παρεμβάλλεται ο ανορθωτής του οποίου στο πείραμά μας η είσοδος του συνδέθηκε με τη γεννήτρια μέσω καλωδίου μήκους 80m και διατομής 4mm<sup>2</sup> και η έξοδος του συνδέθηκε με τους συσσωρευτές μέσω καλωδίου μήκους 2m και διατομής 2.5mm<sup>2</sup>.

Η πειραματική διάταξη για την πραγματοποίηση των μετρήσεων για την επαλήθευση του ηλεκτρικού μέρους της γεννήτριας παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 5.1:** Πειραματική διάταξη.

Η πειραματική διάταξη, όπως φαίνεται παραπάνω, περιλαμβάνει τα εξής στοιχεία:

- Γεννήτρια ονομαστικής ισχύος 850W
- DC κινητήρας ονομαστικής ισχύος 60HP
- Τριφασικός ανορθωτής διόδων
- 4 μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης τάσης 12V και 100Ah η καθεμία
- Ηλεκτρονικός έλεγχος στροφών
- Ροπόμετρο 500Nm
- Ψηφιακός παλμογράφος

## 5.2 Μέτρηση της εσωτερικής αντίστασης της μπαταρίας

Πριν τις μετρήσεις των διαφόρων ηλεκτρικών μεγεθών για τον καθορισμό της λειτουργίας της γεννήτριας σε σύνδεση με τους συσσωρευτές, πρέπει να μετρηθεί η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας ώστε να εισαχθεί ως παράμετρος στο μοντέλο προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα Simulink Matlab και έχει ήδη αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Σε αυτό το σημείο, θα περιγραφεί η διαδικασία μέτρησης της εσωτερικής αντίστασης της μπαταρίας και θα πρέπει να σημειωθεί πως το πείραμα διαρκεί μικρό χρονικό διάστημα ώστε να μπορεί να θεωρηθεί αμετάβλητο το φαινόμενο φορτίο, άρα και η εσωτερική τάση της μπαταρίας. Κάνοντας, λοιπόν, χρήση του διακόπτη, λαμβάνουμε σύντομες μετρήσεις των μεγεθών της τάσης στους ακροδέκτες των μπαταριών και του ρεύματος εξόδου της γεννήτριας, εφαρμόζοντας κάθε φορά και μικρότερες τιμές αντίστασης. Με αυτόν τον τρόπο, σχεδιάζουμε την I-V χαρακτηριστική για συγκεκριμένη τιμή της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας (State of Charge-SOC).

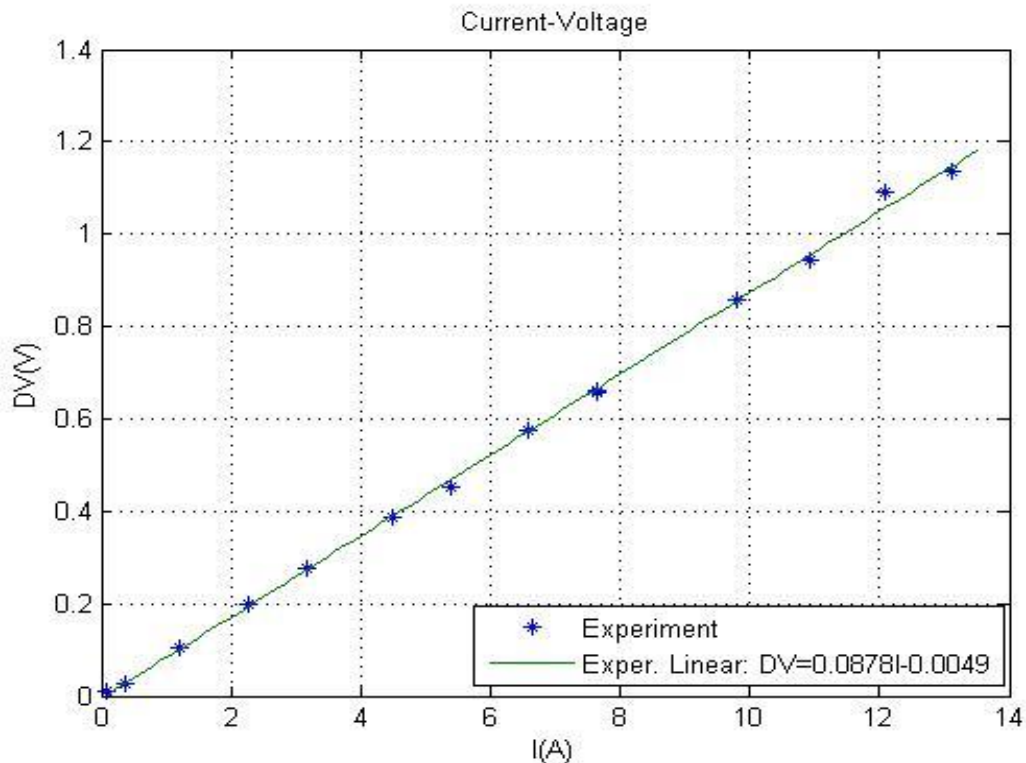
Πιο αναλυτικά, ρυθμίζουμε αρχικά την αντίσταση του φορτίου σε επαρκώς μεγάλη τιμή. Στη συνέχεια, κλείνουμε το διακόπτη και καταγράφουμε τις τιμές της τάσης στους ακροδέκτες των μπαταριών και του ρεύματος εξόδου τις οποίες μετράμε με τη βοήθεια του παλμογράφου. Σε αυτό το σημείο, δίνουμε ιδιαίτερη προσοχή ώστε ο διακόπτης να παραμένει κλειστός για χρονικό διάστημα μικρότερο από 5 δευτερόλεπτα και έπειτα αποσυνδέουμε το φορτίο. Το χρονικό αυτό διάστημα είναι αρκετά μεγάλο για να μας επιτρέψει να λάβουμε με ακρίβεια τις μετρήσεις και αρκετά μικρό ώστε η στάθμη φόρτισης (SOC) να θεωρηθεί πρακτικά αμετάβλητη. Για τη συγκεκριμένη τιμή  $R_{load}$  προκύπτει το ζεύγος τιμών  $V$  και  $I$ . Στη συνέχεια αναμένουμε μέχρι να διασφαλίσουμε πως έχει εκφορτιστεί η συστοιχία μπαταριών και βρίσκεται και πάλι σε κατάσταση ηρεμίας, στην περίπτωση μας στα 49V, και με σταθερή στάθμη φόρτισης (SOC). Έπειτα, μειώνουμε την τιμή της  $R_{load}$ , ξανακλείνουμε το διακόπτη για διάστημα όχι μεγαλύτερο από 5 δευτερόλεπτα, λαμβάνουμε και δεύτερο ζεύγος μετρήσεων και αναμένουμε και πάλι ώστε να διασφαλίσουμε πως η μπαταρία βρίσκεται στην αρχική

στάθμη φόρτισης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται κάθε φορά για μικρότερη τιμή της  $R_{load}$ , και συνεπώς για μεγαλύτερη τιμή του ρεύματος, και καταγράφονται τα ζεύγη μετρήσεων  $I$  και  $V$  που παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1.

<b>N (RPM)</b>	<b>Vdc_start (V)</b>	<b>Vdc_end (V)</b>	<b><math>\Delta V</math> (V)</b>	<b>I (A)</b>
210,82	49,0075	49,0159	0,0084	0,0693456
219,45	49,0040	49,0320	0,0280	0,3656820
230,56	48,9964	49,0994	0,1030	1,2217300
240,71	48,9937	49,1922	0,1985	2,2703900
249,64	49,0007	49,2760	0,2753	3,1779300
261,97	48,9976	49,3842	0,3866	4,4889100
269,88	48,9980	49,4514	0,4534	5,3792400
280,96	48,9975	49,5724	0,5749	6,5699100
291,19	48,9996	49,6618	0,6622	7,6397800
301,51	49,0033	49,6618	0,6585	7,6397800
310,24	49,0032	49,8608	0,8576	9,7913500
320,57	49,0052	49,9475	0,9423	10,931300
331,35	49,0036	50,0937	1,0901	12,086700
340,61	49,0102	50,1470	1,1368	13,117200

**Πίνακας 5.1:** Μετρήσεις για τον υπολογισμό της εσωτερικής αντίστασης της μπαταρίας.

Η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας, για τη συγκεκριμένη τιμή του SOC υπό την οποία διενεργήθηκαν οι μετρήσεις ισούται -κατά απόλυτη τιμή- με την κλίση της καμπύλης I-V που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.2 που προκύπτει από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος και καταγράφονται στον Πίνακα 5.1.



**Σχήμα 5.2:** Καμπύλη I-V για το πείραμα υπολογισμού της εσωτερικής αντίστασης της μπαταρίας.

Σύμφωνα, λοιπόν, με την παραπάνω διαδικασία και το Σχήμα 5.2 υπολογίστηκε πως η κλίση της καμπύλης I-V η οποία ισούται με την εσωτερική αντίσταση της συστοιχίας των μπαταριών της πειραματικής μας διάταξης είναι 0.0878Ω.

### 5.3 Μέτρηση της γεννήτριας συνδεδεμένης σε συσσωρευτές και σύγκριση με το μοντέλο προσομοίωσης

Κατά τη διάρκεια του πειράματος μέτρησης της γεννήτριας συνδεδεμένης σε συσσωρευτές για την επαλήθευση του ηλεκτρικού μέρους της γεννήτριας, μεταβάλλονται σταδιακά οι στροφές μέχρι να ξεκινήσει το σύστημα να τροφοδοτεί τις μπαταρίες. Αφού καταγραφεί το πρώτο σύνολο μετρήσεων ροπής, τάσης και ρεύματος στην AC και DC πλευρά, κλείνουμε την τροφοδοσία και αναμένουμε μέχρι να εκφορτιστεί η συστοιχία μπαταριών και να βρίσκεται και πάλι σε κατάσταση ηρεμίας -στην περίπτωση μας παρατηρήσαμε ότι αυτή η τάση ηρεμίας είναι 49V- και με σταθερή στάθμη φόρτισης (SOC). Και τούτο διότι, στη μελέτη μας θέλουμε η κατάσταση φόρτισης (state of charge) της μπαταρίας να παραμένει σταθερή και να μην αυξάνεται με την τροφοδοσία. Στη συνέχεια αυξάνουμε περίπου ανά 10 στροφές και ακολουθούμε την ίδια διαδικασία δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή στην αναμονή μεταξύ των μετρήσεων. Η αύξηση των στροφών συνεχίζεται έως ότου μετρηθεί το ονομαστικό ρεύμα της

γεννήτριας και έτσι, προκύπτουν οι διάφορες μετρήσεις και η καμπύλη ισχύος συναρτήσει των στροφών.

Με τη βοήθεια του ψηφιακού παλμογράφου, καταγράφονται μετρήσεις για την AC και DC τάση και ρεύμα. Πρέπει να σημειωθεί ότι στην AC πλευρά μετρήθηκε το ρεύμα σε μία από τις φάσεις της γεννήτριας καθώς επίσης και η πολική τάση ανά δύο των φάσεων πριν τον ανορθωτή και στη συνέχεια υπολογίστηκε η μέση τιμή των τριών αυτών μετρήσεων και κατ' επέκταση η φασική τάση. Στην DC πλευρά μετρήθηκε η τάση στις μπαταρίες και το ρεύμα της φάσης. Ακόμη, μετρήθηκε με το ροπόμετρο η μηχανική ροπή στη γεννήτρια. Παρακάτω στον πίνακα 5.2 παρουσιάζονται οι μετρήσεις που καταγράφηκαν:

N (RPM)	Tm (Nm)	Vt L-L (V)	Vt Ph (V)	Iac (A)	Vdc (V)	Idc (A)	Pdc (W)
210,820	-	35,957	20,760	0,184	49,016	0,069	3,399
219,340	1,777	36,956	21,337	0,522	49,037	0,379	18,600
230,560	3,466	37,790	21,818	1,196	49,099	1,221	59,986
240,710	5,440	38,192	22,050	2,009	49,192	2,270	111,686
249,640	7,343	38,580	22,274	2,731	49,276	3,178	156,596
261,970	9,888	39,018	22,527	3,759	49,384	4,489	221,681
269,880	11,940	39,247	22,660	4,444	49,451	5,379	266,011
280,960	14,888	39,618	22,873	5,356	49,572	6,570	325,686
291,190	16,984	39,989	23,088	6,185	49,662	7,640	379,405
301,510	19,680	40,257	23,242	7,100	49,769	8,825	439,216
310,240	21,937	40,524	23,396	7,836	49,861	9,791	488,205
320,570	23,281	40,816	23,564	8,697	49,948	10,931	545,991
331,350	26,282	41,138	23,751	9,566	50,094	12,087	605,468
340,610	26,693	41,379	23,890	10,344	50,147	13,117	657,788

**Πίνακας 5.2:** Πειραματικές μετρήσεις που καταγράφηκαν με μεταβολή των στροφών της γεννήτριας.

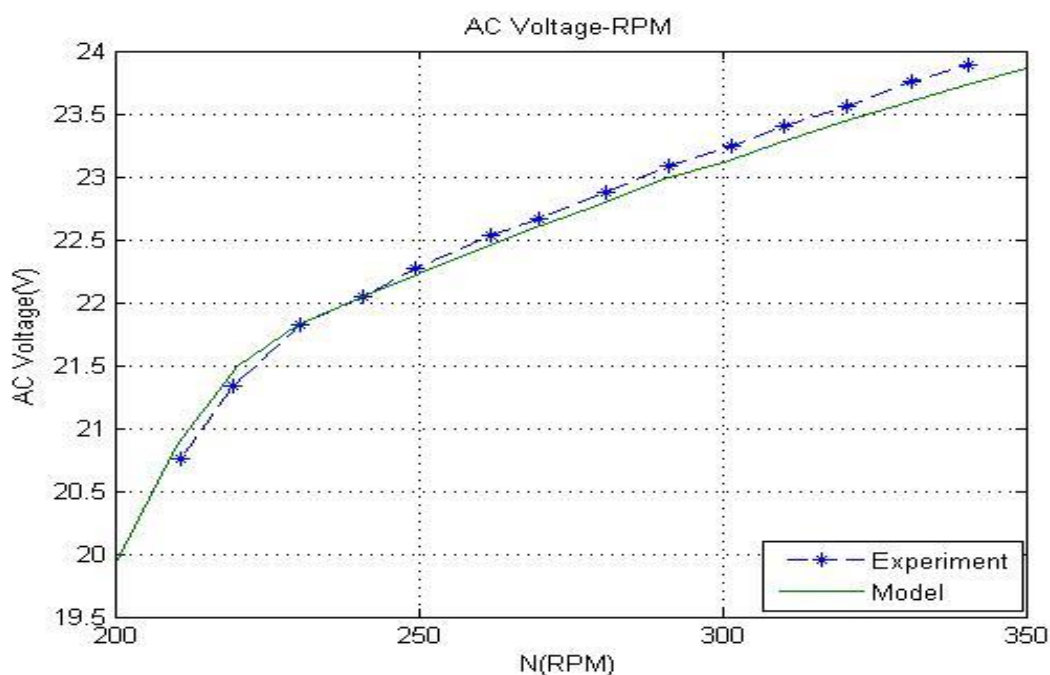
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται στον πίνακα 5.3 τα αποτελέσματα της μηχανικής ροπής, της τάσης και του ρεύματος στην AC και DC πλευρά και της ισχύος στη DC πλευρά που προκύπτουν από το μοντέλο προσομοίωσης για την ανάλυση και σύνδεση της γεννήτριας με συσσωρευτές που πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον του Matlab Simulink.

N (RPM)	Tm (Nm)	Vt L-L (V)	Vt Ph (V)	Iac (A)	Vdc (V)	Idc (A)	Pdc (W)
200	0,072	34,480	19,907	0,056	49,013	0,024	1,176
210	0,244	36,139	20,865	0,103	49,017	0,098	4,803
220	1,515	37,218	21,488	0,539	49,060	0,653	32,036
230	3,305	37,790	21,818	1,190	49,132	1,457	71,585
240	5,362	38,165	22,035	1,943	49,213	2,384	117,324

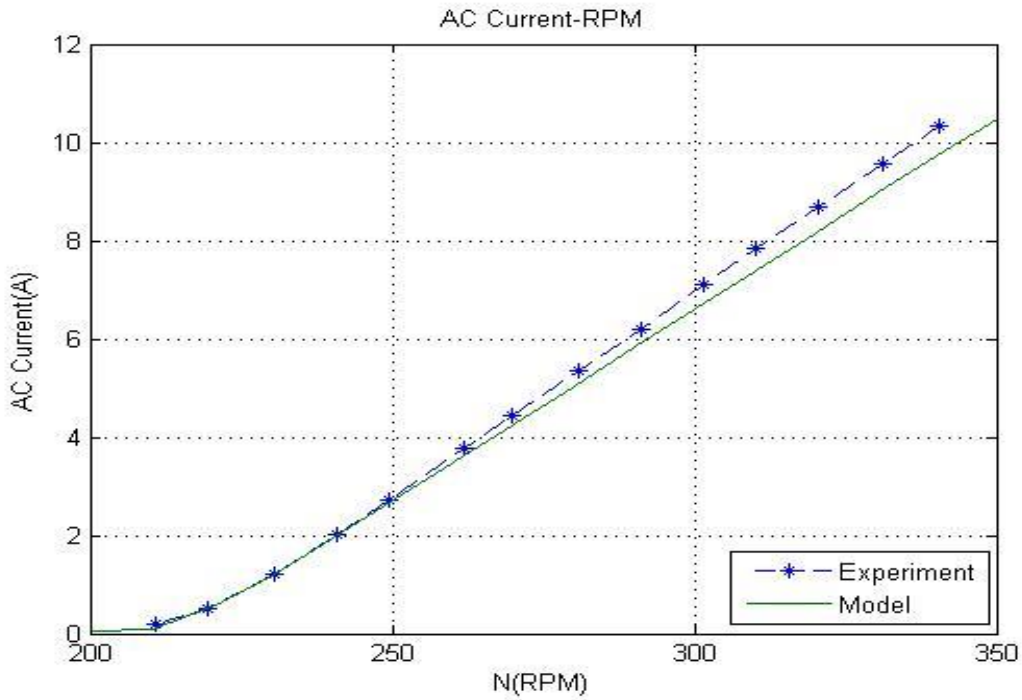
N (RPM)	Tm (Nm)	Vt L-L (V)	Vt Ph (V)	Iac (A)	Vdc (V)	Idc (A)	Pdc (W)
250	7,466	38,510	22,234	2,712	49,300	3,347	165,007
260	9,594	38,844	22,426	3,489	49,390	4,330	213,859
270	11,731	39,168	22,614	4,274	49,476	5,324	263,410
280	13,860	39,460	22,782	5,045	49,565	6,330	313,747
290	15,995	39,800	22,979	5,830	49,655	7,343	364,617
300	18,108	40,030	23,111	6,605	49,744	8,350	415,362
310	20,260	40,330	23,285	7,396	49,836	9,390	467,960
320	22,355	40,591	23,435	8,170	49,925	10,410	519,719
330	24,440	40,850	23,585	8,950	50,015	11,425	571,421
340	26,550	41,110	23,735	9,720	50,105	12,470	624,809
350	28,568	41,330	23,862	10,480	50,193	13,470	676,100

**Πίνακας 5.3:** Αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο προσομοίωσης.

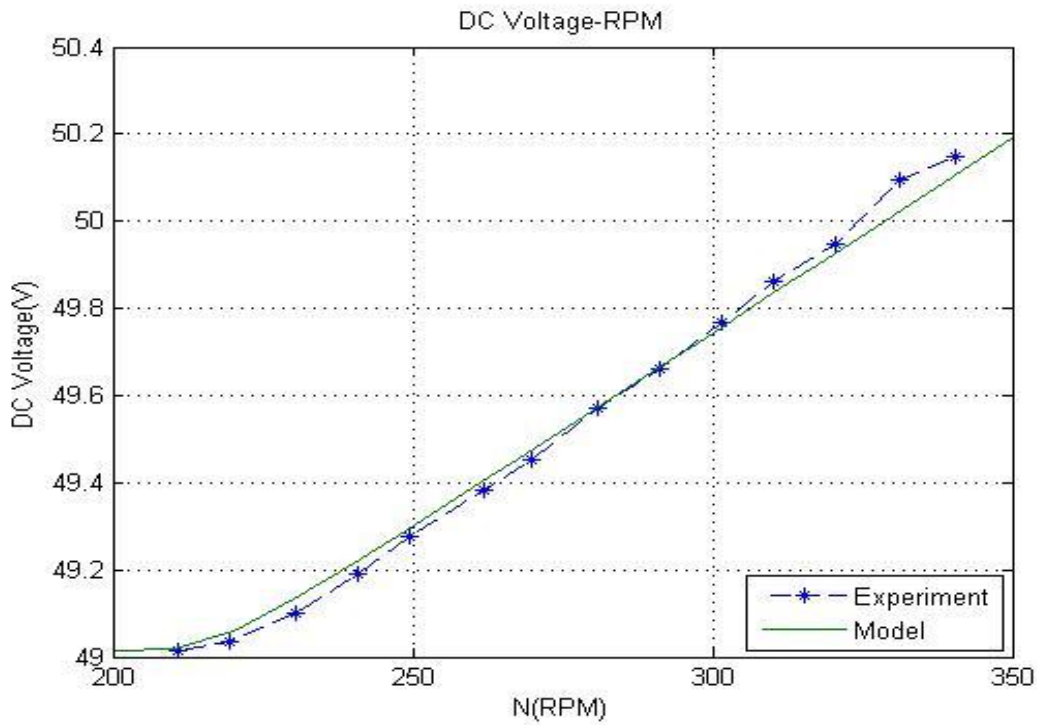
Με βάση τα δεδομένα που παρουσιάζονται στους παραπάνω πίνακες, σχεδιάζονται γραφικές με τις μετρήσεις του πειράματος σε σύγκριση με τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης που δημιουργήθηκε στο περιβάλλον του Matlab ώστε να αποτυπωθούν εποπτικά και οι αποκλίσεις τους. Συγκεκριμένα, πρόκειται για τις γραφικές της AC τάσης και ρεύματος συναρτήσει των στροφών, της DC ισχύος συναρτήσει των στροφών και της μηχανικής ροπής συναρτήσει του AC ρεύματος (Σχήματα 5.3-5.8).



**Σχήμα 5.3:** Η AC τάση όπως μετρήθηκε στο εργαστήριο και όπως υπολογίστηκε στην προσομοίωση συναρτήσει των στροφών της γεννήτριας.

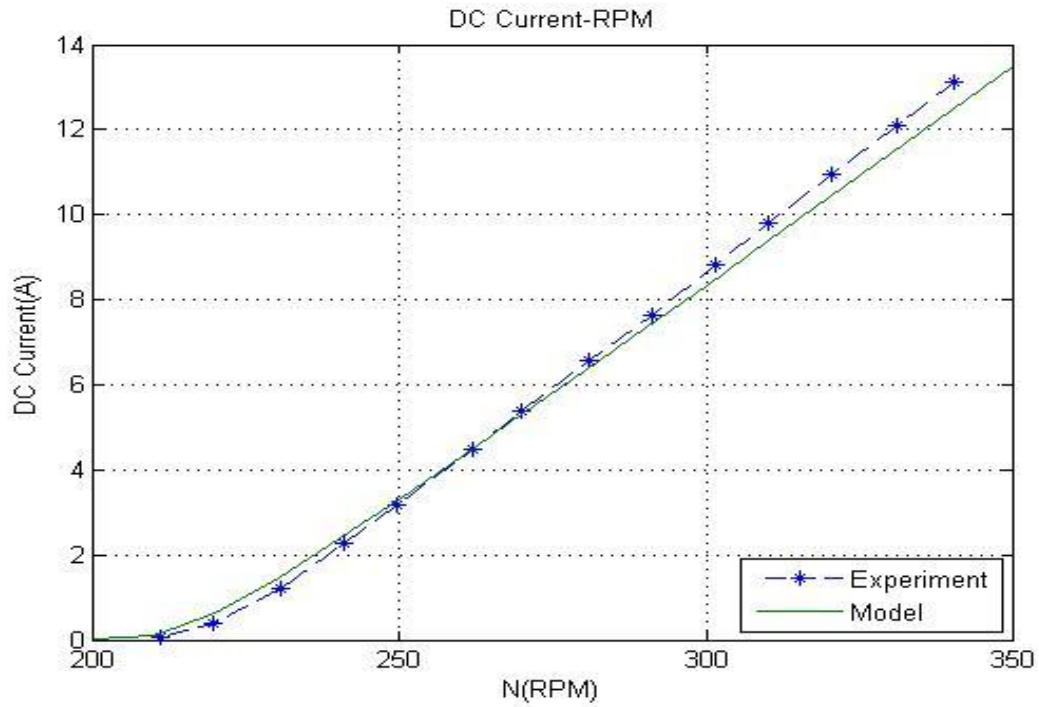


**Σχήμα 5.4:** Η AC τιμή ρεύματος όπως μετρήθηκε στο εργαστήριο και όπως υπολογίστηκε στην προσομοίωση συναρτήσει των στροφών της γεννήτριας.

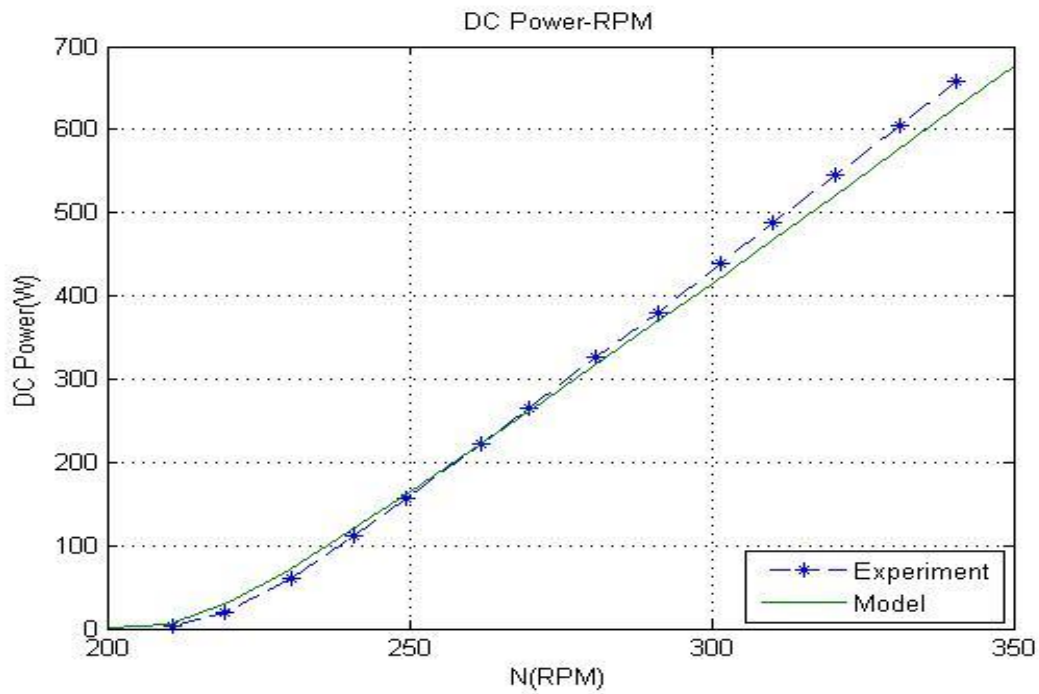


**Σχήμα 5.5:** Η DC τάση όπως μετρήθηκε στο εργαστήριο και όπως υπολογίστηκε στην προσομοίωση συναρτήσει των στροφών της γεννήτριας.



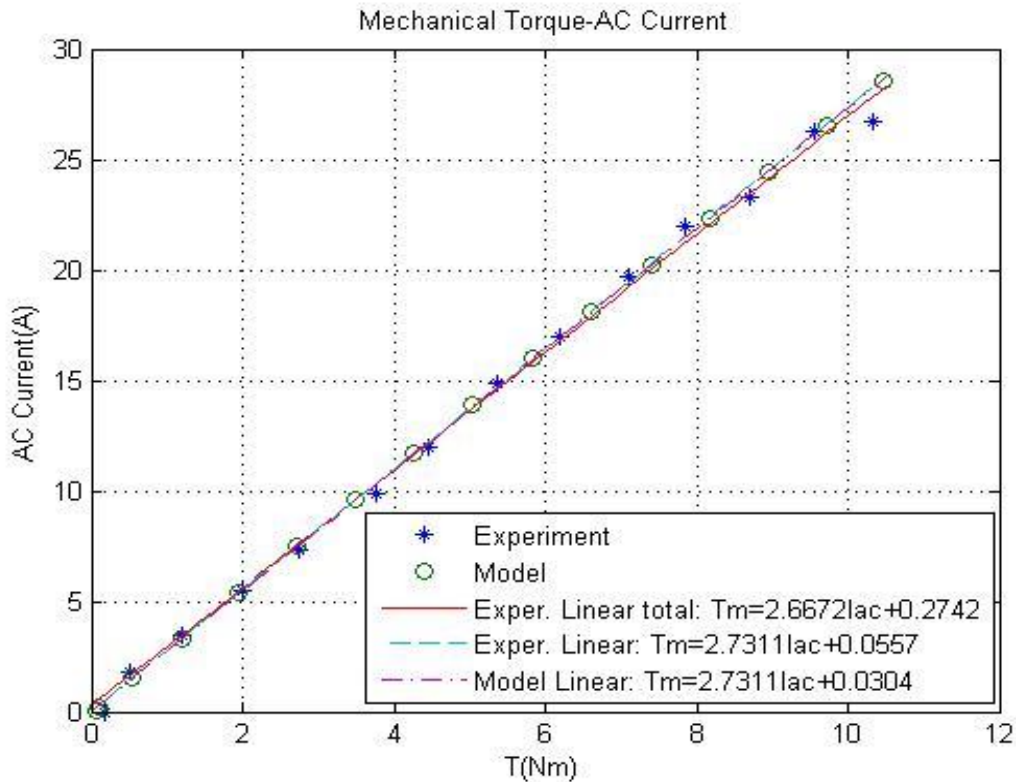


**Σχήμα 5.6:** Η DC τιμή ρεύματος όπως μετρήθηκε στο εργαστήριο και όπως υπολογίστηκε στην προσομοίωση συναρτήσει των στροφών της γεννήτριας.



**Σχήμα 5.7:** Η DC τιμή της ισχύος όπως μετρήθηκε στο εργαστήριο και όπως υπολογίστηκε στην προσομοίωση συναρτήσει των στροφών της γεννήτριας.





**Σχήμα 5.8:** Η μηχανική ροπή όπως μετρήθηκε στο εργαστήριο και όπως υπολογίστηκε στην προσομοίωση συναρτήσει του AC ρεύματος.

Αρχικά, παρατηρούμε ότι η γεννήτρια ξεκινά να τροφοδοτεί τους συσσωρευτές περίπου στις 210 RPM. Το σημείο αυτό εξαρτάται και από την τάση κατωφλίου των διόδων του ανορθωτή, που στην περίπτωσή μας ισούται με 0.7V.

Στο Σχήμα 5.8, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα καθώς και οι εξισώσεις, που προκύπτουν με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, της μηχανικής ροπής συναρτήσει του AC ρεύματος όπως καταγράφηκαν από το πείραμα και το μοντέλο προσομοίωσης. Ο υπολογισμός της εξίσωσης των δύο μεγεθών, στην περίπτωση του πειράματος, έγινε δύο φορές: στην πρώτη λάβαμε υπ' όψιν όλα τα ζεύγη τιμών και προέκυψε η εξίσωση,  $T_m = 2.6672I_{ac} + 0.2742$  (5.1), ενώ στη δεύτερη δε συμπεριλήφθηκε το τελευταίο ζεύγος τιμών καθώς παρατηρήθηκε μεγάλη απόκλιση από τα υπόλοιπα ζεύγη και έτσι προέκυψε η εξίσωση,  $T_m = 2.7311I_{ac} + 0.0557$  (5.2). Πρέπει να σημειωθεί ότι η απόκλιση αυτή στο τελευταίο ζεύγος τιμών οφείλεται σε ανθρώπινο σφάλμα μέτρησης κατά τη διάρκεια του πειράματος αλλά και σε σφάλματα των οργάνων. Επιπρόσθετα, στο μοντέλο προσομοίωσης υπολογίστηκε η εξίσωση της μηχανικής ροπής συναρτήσει του AC ρεύματος,  $T_m = 2.7311I_{ac} + 0.0304$  (5.3).

Παρατηρούμε ότι η κλίση της εξίσωσης του μοντέλου συμπίπτει ακριβώς με την κλίση της εξίσωσης που προκύπτει στην περίπτωση του πειράματος που δε συμπεριλήφθηκε το τελευταίο ζεύγος ροπής-ρεύματος. Επίσης, στην περίπτωση υπολογισμού της εξίσωσης με όλα τα ζεύγη τιμών η κλίση της εξίσωσης έχει απόκλιση 2.3% από την κλίση της εξίσωσης του μοντέλου προσομοίωσης και συνεπώς είναι αποδεκτή. Βλέπουμε, λοιπόν, ότι το μοντέλο μας είναι πάρα πολύ κοντά στην πραγματικότητα και επομένως είναι αξιόπιστο για τη μοντελοποίηση απευθείας σύνδεσης γεννήτριας σε συσσωρευτές. Στον παρακάτω πίνακα 5.4 παρουσιάζονται οι μέγιστες αποκλίσεις των μετρήσεων του πειράματος με τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης για τα γραφήματα 5.3-5.8.

<b>Γράφημα</b>	<b>Μέγιστη απόκλιση(%)</b>
RPM-Vac	0,6
RPM-Iac	6,0
RPM-Vdc	0,2
RPM-Idc	4,9
RPM-Pdc	5,0
Iac-Tm	2,3

**Πίνακας 5.4:** Μέγιστες αποκλίσεις των μετρήσεων του πειράματος με τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης.

Παρατηρούμε πως οι παραπάνω αποκλίσεις είναι μικρότερες από 6% και επομένως είναι αποδεκτές για τη συγκεκριμένη μελέτη.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι ένα χαρακτηριστικό που ορίζει τη λειτουργία του μοντέλου προσομοίωσης είναι η μηχανική ροπή που εισάγεται, συγκεκριμένα, στο μοντέλο της γεννήτριας. Αυτή η παράμετρος εισόδου εκφράζει την κλίση της εξίσωσης της μηχανικής ροπής συναρτήσει του AC ρεύματος η οποία αναλύθηκε προηγουμένως. Πρέπει να σημειωθεί, λοιπόν, πως για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων του μοντέλου που παρουσιάζονται στον πίνακα 5.3, η παράμετρος αυτή έλαβε την τιμή 2.8525 η οποία διαφέρει περίπου 4% από την τιμή της κλίσης της εξίσωσης (5.3) που προκύπτει από τα αποτελέσματα που υπολογίστηκαν στο μοντέλο για την μηχανική ροπή και το ρεύμα ακριβώς μετά τη γεννήτρια. Συνεπώς, αυτό μας καταδεικνύει ότι υπάρχει ένα ποσοστό απωλειών της μηχανικής ροπής στο μοντέλο της γεννήτριας κατά την διεξαγωγή της προσομοίωσης, το οποίο θα πρέπει να συμπεριληφθεί στις μετέπειτα μεταβολές αυτής της παραμέτρου για την ανάλυσή μας.

## **Κεφάλαιο 6: Διεθνές Πρότυπο Μέτρησης Καμπύλης Ισχύος**

### **6.1 Σκοπός του IEC Standard**

Για τη μέτρηση της καμπύλης ισχύος μίας ανεμογεννήτριας έχει καθιερωθεί το διεθνές πρότυπο IEC Standard 61400-12-1 [31], το οποίο ανανεώνεται και αναβαθμίζεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα ώστε να καλύπτονται οι ορθές προδιαγραφές για έναν πιο ολοκληρωμένο υπολογισμό της καμπύλης ισχύος που χαρακτηρίζει μία ανεμογεννήτρια καθώς και την περιοχή τοποθέτησης της. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται προσπάθεια να αναφερθούν τα βασικά σημεία που αφορούν τις αρχές που απαιτούνται να ακολουθηθούν για πιστοποιημένες καμπύλες ισχύος.

Το πρότυπο αυτό καθορίζει μία συγκεκριμένη διαδικασία για τη μέτρηση των χαρακτηριστικών της ισχύος μίας μεμονωμένης ανεμογεννήτριας. Αφορά όλες τις ανεμογεννήτριες, ανεξαρτήτως ονομαστικής ισχύος, και για σύνδεση είτε με το ηλεκτρικό δίκτυο είτε με σύστημα συσσωρευτών. Η διαδικασία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για εκτίμηση της απόδοσης μιας συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας σε συγκεκριμένη τοποθεσία είτε για την εξαγωγή γενικών συμπερασμάτων για τη σύγκριση μεταξύ διάφορων τύπων ανεμογεννητριών.

Η καμπύλη ισχύος υπολογίζεται από τη συλλογή ταυτόχρονων μετρήσεων της ταχύτητας ανέμου και της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος για μια συγκεκριμένη τοποθεσία και για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, ώστε να σχηματιστεί μία καλή εικόνα η οποία θα περιλαμβάνει επαρκή βάση δεδομένων για ένα φάσμα ταχυτήτων. Επίσης, ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της ανεμογεννήτριας είναι η ετήσια αναμενόμενη ενεργειακή παραγωγή, ΑΕΠ, που προκύπτει από το συνδυασμό της καμπύλης ισχύος με την κατανομή συχνότητας της ταχύτητας ανέμου.

### **6.2 Βασικά Κριτήρια**

#### **6.2.1 Τοποθεσία πεδίου δοκιμών ανεμογεννήτριας**

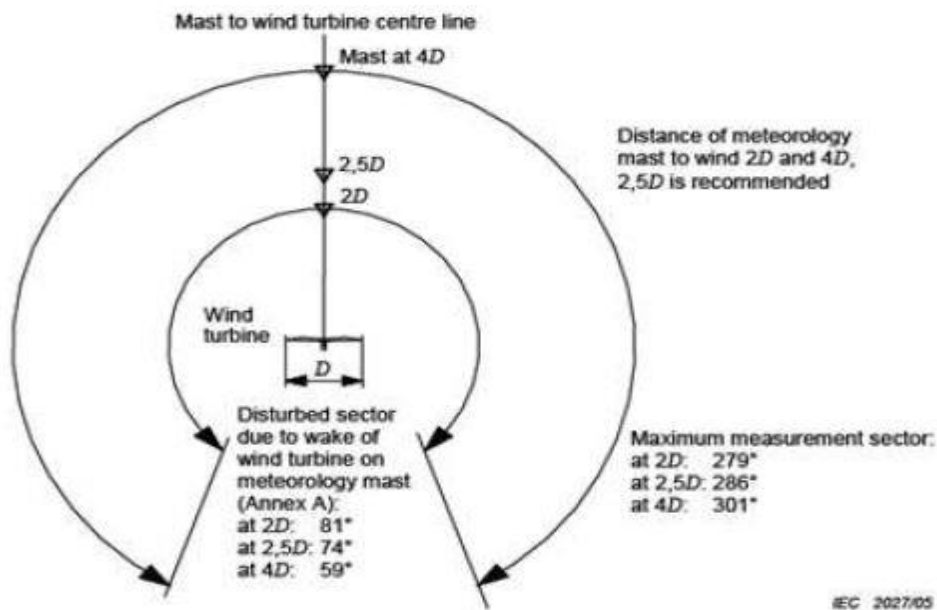
Στο πεδίο δοκιμών, εκτός του πύργου που θα εγκατασταθεί η ανεμογεννήτρια, πρέπει να τοποθετηθεί ένας μετεωρολογικός ιστός κοντά στην ανεμογεννήτρια για να καθοριστεί η ταχύτητα του ανέμου. Επομένως, είναι προφανές πως η τοποθεσία παίζει σπουδαίο ρόλο και έχει σημαντική επίδραση στη μετρούμενη απόδοση της ανεμογεννήτριας. Ειδικότερα, πρέπει να αναφερθεί πως μεγάλη σημασία για το πεδίο δοκιμών έχουν οι παράγοντες που προκαλούν ριπές ανέμου, και συνεπώς διαφοροποίηση της ταχύτητας ανέμου στο μετεωρολογικό ιστό και στο δρομέα της ανεμογεννήτριας. Τέτοιοι παράγοντες είναι η τοπογραφική ανομοιομορφία, οι

γειτονικές ανεμογεννήτριες και τα διάφορα εμπόδια όπως είναι κτίρια, δέντρα κτλ που υπάρχουν στην περιοχή.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην τοποθέτηση του μετεωρολογικού ιστού. Δε θα πρέπει να τοποθετηθεί πολύ κοντά στην ανεμογεννήτρια, καθώς θα επηρεάσει την ταχύτητα του ανέμου μπροστά από την ανεμογεννήτρια. Επίσης, δεν πρέπει να τοποθετηθεί πολύ μακριά από την ανεμογεννήτρια, αφού δε θα υπάρχει σαφής συσχέτιση της ταχύτητας ανέμου και της παραγωγής της ισχύος στην ανεμογεννήτρια. Κατάλληλη απόσταση μεταξύ του μετεωρολογικού ιστού και της ανεμογεννήτριας είναι 2-4 φορές η διάμετρος της φτερωτής και συνίσταται ως βέλτιστη επιλογή η απόσταση να είναι ίση με 2.5 φορές το μήκος της διαμέτρου του δρομέα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η καλύτερη τοποθέτηση του μετεωρολογικού ιστού είναι η προσήνεμη διάταξη και μπροστά από την ανεμογεννήτρια, από τη μεριά της φτερωτής, στην κατεύθυνση στην οποία αναμένεται ο επικρατέστερος άνεμος κατά τη διάρκεια των δοκιμών.

### 6.2.2 Τομέας έγκυρων μετρήσεων

Για την έγκυρη μέτρηση της καμπύλης ισχύος, θα πρέπει να αποκλειστούν κατευθύνσεις που έχουν σημαντικά εμπόδια ή άλλες ανεμογεννήτριες, είτε στη μεριά του ιστού είτε της ανεμογεννήτριας. Επιπλέον, απαιτείται να αποκλειστούν οι αλλοιωμένοι τομείς που οφείλονται στο «ίχνος» του ανέμου από την ανεμογεννήτρια και παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.1.

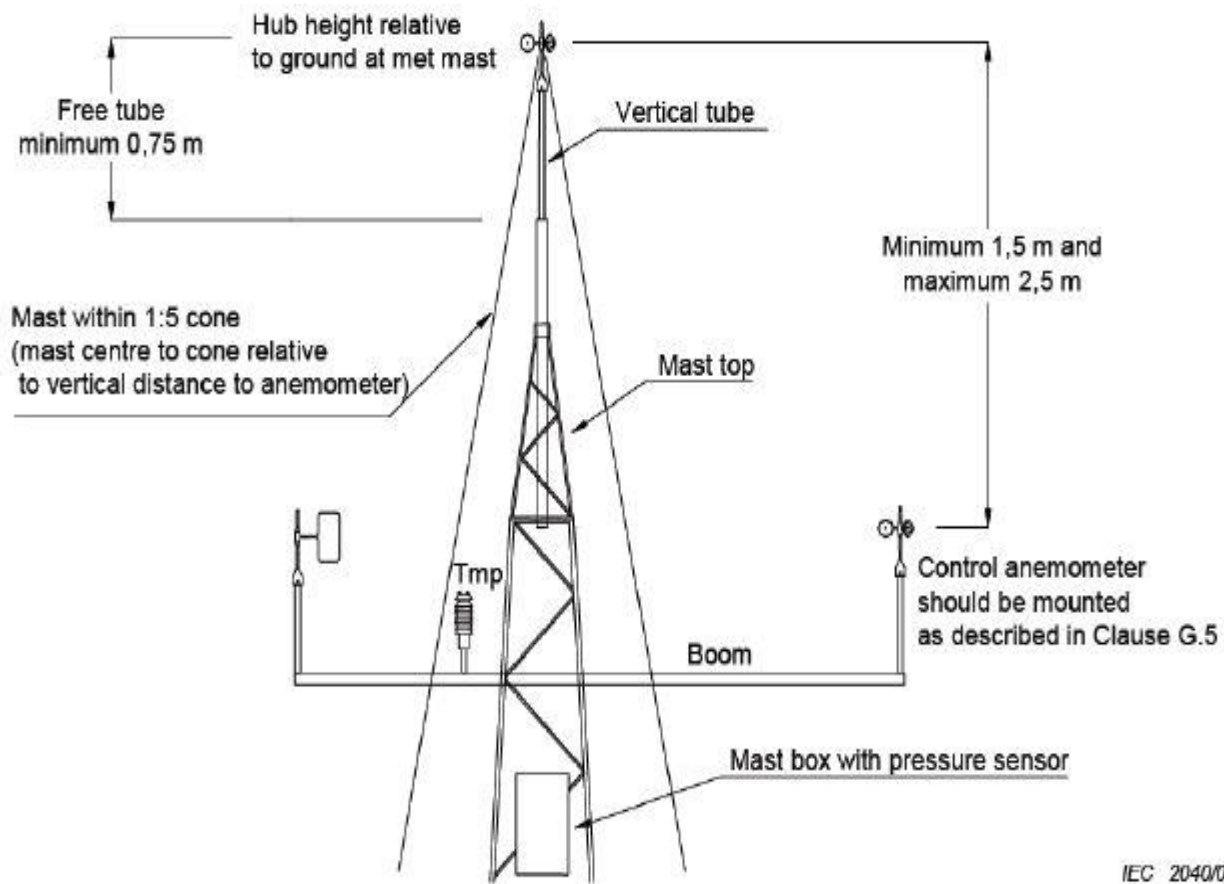


**Σχήμα 6.1:** Οι αλλοιωμένοι τομείς που πρέπει να αποκλειστούν λόγω του «ίχνους» του ανέμου από την ανεμογεννήτρια.

### 6.2.3 Εξοπλισμός μετρήσεων

Όσον αφορά τη διαδικασία των ηλεκτρικών μετρήσεων θα πρέπει να υπάρχουν μετρητικά όργανα ισχύος ή ρεύματος και τάσης για κάθε φάση της ανεμογεννήτριας. Η ακρίβεια τους θα πρέπει να είναι τουλάχιστον της τάξεως του 0.5%. Επιπλέον, θα πρέπει να καθορίζεται στην τελική αναφορά σε ποιο σημείο του κυκλώματος της σύνδεσης με τη συστοιχία των μπαταριών λαμβάνουν χώρα οι μετρήσεις, για παράδειγμα αν γίνονται πριν τον ανορθωτή ή τη μπαταρία ή μετά τη γεννήτρια κτλ.

Όσον αφορά την καταγραφή των μετεωρολογικών δεδομένων απαιτείται κυπελλοφόρο ανεμόμετρο τάξεως 1.7A ή και καλύτερο, στο οποίο θα πρέπει να πραγματοποιείται βαθμονόμηση ανά δύο χρόνια περίπου. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και δεύτερο ανεμόμετρο για την επιβεβαίωση των μετρήσεων του πρώτου (control anemometer). Επιπρόσθετα, είναι απαραίτητος ο ανεμοδείκτης για τη μέτρηση της κατεύθυνσης του ανέμου και αισθητήρες μέτρησης της πίεσης, της θερμοκρασίας και της υγρασίας. Η τοποθέτηση τους στον ιστό παρουσιάζεται στο σχήμα 6.2.



Σχήμα 6.2: Τοποθέτηση μετεωρολογικών αισθητήρων στον ιστό.

Τα προ επεξεργασίας δεδομένα των παραπάνω αισθητήρων πρέπει να συλλέγονται και να αποθηκεύονται από ένα ψηφιακό καταγραφικό σύστημα με ρυθμό δειγματοληψίας για κάθε κανάλι (σήμα) τουλάχιστον 1 Hz, δηλαδή μετρήσεις δευτερολέπτου. Στη συνέχεια, μπορούν να αποθηκεύονται είτε τα δειγματοληπτικά δεδομένα απευθείας είτε κατόπιν επεξεργασίας τα στατιστικά δεδομένα 10 λεπτών με χαρακτηριστικά που αφορούν τα ακόλουθα:

- Μέση τιμή
- Διακύμανση τιμών για χρονική διάρκεια 10 λεπτών
- Μέγιστη τιμή
- Ελάχιστη τιμή

#### 6.2.4 Επεξεργασία μετρήσεων – Βάση δεδομένων

Μετά τον υπολογισμό της μέσης τιμής ανά 10 λεπτά για κάθε μέγεθος, θα πρέπει να γίνει διαχωρισμός των δεδομένων για την ταχύτητα του ανέμου χρησιμοποιώντας τη "μέθοδο των διαστημάτων (bins)". Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, το φάσμα των μετρούμενων ταχυτήτων χωρίζεται από συνεχόμενα διαστήματα πλάτους 0.5m/s το καθένα, στα οποία το κέντρο τους θα είναι πολλαπλάσιο των 0.5 m/s. Τα αποκτηθέντα δεδομένα θα πρέπει να καλύπτουν ένα φάσμα ταχυτήτων που να κυμαίνεται από ταχύτητα ανέμου 1m/s πιο χαμηλά από την ταχύτητα ένταξης της ανεμογεννήτριας μέχρι την ταχύτητα που ισούται με 1.5 φορές την ταχύτητα του ανέμου που αντιστοιχεί στο 85% της ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννήτριας. Διαφορετικά, η ταχύτητα του ανέμου θα πρέπει να εκτείνεται από ταχύτητα ανέμου 1m/s πιο χαμηλά από την ταχύτητα  $v_{cut-in}$  μέχρι την ταχύτητα στην οποία η μετρούμενη αναμενόμενη ενεργειακή παραγωγή, ΑΕΠ, είναι μεγαλύτερη ή ίση με το 95% της προσεγγιστικής ΑΕΠ.

Η βάση δεδομένων, άρα και η μέτρηση της καμπύλης ισχύος, θεωρείται ολοκληρωμένη και επαρκής, όταν πλέον ικανοποιεί τα παρακάτω δύο κριτήρια:

- κάθε διάστημα (bin) τιμών να περιέχει τουλάχιστον δεδομένα 30 λεπτών,
- η βάση δεδομένων να περιλαμβάνει τουλάχιστον συνολικά δεδομένα 180 ωρών.

Εάν υπάρχει ένα διάστημα για το οποίο δεν υπάρχουν δεδομένα, είναι δυνατό να ολοκληρωθεί η καμπύλη ισχύος με εύρεση της τιμής του διαστήματος από γραμμική παρεμβολή των δύο γειτονικών του διαστημάτων. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί εξίσου να διευρυνθεί το εύρος των ταχυτήτων ανέμου για ταχύτητες μεγαλύτερες από το φάσμα που ορίστηκε παραπάνω.

### 6.2.5 Καθορισμός της μετρούμενης καμπύλης ισχύος

Η μετρούμενη καμπύλη ισχύος καθορίζεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των διαστημάτων για τα κανονικοποιημένα σύνολα δεδομένων και υπολογίζοντας τη μέση τιμή των κανονικοποιημένων τιμών της ταχύτητας του ανέμου και της ισχύος για κάθε διάστημα ξεχωριστά, σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$v_i = \frac{1}{N_i} \cdot \sum_{j=1}^{N_i} v_{n,i,j} \quad (6.1)$$

$$P_i = \frac{1}{N_i} \cdot \sum_{j=1}^{N_i} P_{n,i,j} \quad (6.2)$$

όπου,

- $v_i$ , η κανονικοποιημένη μέση τιμή της ταχύτητας ανέμου στο διάστημα  $i$
- $v_{n,i,j}$ , η κανονικοποιημένη ταχύτητα ανέμου του συνόλου δεδομένων  $j$  στο διάστημα  $i$
- $P_i$ , η κανονικοποιημένη μέση τιμή της παραγόμενης ισχύος στο διάστημα  $i$
- $P_{n,i,j}$ , η κανονικοποιημένη παραγόμενη ισχύς του συνόλου δεδομένων  $j$  στο διάστημα  $i$
- $N_i$ , το πλήθος των συνόλων των 10 λεπτών που ανήκουν στο διάστημα  $i$

### 6.2.6 Υπολογισμός της ετήσιας ενεργειακής παραγωγής

Η αναμενόμενη ενεργειακή παραγωγή εκτιμάται εφαρμόζοντας την υπολογισμένη καμπύλη ισχύος σε διαφορετικές σχετικές κατανομές ανέμου. Συνίσταται να χρησιμοποιείται η στατιστική κατανομή Rayleigh, στην οποία αναφερθήκαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, που αποτελεί κατανομή Weibull με παράμετρο μορφής  $k=2$ . Η εκτίμηση της ΑΕΠ ενδείκνυται να γίνεται για κατανομές ανέμου με μέση τιμή ταχύτητας ανέμου 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 και 11 m/s, σύμφωνα με τη σχέση .3. Σε αυτό το σημείο να αναφερθεί πως στο πεδίο δοκιμών “Μελτέμι” στη Ραφήνα όπου διεξήχθη το πείραμα, η μέση τιμή της ταχύτητας ανέμου ήταν 5m/s.

$$AEP = N_h \frac{1}{1000} \cdot \sum_{i=1}^N [F(v_i) - F(v_{i-1})] \cdot \left( \frac{P_{i-1} + P_i}{2} \right) \quad (6.3)$$

όπου,

- $AEP$ , η ετήσια αναμενόμενη ενεργειακή παραγωγή ( $kWh$ )
- $N_h$ , οι ώρες ενός έτους  $N_h \approx 8760 h$
- $N$ , ο αριθμός των διαστημάτων των ταχυτήτων

- $v_i$ , η ταχύτητα που αντιστοιχεί στο διάστημα  $I$  ( $m/s$ )
- $F(v_i)$ , η τιμή της αθροιστικής συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας Rayleigh για το διάστημα  $I$  (σχέση 6.4)
- $P_i$ , η ισχύς που αντιστοιχεί στο διάστημα  $I$  ( $Watt$ )

$$F(v) = 1 - e^{\left[-\frac{\pi}{4}\left(\frac{v}{v_{mean}}\right)^2\right]} \quad (6.4)$$

όπου,

- $v_{mean}$ , η μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου στο ύψος του δρομέα ( $m/s$ )

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, υπάρχουν δύο τρόποι υπολογισμού της ΑΕΠ, η μετρούμενη ΑΕΠ και η προσεγγιστική ΑΕΠ. Η πρώτη προκύπτει από τη μετρούμενη καμπύλη ισχύος και σύμφωνα με τις σχέσεις 6.3 και 6.4, θεωρώντας μηδενική παραγόμενη ισχύ για όλους τις ταχύτητες ανέμου που βρίσκονται εκτός του διαστήματος ταχυτήτων ανέμου για το οποίο υπολογίστηκε η καμπύλη ισχύος. Η προσεγγιστική ΑΕΠ προκύπτει θεωρώντας μηδενική παραγόμενη ισχύ στις χαμηλότερες, από την ταχύτητα ένταξης, ταχύτητες ανέμου και σταθερή παραγόμενη ισχύ για τις ταχύτητες από τη μέγιστη ταχύτητα, για την οποία υπάρχουν δεδομένα, μέχρι και την ταχύτητα αποκοπής. Η σταθερή αυτή παραγόμενη ισχύς θα πρέπει να είναι ίση με την υπολογισμένη ισχύ που προκύπτει για το διάστημα με την μεγαλύτερη ταχύτητα ανέμου, θυμίζοντας την καμπύλη ισχύος μίας ανεμογεννήτριας με έλεγχο του βήματος των πτερυγίων (pitch control).

### 6.2.7 Υπολογισμός βαθμού απόδοσης

Ένα άλλο μέγεθος που απαιτείται να υπάρχει στην τελική αναφορά, σύμφωνα με το πρότυπο, είναι ο βαθμός απόδοσης  $C_p$ , που ουσιαστικά αποτελεί το γινόμενο της συνολικής απόδοσης της ανεμογεννήτριας επί τον αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος  $c_p$ . Εκφράζει το λόγο της παραγόμενης ισχύος προς τη διαθέσιμη αιολική ισχύ που προσκρούει στην επιφάνεια της φτερωτής. Επομένως, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_{p,i} = \frac{P_i}{\frac{1}{2}\rho_o A v_i^3} \quad (6.5)$$

όπου,

- $C_{p,i}$ , ο βαθμός απόδοσης για το διάστημα  $i$
- $V_i$ , η ταχύτητα που αντιστοιχεί στο διάστημα  $I$  ( $m/s$ )
- $P_i$ , η ισχύς που αντιστοιχεί στο διάστημα  $i$  ( $Watt$ )



- $\rho_o$  , η πυκνότητα του αέρα ( $kg/m^3$ )
- $A$  , η επιφάνεια της φτερωτής που ισούται με  $\pi R^2$  ( $m^2$ )

### 6.3 Μέτρηση καμπύλης ισχύος στις μικρές ανεμογεννήτριες

Όσα αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους ισχύουν γενικά για όλες τις ανεμογεννήτριες, παρόλα αυτά για τις μικρές ισχύος ανεμογεννήτριες σύμφωνα με το πρότυπο IEC είναι αναγκαίο να υπάρχουν κάποιες τροποποιήσεις και ειδική μέριμνα όσον αφορά τη μέτρηση της καμπύλης ισχύος τους. Στην παράγραφο αυτή αναφέρονται οι σημαντικότερες εξ αυτών.

- Για την ελαχιστοποίηση των διαφορών στα αποτελέσματα λόγω της καλωδίωσης μεταξύ της ανεμογεννήτριας και του φορτίου, η σύνδεση του φορτίου δεν θα πρέπει να είναι σε μικρότερη απόσταση από τη βάση του ιστού της ανεμογεννήτριας και σε μεγαλύτερη απόσταση από το τριπλάσιο μήκος του πυλώνα. Εάν δεν υπάρχουν προδιαγραφές για τη διάμετρο των καλωδίων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν, θα πρέπει να γίνει διαστασιοποίηση τους ώστε η πτώση τάσης μεταξύ ανεμογεννήτριας και φορτίου να είναι ίση με το 10% της τάσης εξόδου.
- Στις μικρές ανεμογεννήτριες, το ανεμόμετρο μπορεί να τοποθετηθεί σε βραχίονα πάνω στον ιστό της ανεμογεννήτριας, χωρίς την εγκατάσταση μετεωρολογικού ιστού. Για την ελαχιστοποίηση της επιρροής από το "ίχνος" ανέμου του ανεμόμετρου, ο ανεμοδείκτης απαιτείται να τοποθετείται τουλάχιστον 3 μέτρα μακριά από το χαμηλότερο σημείο του δρομέα. Επιπλέον, το ανεμόμετρο και οι άλλοι αισθητήρες θα πρέπει να τοποθετούνται σε απόσταση από το ύψος της γεννήτριας περίπου 1.5 φορές μεγαλύτερη από τη διάμετρο της φτερωτής.
- Τα δεδομένα πριν υποστούν επεξεργασία θα πρέπει να είναι διάρκειας ενός λεπτού. Στις μικρές ανεμογεννήτριες οι αναφορές που έγιναν στις προηγούμενες παραγράφους σε μέση τιμή δεκαλέπτων θα πρέπει να γίνονται για μέση τιμή ενός λεπτού, λόγω της μεγάλης διακύμανσης των μετρήσεων και των πολλών στροφών που αναπτύσσονται στο δρομέα.
- Η μελέτη της καμπύλης ισχύος σε μικρή ανεμογεννήτρια θεωρείται ολοκληρωμένη, όπως αντίστοιχα ισχύουν για τις μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 6.2.4, όταν ικανοποιεί τα παρακάτω κριτήρια:
  - Κάθε διάστημα (bin) ταχύτητας ανέμου μεταξύ της ταχύτητας που είναι 1 m/s χαμηλότερα από τη  $v_{cut-in}$  και τα 13.5 m/s θα πρέπει να περιέχει τουλάχιστον δεδομένα 10 λεπτών δηλαδή δέκα δεδομένα του ενός λεπτού.
  - Η συνολική βάση δεδομένων θα πρέπει να περιέχει σύνολα δεδομένων τουλάχιστον 60 ωρών λειτουργίας της ανεμογεννήτριας.

- Σε περιπτώσεις ανεμογεννήτριας με furling, η βάση δεδομένων θα πρέπει να περιέχει ολοκληρωμένα δεδομένα για τα διαστήματα ταχυτήτων, στα οποία η ανεμογεννήτρια βρίσκεται σε κατάσταση furling, ώστε να φαίνεται στην καμπύλη ισχύος η μείωση της παραγόμενης ισχύος μετά την ονομαστική ταχύτητα ανέμου.
- Σε περιπτώσεις που η μικρή ανεμογεννήτρια δε σταματάει να λειτουργεί σε υψηλούς ανέμους, η μετρούμενη και η προσεγγιστική ΑΕΠ πρέπει να υπολογίζονται θεωρώντας ως ταχύτητα αποκοπής τη μέγιστη ταχύτητα που έχει καταγραφεί και υπάρχει σε bin με πλήρη δεδομένα (10 τουλάχιστον δεδομένα ενός λεπτού) ή τα 25 m/s, αναλόγως ποια από τις δύο ταχύτητες είναι μεγαλύτερη.

## **Κεφάλαιο 7: Μέτρηση μικρής ανεμογεννήτριας σε πεδίο δοκιμών**

Για τη συνολική επαλήθευση του μοντέλου ανάλυσης και σύνδεσης μιας ανεμογεννήτριας με συσσωρευτές πραγματοποιήθηκε πείραμα στο πεδίο δοκιμών στη Ραφήνα. Συγκεκριμένα συνδέθηκε η μικρή ανεμογεννήτρια 850W σε συστοιχία συσσωρευτών 48V, που κατασκευάστηκε από φοιτητές σύμφωνα με τα πρότυπα του σχεδιαστή μικρών ανεμογεννητριών Hugh Piggot ([2], [6]) και μετρήθηκε η γωνία Furling καθώς και η καμπύλη ισχύος για την επιβεβαίωση των θεωρητικών αποτελεσμάτων του μοντέλου προσομοίωσης. Όσον αφορά την ανεμογεννήτρια, πρόκειται για μία σύγχρονη ηλεκτρική γεννήτρια αξονικής ροής μονίμων μαγνητών με 6 ζεύγη πόλων. Τα πτερύγια της είναι τρία με μήκος 1,2m το καθένα, ενώ είναι κατασκευασμένα από ξύλο. Επιπλέον, διαθέτει ουρά η οποία χρησιμεύει στον προσανατολισμό της στην κύρια κατεύθυνση του ανέμου, αλλά και στην απομάκρυνσή της από αυτή όταν πνέουν υψηλοί άνεμοι για την εξασφάλιση της προστασίας των πτερυγίων της έλικας μέσω της μείωσης της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα. Το σύστημα αυτό ονομάζεται Furling και αποτελεί είδος παθητικού ελέγχου και έχει ήδη αναλυθεί στο κεφάλαιο 1.

Η υποδομή του πεδίου δοκιμών επιτρέπει την εγκατάσταση και τη δοκιμή μικρών ανεμογεννητριών με διάμετρο δρομέα από 1.2 έως 7.2m. Η ανεμογεννήτρια τοποθετήθηκε σε μεταλλικό πύργο ύψους 12m, κατάλληλης διαμέτρου και πάχους σύμφωνα με το πρότυπο IEC Standard 61400-12-1. Επιπλέον, ο πύργος υποστηρίζεται από 2 σετ σχοινιών, το πρώτο τοποθετείται στα 6m και το δεύτερο στα 12m, με 4 συρματόσχοινα το καθένα σε γωνία 90 μοιρών μεταξύ τους και τα συρματόσχοινα τοποθετούνται σε τσιμεντόλιθους στο επίπεδο του εδάφους. Οι προδιαγραφές των συρματόσχοινων και των τσιμεντόλιθων αντέχουν ταχύτητες ανέμου μέχρι και 40 m/s στην περίπτωση που η ανεμογεννήτρια έχει δρομέα διαμέτρου 7.6m.

### **7.1 Εξοπλισμός μέτρησης της γωνίας Furling και αποτελέσματα**

Για τη συλλογή των απαραίτητων αεροδυναμικών μετρήσεων της ανεμογεννήτριας χρησιμοποιούνται αισθητήρες με απλά ποτενσιόμετρα καθώς και ουρά η οποία χρησιμεύει στον προσανατολισμό της στην κύρια κατεύθυνση του ανέμου, αλλά και στην απομάκρυνσή της από αυτή όταν πνέουν υψηλοί άνεμοι. Οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της σταθερής γωνίας  $\gamma_{aw}$  καθώς και της γωνίας Furling για διάφορες τιμές ταχύτητας ανέμου. Στο Σχήμα 7.1 και 7.2 παρουσιάζονται οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση αντίστοιχα της γωνίας  $\gamma_{aw}$  και της γωνίας Furling στο πεδίο δοκιμών στη Ραφήνα.



**Σχήμα 7.1:** Αισθητήρας μέτρησης γωνίας Yaw στο πεδίο δοκιμών.



**Σχήμα 7.2:** Αισθητήρας μέτρησης γωνίας Furling στο πεδίο δοκιμών.

Όσον αφορά τη μέτρηση της γωνίας Furling, ο αισθητήρας διαθέτει αντίσταση ποτενσιόμετρου και αναλόγως τη διεύθυνση στην οποία δείχνει η ουρά της ανεμογεννήτριας αυξομειώνει την αντίσταση ώστε να δημιουργείται η κατάλληλη πτώση τάσης και να παράγει ένα αναλογικό σήμα εξόδου σε Volt. Η σχέση μεταξύ αυτής της πτώσης τάσης σε Volt και της γωνίας Furling

σε Degrees είναι γραμμική. Επομένως, μετρώντας την τιμή της πτώσης τάσης για γωνιακή θέση της ουράς 0° και 90° προκύπτει η κάτωθι σχέση:

$$Furling\ Angle(Deg) = -\frac{Furling\ Volts - 3.859}{0.01925}$$

Συνεπώς, σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61400-12-1, μετρήθηκε η πτώση τάσης στην αντίσταση του ποτενσιόμετρου και στη συνέχεια υπολογίστηκε η γωνία Furling για bins (διαστήματα) ταχυτήτων ανέμου με κέντρο 0.5m/s. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τη γωνία Furling για εύρος ταχυτήτων 2.5m/s έως 25.5m/s:

Vw Bins (m/s)	Furling Volts (V)	Furling Angle (Degrees)
2,5	4,441786	0,856129
3	4,445299	0,756581
3,5	4,461730	0,291016
4	4,486856	-0,420945
4,5	4,492400	-0,578032
5	4,491468	-0,551647
5,5	4,485388	-0,379358
6	4,477441	-0,154162
6,5	4,471045	0,027054
7	4,465692	0,178730
7,5	4,435803	1,025647
8	4,343930	3,628897
8,5	4,188899	8,021761
9	3,985275	13,791532
9,5	3,783454	19,510202
10	3,609143	24,449364
10,5	3,457682	28,741057
11	3,316063	32,753894
11,5	3,180538	36,594035
12	3,036686	40,670116
12,5	2,896172	44,651631
13	2,759462	48,525372
13,5	2,645203	51,762936
14	2,533427	54,930153
14,5	2,412946	58,344025
15	2,296821	61,634456
15,5	2,172117	65,167987
16	2,051412	68,588201
16,5	1,939958	71,746313
17	1,843128	74,490014
17,5	1,756930	76,932460

Vw Bins (m/s)	Furling Volts (V)	Furling Angle (Degrees)
18	1,689415	78,845530
18,5	1,634339	80,406126
19	1,590906	81,636825
19,5	1,558448	82,556531
20	1,535198	83,215317
20,5	1,530427	83,350504
21	1,521562	83,601704
21,5	1,512135	83,868821
22	1,481233	84,744445
22,5	1,494707	84,362656
23	1,495104	84,351404
23,5	1,484741	84,645051
24	1,476289	84,884520
24,5	1,482346	84,712896
25	1,460529	85,331081
25,5	1,456750	85,438172

**Πίνακας 7.1:** Μετρήσεις της γωνίας Furling στο πεδίο δοκιμών “Μελέμι” στη Ραφήνα.

Τέλος, με τη βοήθεια της ουράς και του δεύτερου αισθητήρα μετρήθηκε η σταθερή γωνία yaw του συστήματος γνωρίζοντας ότι η σχέση για τον αισθητήρα yaw και την τροχαλία στον ιστό είναι 1:1.

$$\text{Angle Yaw} = -18.5 \text{ (Deg)}$$

Συνεπώς, με τις παραπάνω τιμές του πίνακα 7.1 για τη γωνία Furling (Degrees) σε διάφορες ταχύτητες ανέμου υπολογίστηκε, με τη βοήθεια του Matlab και συγκεκριμένα της λειτουργίας Curve Fitting, η εξίσωση που περιγράφει τη σχέση των δύο μεγεθών:

$$\begin{aligned} \text{Furling Angle} = & 84.68 * \sin(0.1267 * v_w - 0.7201) + 24.98 * \sin(0.2513 * v_w + 1.532) \\ & + 8.122 * \sin(0.5099 * v_w + 0.6067) + 4.909 * \sin(0.7695 * v_w - 0.4756) \\ & + 1.513 * \sin(0.7744 * v_w + 2.156) + 0.5174 * \sin(1.598 * v_w - 1.722) \\ & + 0.2594 * \sin(1.305 * v_w - 0.3678) + 0.3166 * \sin(1.898 * v_w + 2.557) \end{aligned}$$

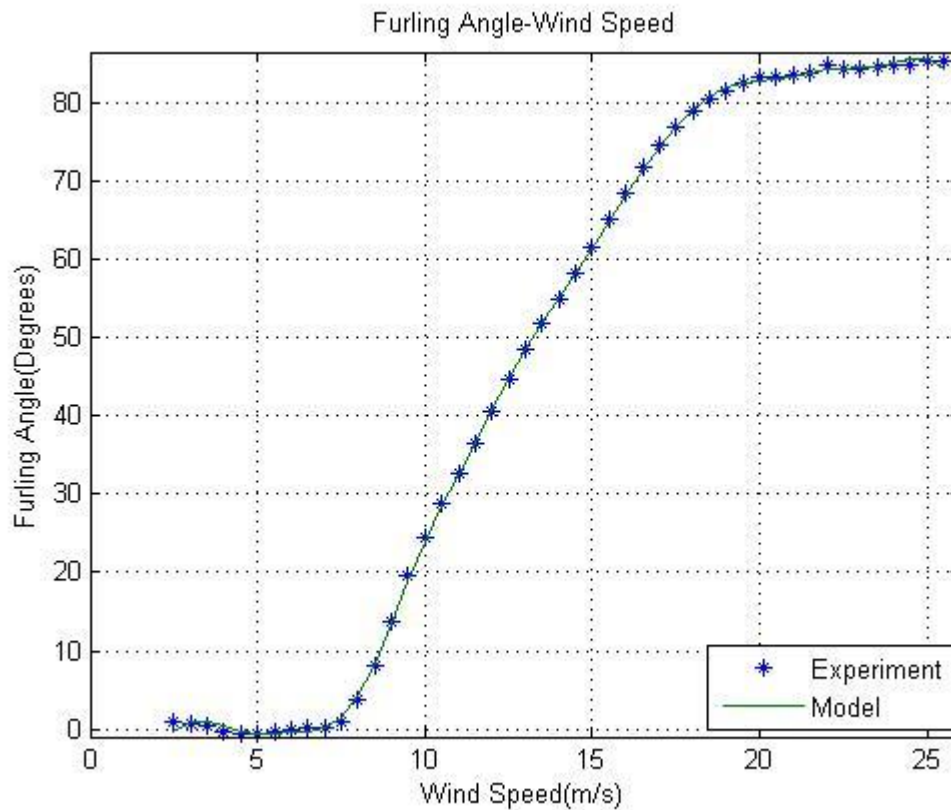
Η παραπάνω σχέση εισάγεται στο μοντέλο της φτερωτής για τον υπολογισμό της γωνίας Furling στο μοντέλο προσομοίωσης. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται στον πίνακα 7.2 τα αποτελέσματα της γωνίας Furling σε διάφορες τιμές ταχύτητας ανέμου που προκύπτουν μέσω της λειτουργίας Curve Fitting του Matlab.

<b>Vw (m/s)</b>	<b>Furling Angle (Degrees)</b>
2,5	-0,370285
3	0,972859
3,5	0,989794
4	0,370056
4,5	-0,234163
5	-0,504764
5,5	-0,504755
6	-0,445881
6,5	-0,356030
7	0,095370
7,5	1,471302
8	4,223502
8,5	8,379335
9	13,486810
9,5	18,856439
10	23,926455
10,5	28,501147
11	32,721441
11,5	36,829878
12	40,930783
12,5	44,922083
13	48,621162
13,5	51,953775
14	55,041108
14,5	58,120016
15	61,372324
15,5	64,803743
16	68,257119
16,5	71,527181
17	74,469124
17,5	77,019812
18	79,144020
18,5	80,788066
19	81,905691
19,5	82,536495
20	82,849614
20,5	83,084252
21	83,413009
21,5	83,838113
22	84,220518
22,5	84,433272

Vw (m/s)	Furling Angle (Degrees)
23	84,511561
23,5	84,650912
24	85,015680
24,5	85,483025
25	85,528834
25,5	84,382049

**Πίνακας 7.2:** Αποτελέσματα της γωνίας Furling που προκύπτουν από Curve Fitting.

Με βάση τα δεδομένα που παρουσιάζονται στους παραπάνω πίνακες, σχεδιάζεται η γραφική (Σχήμα 7.3) με τις μετρήσεις του πειράματος για τη γωνία Furling σε σύγκριση με τα αποτελέσματα που προκύπτουν μέσω της λειτουργίας Curve Fitting του Matlab.



**Σχήμα 7.3:** Η γωνία Furling όπως μετρήθηκε στο πεδίο δοκιμών “Μελέμι” και όπως υπολογίστηκε μέσω της λειτουργίας Curve Fitting συναρτήσεως της ταχύτητας ανέμου.



## 7.2 Μέτρηση της καμπύλης ισχύος μικρής ανεμογεννήτριας

### 7.2.1 Εξοπλισμός ηλεκτρικών μετρήσεων

Για τη συλλογή των απαραίτητων ηλεκτρικών δεδομένων της ανεμογεννήτριας χρησιμοποιούνται οι αισθητήρες που παρουσιάζονται στον πίνακα 7.3. Συγκεκριμένα, καταγράφονται τρεις AC τιμές τάσης και τρεις τιμές AC ρεύματος πριν τον ανορθωτή καθώς και η συχνότητα του AC σήματος μέσω της οποίας υπολογίζεται η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα (RPM). Επιπλέον, καταγράφεται η DC τάση και το DC ρεύμα που ρέει για τη φόρτιση των μπαταριών. Με τον τρόπο αυτό, σχεδιάζεται η καμπύλη ισχύος με όλα τα σχετικά στοιχεία, συμπεριλαμβανομένων των απωλειών στο καλώδιο που συνδέει τη γεννήτρια με τους συσσωρευτές. Σε αυτό το σημείο να τονιστεί ότι η απόσταση της γεννήτριας από τις μπαταρίες υπολογίζεται σύμφωνα με το πρότυπο IEC Standard 61400-12-1 και επίσης όλοι οι αισθητήρες βαθμονομούνται μία φορά κάθε χρόνο ώστε να ικανοποιούν τις απαιτήσεις ακρίβειας του προτύπου.

Τύπος αισθητήρα	Μοντέλο
Φάση R (Τάση AC)	LV25-P
Φάση S (Τάση AC)	LV25-P
Φάση T (Τάση AC)	LV25-P
DC Τάση	LV25-P
Φάση R (Ρεύμα AC)	CSNR151
Φάση S (Ρεύμα AC)	CSNR151
Φάση T (Ρεύμα AC)	CSNR151
DC Ρεύμα	CSNR151

**Πίνακας 7.3:** Αισθητήρες ηλεκτρολογικών μετρήσεων.

Το εύρος των ρευμάτων που μπορούν να μετρήσουν με ακρίβεια 0,5% οι αισθητήρες ρεύματος CSNR151 είναι  $\pm 200$  A, με ονομαστικό ρεύμα μέτρησης τα 125 A, ενώ οι αισθητήρες τάσης μπορούν να μετρήσουν τάσεις μέχρι 1500 V με ακρίβεια 0,8%.

### 7.2.2 Εξοπλισμός μετεωρολογικών μετρήσεων

Για τη συλλογή των απαραίτητων μετεωρολογικών δεδομένων της ανεμογεννήτριας χρησιμοποιούνται οι αισθητήρες που παρουσιάζονται στον πίνακα 7.4, οι οποίοι τοποθετούνται σε ξεχωριστό ιστό που βρίσκεται 9m μακριά από την εγκατεστημένη μικρή ανεμογεννήτρια. Η τοποθέτηση των αισθητήρων καθορίζεται από το πρότυπο IEC Standard 61400-12-1 καθώς και η οριζόντια τοποθέτηση του ανεμόμετρου που εξαρτάται από τη διάμετρο του δρομέα της ανεμογεννήτριας που βρίσκεται υπό δοκιμή.

<b>Αισθητήρας</b>	<b>Μοντέλο</b>
Ανεμόμετρο (βασικό)	VECTOR A100LK
Ανεμόμετρο (ελέγχου)	NRG-40C
Ανεμοδείκτης	NRG-200P
Θερμοκρασίας	NRG-110
Πίεσης	NRG-BP-20
Υγρασίας	NRG-RH-5

**Πίνακας 7.4:** Αισθητήρες μετεωρολογικών μετρήσεων.

Συγκεκριμένα, για τη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου, χρησιμοποιήθηκε το ανεμόμετρο NRG-40C, το οποίο έχει ως έξοδο ημιτονοειδές σήμα ανάλογο της συχνότητας περιστροφής του. Για τη μετατροπή του σε αναγνώσιμο σήμα, χρησιμοποιείται μετατροπέας τετραγωνικού παλμού, ο οποίος παράγει ψηφιακό σήμα σε Volt. Για τη μέτρηση της κατεύθυνσης του ανέμου χρησιμοποιείται ο ανεμοδείκτης NRG-200P, ο οποίος διαθέτει αντίσταση ποτενσιόμετρου και αναλόγως τη διεύθυνση στην οποία δείχνει αυξομειώνει την αντίσταση αυτή ώστε να δημιουργείται η κατάλληλη πτώση τάσης και να παράγει ένα αναλογικό σήμα εξόδου σε Volt. Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας χρησιμοποιείται ο αισθητήρας NRG-110S, ο οποίος μετράει θερμοκρασίες από  $-40^{\circ}\text{C}$  έως  $52.5^{\circ}\text{C}$  ενώ για την βαρομετρική πίεση ο αισθητήρας NRG-BP-20. Τέλος, για τη μέτρηση της υγρασίας χρησιμοποιείται ο αισθητήρας NRG-RH-5. Και οι τρεις αυτοί αισθητήρες παράγουν αναλογικό σήμα σε Volt. Παρακάτω στο σχήμα 7.4 παρουσιάζεται το πεδίο δοκιμών στη Ραφήνα.



**Σχήμα 7.4:** Πύργος ανεμογεννήτριας και μετεωρολογικός ιστός στο πεδίο δοκιμών στη Ραφήνα.

Οι αισθητήρες των μετεωρολογικών μετρήσεων στήθηκαν στο μετεωρολογικό ιστό, 9m μακριά από τον πύργο που βρίσκεται η μικρή ανεμογεννήτρια, σύμφωνα με τις προδιαγραφές που αναφέρονται στο πρότυπο IEC 61400-12-1. Συγκεκριμένα, το ανεμόμετρο τοποθετήθηκε σε ύψος 12m όπως και ο δρομέας της ανεμογεννήτριας στον πύργο. Ενώ, οι υπόλοιποι αισθητήρες τοποθετήθηκαν σε απόσταση 1.5-2m από αυτόν. Τέλος, οι αισθητήρες των μετεωρολογικών μετρήσεων συνδέθηκαν στην κάρτα καταγραφής των σημάτων ώστε να συλλέγονται τα απαραίτητα δεδομένα.

### 7.2.3 Κάρτα καταγραφής σημάτων

Για τη συλλογή και καταγραφή των σημάτων χρησιμοποιείται η κάρτα 6225 της National Instruments, η οποία διαθέτει 80 κανάλια για αναλογικές εισόδους, 24 για ψηφιακές και 2 για αναλογικές εξόδους. Τα καταγεγραμμένα σήματα αποθηκεύονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και στέλνονται στη βάση δεδομένων SmartRue του ΕΜΠ που σχεδιάστηκε σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61400-12-1 το οποίο αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Σημειώνεται σε αυτό το σημείο, ότι η συγκεκριμένη κάρτα καταγραφής σημάτων αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο SmartRue και επιτρέπει την ανάλυση και τον έλεγχο των σημάτων ανά πάσα στιγμή καθώς παρακολουθεί την ανεμογεννήτρια σε μικρές χρονικές περιόδους μερικών δευτερολέπτων και στη συνέχεια υπολογίζεται η μέση τιμή ενός λεπτού των σημάτων αυτών.

### 7.2.4 Μέτρηση καμπύλης ισχύος

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, η γεννήτρια συνδέεται σε ανορθωτή με καλώδιο 80m και διατομής 4mm<sup>2</sup> και στη συνέχεια ο ανορθωτής συνδέεται με καλώδιο 2m και διατομής 2.5mm<sup>2</sup> σε συσσωρευτές 48V. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, μετρήθηκε η τάση και το ρεύμα πριν τον ανορθωτή σε διάφορες ταχύτητες ανέμου (m/s) και έτσι υπολογίστηκε η ισχύς πριν τον ανορθωτή. Επιπλέον, μετρήθηκε η ετήσια παραγωγή ενέργειας για μέση τιμή ταχύτητας ανέμου 5m/s,  $AEP_{exp}=1270.85kWh$  με αβεβαιότητα  $\pm 7.94\%$ . Στον Πίνακα 7.5 παρουσιάζονται, λοιπόν, οι μετρήσεις της ισχύος πριν τον ανορθωτή για ταχύτητες ανέμου 3 έως 13.5m/s με βήμα 0,5m/s όπως ορίζεται από το πρότυπο IEC 61400-12-1.

Vw (m/s)	Power (W)
3	7,29
3,5	14,84
4	41,39
4,5	72,33
5	108,06
5,5	145,32
6	183,44

Vw (m/s)	Power (W)
6,5	227,95
7	274,07
7,5	326,08
8	373,68
8,5	417,45
9	458,02
9,5	484,67
10	510,85
10,5	524,46
11	519,40
11,5	504,31
12	476,77
12,5	453,66
13	431,20
13,5	399,23

**Πίνακας 7.5:** Μετρήσεις ισχύος πριν τον ανορθωτή στο πεδίο δοκιμών “Μελέμι”.

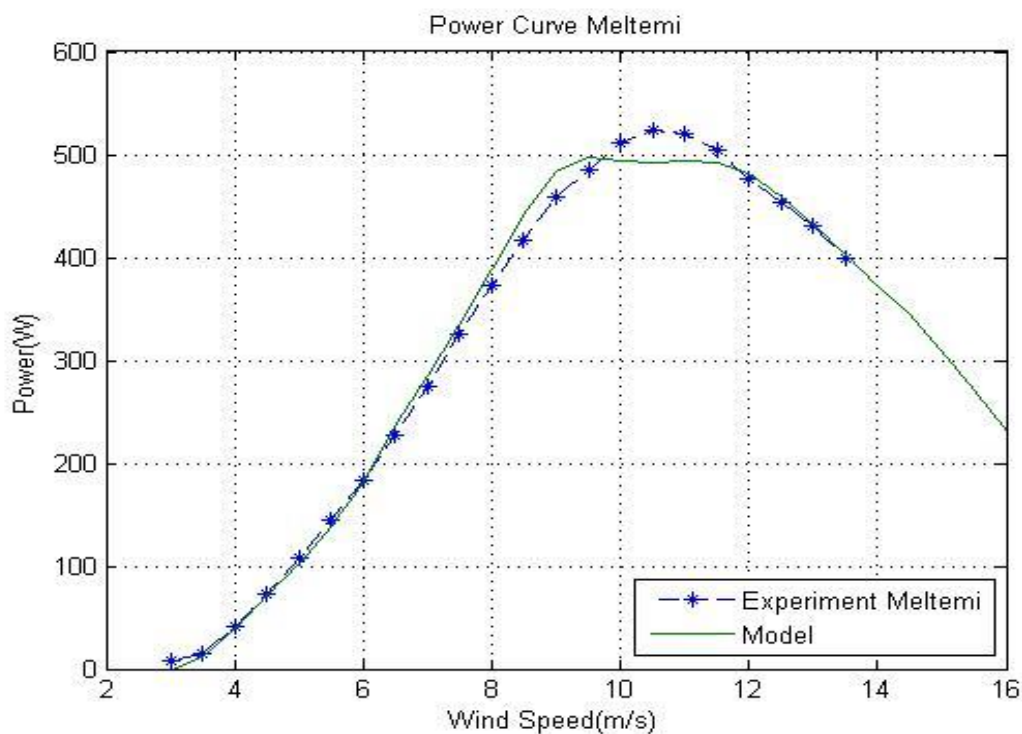
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται στον πίνακα 7.6 τα αποτελέσματα της ισχύος πριν τον ανορθωτή για ταχύτητες ανέμου 2.5 έως 16 με βήμα 0.5m/s που προκύπτουν από το μοντέλο προσομοίωσης για την ανάλυση και σύνδεση της γεννήτριας με τους συσσωρευτές που πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον του Matlab Simulink.

Vw (m/s)	Power (W)
2,5	0
3	0
3,5	11,73809522
4	40,23937325
4,5	70,32001074
5	103,2388301
5,5	137,8663939
6	180,7831169
6,5	235,8021021
7	284,9093207
7,5	335,0592691
8	387,8999516
8,5	441,4193617
9	483,0296538
9,5	497,4426377
10	493,7275514

Vw (m/s)	Power (W)
10,5	492,6132958
11	494,0698368
11,5	492,1788262
12	481,1347576
12,5	459,6188638
13	431,6525268
13,5	402,5373104
14	373,6672349
14,5	343,8655188
15	309,1847165
15,5	270,6940405
16	230,9398543

**Πίνακας 7.6:** Αποτελέσματα της καμπύλης ισχύος που προκύπτουν από το μοντέλο προσομοίωσης.

Με βάση τα δεδομένα που παρουσιάζονται στους πίνακες 7.5 και 7.6, σχεδιάζεται η γραφική (Σχήμα 7.5) με τις μετρήσεις του πειράματος για την καμπύλη ισχύος σε σύγκριση με τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης που δημιουργήθηκε στο περιβάλλον του Matlab ώστε να αποτυπωθούν εποπτικά οι αποκλίσεις τους.



**Σχήμα 7.5:** Η καμπύλη ισχύος όπως μετρήθηκε στο πεδίο δοκιμών “Μελτέμι” και όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο προσομοίωσης συναρτήσεως της ταχύτητας ανέμου.

Παρατηρούμε πως υπάρχουν αποκλίσεις μεταξύ των μετρήσεων της ισχύος στο πεδίο δοκιμών “Μελτέμι” στην Ραφήνα και των αποτελεσμάτων του μοντέλου προσομοίωσης οι οποίες οφείλονται στο γεγονός ότι το πείραμα για τη μέτρηση της γωνίας Furling διεξήχθη χωρίς να προηγηθεί συντήρηση, τρίψιμο και βάψιμο, της φτερωτής η οποία είναι απαραίτητη για την επαναφορά της επιφάνειάς της σε λεία κατάσταση καθώς κατά τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας παρατηρείται διάβρωση της φτερωτής.

Συγκεκριμένα, η μέγιστη απόκλιση υπολογίζεται 6% για ταχύτητα ανέμου 10.5m/s και είναι αποδεκτή για τη συγκεκριμένη μελέτη καθώς είναι ίση με το όριο 6% το οποίο επιλέχθηκε ως ανώτατο για την απόκλιση των μετρήσεων με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο προσομοίωσης.

Επιπρόσθετα, στο μοντέλο προσομοίωσης η ετήσια παραγωγή ενέργειας υπολογίζεται  $AEP_{model}=1214.80kWh$  και η απόκλιση της από την πειραματική μέτρηση,  $AEP_{exp}=1270.85kWh$ , είναι 4.4% και επομένως είναι αποδεκτή.

# Κεφάλαιο 8: Προσομοίωση της γεννήτριας με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων

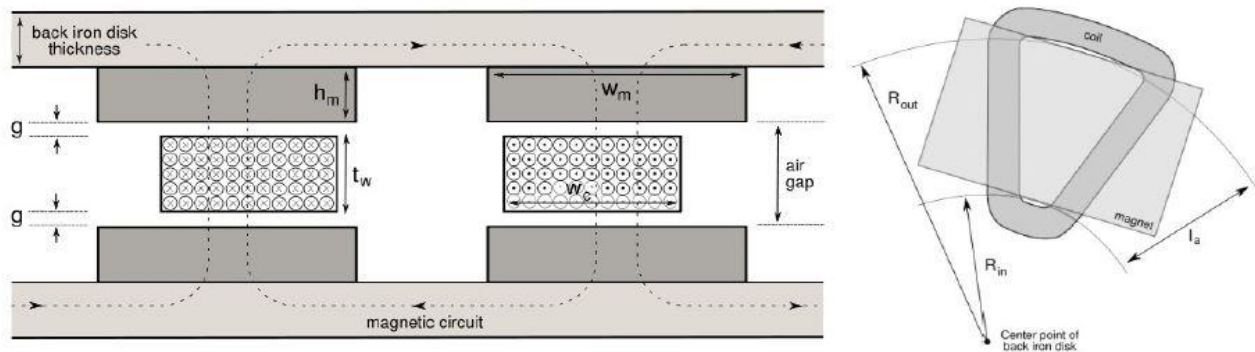
## 8.1 Το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Finite Element Method Magnetics (FEMM)

Η μελέτη των γεννητριών διεξάγεται με την προσομοίωση του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται ανάμεσα στους δρομείς, με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Για την προσομοίωση του μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιείται το πρόγραμμα ελεύθερου λογισμικού FEMM το οποίο χρησιμοποιεί την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων που επιτρέπει την πραγματοποίηση ακριβέστερων υπολογισμών μεγεθών όπως η μαγνητική επαγωγή, η μαγνητική ροή, η ένταση του μαγνητικού πεδίου, η ηλεκτρομαγνητική δύναμη κ.α. σε επιλεγμένες γραμμές και περιοχές. Συγκεκριμένα το πρόβλημα χωρίζεται σε πολλά τριγωνικά στοιχεία 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:

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

## 8.2 Προσομοίωση του μαγνητικού πεδίου της γεννήτριας στη μέση ακτίνα

Για την ακριβή αναπαράσταση μιας μηχανής μονίμων μαγνητών αξονικής ροής και την επαρκή προσέγγιση του μαγνητικού της πεδίου χρησιμοποιείται αναπαράσταση σε δύο διαστάσεις μέσω του λογισμικού FEMM. Στο σχήμα 8.1 παρουσιάζεται το ευθύγραμμο ανάπτυγμα της γεννήτριας 850W στη μέση ακτίνα του τυλίγματος.



**Σχήμα 8.1:** Ευθύγραμμο ανάπτυγμα τοπολογίας διπλού δρομέα-μονού στάτη χωρίς πυρήνα σιδήρου στη μέση ακτίνα.

Ανάλογα με τη διάμετρο της γεννήτριας στην οποία επιλέγεται να γίνει η τομή, αλλάζει η απόσταση μεταξύ των παρακείμενων μαγνητών, και άρα το πολικό βήμα, καθώς και η απόσταση μεταξύ των παρακείμενων πηνίων. Συνεπώς, για να υπάρξει το πιο αντιπροσωπευτικό αποτέλεσμα επιλέγεται αρχικά η τομή στη μέση ακτίνα  $R_{avg}$  και στη συνέχεια στις ακτίνες  $R_{in}$  και  $R_{out}$ . Σε αυτό το σημείο, θα πρέπει να τονίσουμε πως η διαδικασία προσομοίωσης του μαγνητικού πεδίου ακολουθήθηκε για τις 4 γεννήτριες που συνδέθηκαν στα δύο συστήματα συσσωρευτών, των 24V και 48V, και επομένως μελετήθηκαν 8 διαφορετικά συστήματα. Όμως στο συγκεκριμένο κεφάλαιο η διαδικασία θα αναλυθεί συγκεκριμένα για την γεννήτρια 850W, τα χαρακτηριστικά της οποίας παρουσιάζονται στον πίνακα 8.1.

<b>ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ</b>	
Όνομαστική Ισχύς (W)	850
Όνομαστική Συχνότητα (Hz)	50
Όνομαστικό Ρεύμα (A)	10
Όνομαστικές Στροφές (ΣΑΛ)	550
Αριθμός Πόλων	12
Αριθμός Πηνίων ανά φάση	9
Μήκος Διακένου (mm)	19
<b>ΔΡΟΜΕΑΣ</b>	
<b>Χαλύβδινοι Δίσκοι</b>	
Πάχος (mm)	8
Εξωτερική Ακτίνα (mm)	150
<b>Μαγνήτες</b>	
Αξονικό Πάχος (mm)	10
Ακτινικό Πλάτος (mm)	30
Ενεργό Μήκος (mm)	46
Μαγνητικό Υλικό	NdFeB N40
<b>ΣΤΑΤΗΣ</b>	
<b>Πηνία</b>	
Αξονικό πάχος (mm)	13
Πάχος Πλευράς Πηνίου (mm)	21
Ελίγματα/πηνίο	90
Διατομή Αγωγού (mm)	1.5

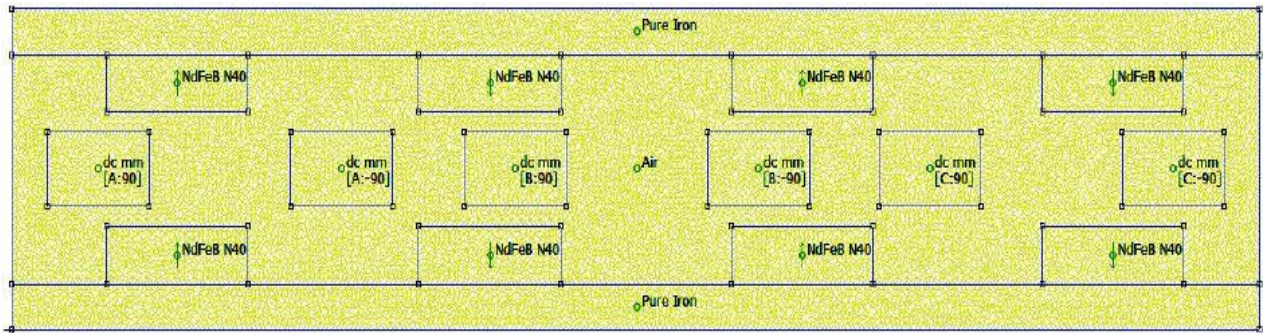
**Πίνακας 8.1:** Τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας αξονικής ροής μονίμων μαγνητών που αναλύθηκε.

Η μηχανή διαθέτει 12 μόνιμους μαγνήτες με σχήμα ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου σε κάθε δίσκο του δρομέα και 9 πηνία συνδεδεμένα σε αστέρα, με εσωτερικές διαστάσεις ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου. Το τύλιγμα είναι συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο μονής στρώσης με 3 πηνία ανά φάση. Λόγω συμμετρίας δεν χρειάζεται να αναπαρασταθεί ολόκληρη η μηχανή, ώστε να μειωθεί ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος. Έτσι, αρκεί να αναπαρασταθεί το ένα



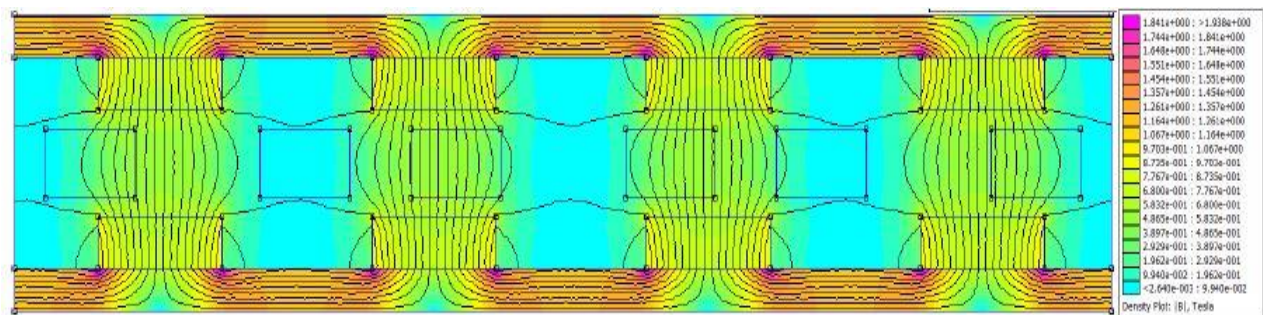
τρίτο της μηχανής δηλαδή τέσσερα πολικά βήματα και τρία πηνία, ένα για κάθε φάση. Οι συνθήκες που πρέπει να εφαρμοστούν στα δεξιά και αριστερά σύνορα του προβλήματος είναι περιοδικές, εφόσον ο αριθμός των πολικών βημάτων είναι ζυγός και η μορφή του μαγνητικού πεδίου επαναλαμβάνεται δεξιά και αριστερά της γεωμετρίας. Στα άνω και κάτω σύνορα εφαρμόζονται 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, εξετάζεται για 2 έως 9mm με βήμα 0,5mm και επιλέγεται παρακάτω να αναλυθεί η διαδικασία συγκεκριμένα για  $g=3mm$ . Ως βάθος της γεωμετρίας επιλέγεται το ενεργό μήκος της μηχανής  $l_a=46mm$ . Η σχεδίαση που χρησιμοποιήθηκε στο λογισμικό FEMM και το πλέγμα της γεωμετρίας παρουσιάζονται στο σχήμα 8.2.



Σχήμα 8.2: Η γεωμετρία και το πλέγμα της στο λογισμικό FEMM.

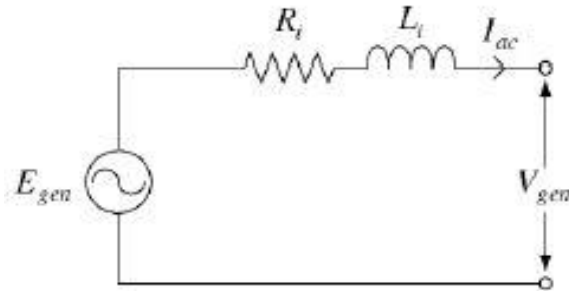
Στη συνέχεια, το πρόβλημα επιλύεται για μηδενικές τιμές ρευμάτων και η μορφή του μαγνητικού πεδίου σε ολόκληρη την επιλεγμένη γεωμετρία παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.3. Παρατηρούμε τους 4 μαγνητικούς βρόχους που δημιουργούνται και τη μαγνητική ροή που διέρχεται από τα πηνία κατά κύριο λόγο παράλληλα με τον άξονα περιστροφής.



Σχήμα 8.3: Επίλυση του μαγνητοστατικού προβλήματος στη μέση ακτίνα και σε κενό φορτίο με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

### 8.3 Υπολογισμός της αντίστασης και της αυτεπαγωγής του τυλίγματος του στάτη

Το ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας αξονικής ροής χωρίς πυρήνα στο στάτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.4, θεωρώντας αμελητέα τα δινορρεύματα στους χάλκινους αγωγούς των πηνίων.



**Σχήμα 8.4:** Ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας αξονικής ροής χωρίς πυρήνα στο στάτη.

όπου,

- $E_{gen}$  : η ΗΕΔ που επάγεται στο τύλιγμα και ισούται με την τάση ανοιχτοκύκλωσης της γεννήτριας
- $R_i$  : η ωμική αντίσταση ανά φάση του τυλίγματος
- $L_i$  : η σύγχρονη αυτεπαγωγή ανά φάση του τυλίγματος
- $I_{ac}$  : η ενεργός τιμή του ρεύματος γραμμής
- $V_{gen}$  : η τερματική τάση στα άκρα της γεννήτριας

Για τον υπολογισμό της ωμικής αντίστασης χρησιμοποιείται η σχέση (2.12) που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 2 και είναι φανερό πως πρέπει πρώτα να υπολογιστεί το μέσο μήκος ελίσματος  $l_{avg}$  των πηνίων. Για την εν λόγω γεννήτρια αξονικής ροής, η αντίσταση ανά φάση στους 70 °C υπολογίζεται 0.675Ω. Ενώ, σε πειραματικές μετρήσεις στο εργαστήριο και κατά τη σύνδεση DC τροφοδοτικού στη φάση της γεννήτριας, η εσωτερική αντίσταση μετρήθηκε στα 0.657Ω.

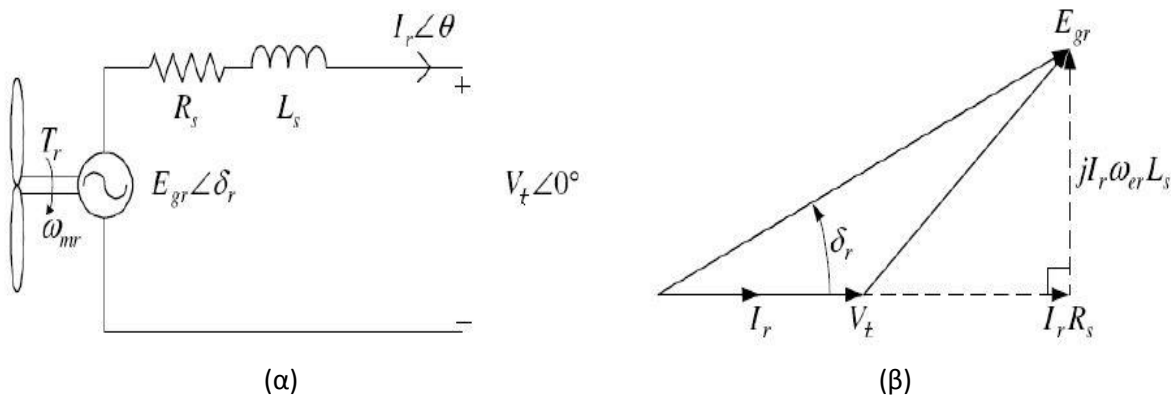
Αντίστοιχα, η αυτεπαγωγή του τυλίγματος  $L_s$  υπολογίζεται με τη σχέση (2.13) που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 2 και υπολογίζεται 1.72mH. Ενώ, σε πειραματικές μετρήσεις στο εργαστήριο και κατά τη σύνδεση με RLC μετρητικό όργανο στη φάση της γεννήτριας, η αυτεπαγωγή του τυλίγματος μετρήθηκε στα 2.19mH.

### 8.4 Υπολογισμός της ηλεκτρομαγνητικής ροπής

Η γεωμετρία που έχει πραγματοποιηθεί μέχρι στιγμής είναι στατική και το πρόβλημα μαγνητοστατικό. Όμως, για να υπολογιστεί η ροπή χρειάζεται να πραγματοποιηθεί μετακίνηση

του δρομέα ως προς το στάτη. Για να γίνει αυτό αναπτύσσεται πρόγραμμα στη γλώσσα προγραμματισμού Matlab που δέχεται την γεωμετρία του προβλήματος, μετακινεί το δρομέα προς τα δεξιά για απόσταση 2mm που ισοδυναμεί σε μηχανική γωνία περιστροφής  $0.9^\circ$  και επιλύει το μαγνητοστατικό πρόβλημα σε κάθε θέση. Με αυτό τον τρόπο υπολογίζεται η ηλεκτρομαγνητική δύναμη για καθένα από τα τρία πηνία και κατ' επέκταση η ροπή σε σχέση με το μήκος ή τη γωνία μετακίνησης (Σχήμα 8.8).

Επιπλέον, για τον υπολογισμό της ηλεκτρομαγνητικής ροπής χρειάζεται να εφαρμοστεί κατάλληλο ρεύμα στο τύλιγμα και προκειμένου να γίνει αυτό κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν βασικές σχέσεις που ισχύουν καθώς η γεννήτρια παράγει μόνο ενεργό ισχύ ( $\cos\phi=1$ ). Στο Σχήμα 8.5(α) απεικονίζεται το ισοδύναμο κύκλωμα μιας ανεμογεννήτριας με σύγχρονη γεννήτρια που πρόκειται να συνδεθεί σε ωμικό τριφασικό φορτίο. Έτσι, το ρεύμα γραμμής είναι συμφασικό με την τερματική τάση της γεννήτριας, οπότε προκύπτει το διανυσματικό διάγραμμα του Σχήματος 8.5(β).



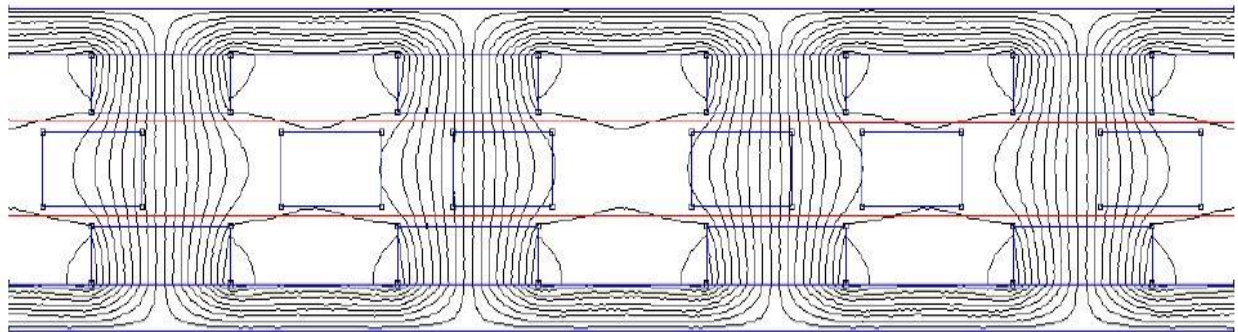
**Σχήμα 8.5:** Το ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας (α), διανυσματικό διάγραμμα της γεννήτριας (β).

Από το διανυσματικό διάγραμμα προκύπτουν εύκολα οι σχέσεις για τη γωνία ισχύος  $\delta$ :

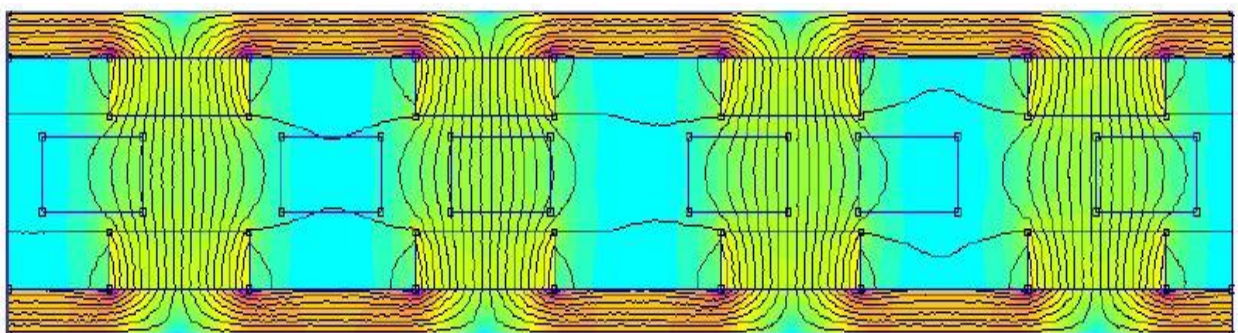
$$\cos \delta_r = \frac{V_t + I_r \cdot R_s}{E_{gr}}$$

Σε αυτό το σημείο, λοιπόν, πρέπει να παρατηρήσουμε το κύκλωμα του μαγνητικού πεδίου καθώς η γεννήτρια φορτίζεται με διαδοχικά ρεύματα γραμμής 2A, 4A, 6A, 8A, και 10A (Σχήμα 8.7). Κατά τη μέγιστη φόρτιση των 10A η μαγνητική επαγωγή στο σίδηρο του δρομέα φτάνει τα 1.38T, κοντά στο σημείο κορεσμού του σιδήρου. Ο υπολογισμός της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης μπορεί να γίνει με τον τανυστή Maxwell κατά μήκος μιας ευθείας γραμμής στο μέσο των δύο διακένων όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.6, ενώ η γεννήτρια φορτίζεται με διαφορετικά ρεύματα.

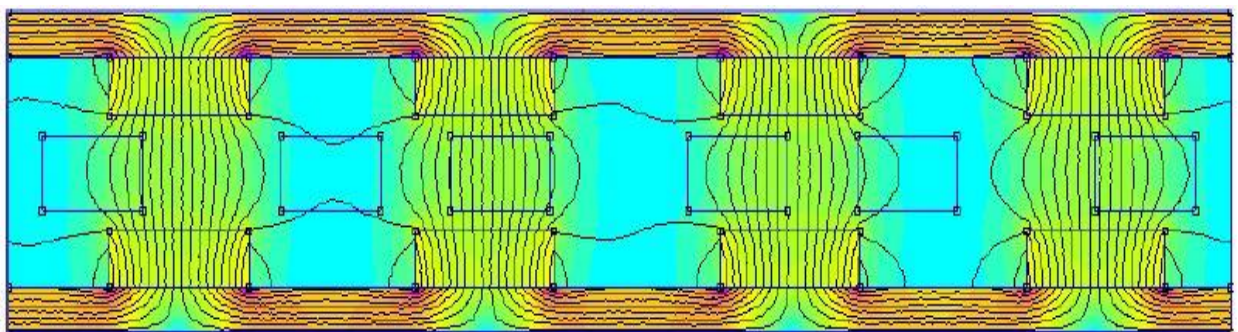




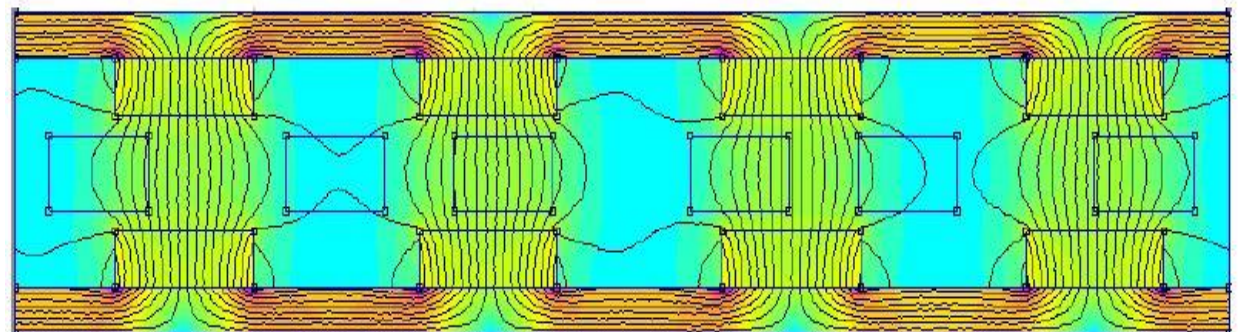
**Σχήμα 8.6:** Ο υπολογισμός της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης κατά μήκος ευθείας γραμμής στο μέσο των δύο διακένων.



(α) 2A ρεύμα γραμμής

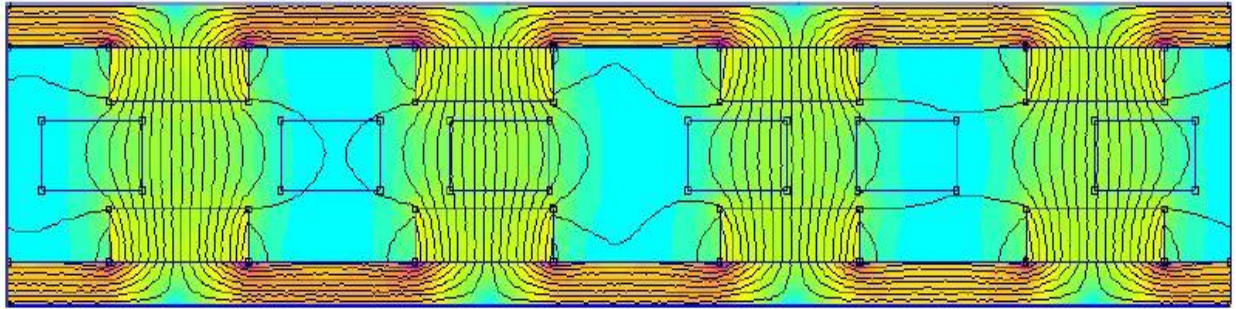


(β) 4A ρεύμα γραμμής

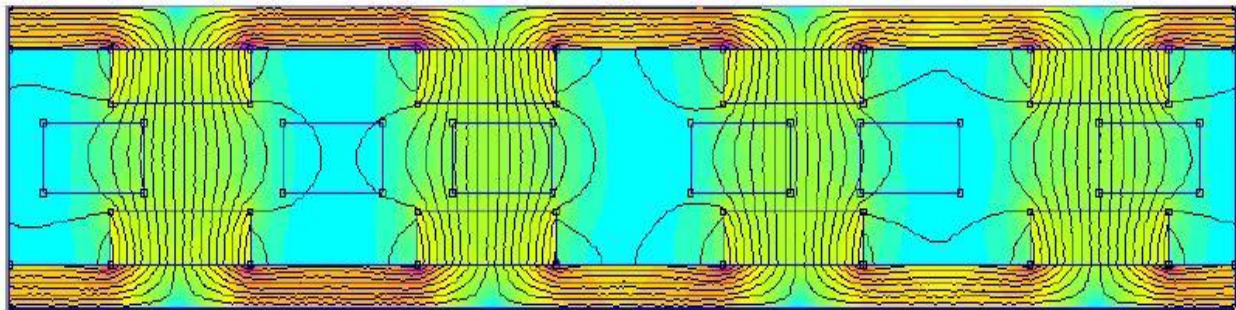


(γ) 6A ρεύμα γραμμής





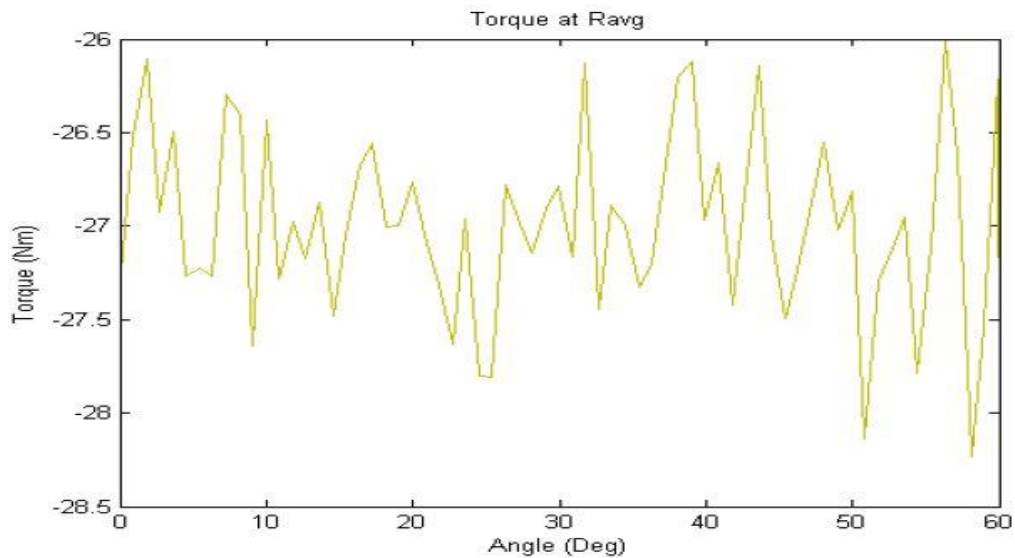
(δ) 8A ρεύμα γραμμής



(ε) 10A ρεύμα γραμμής

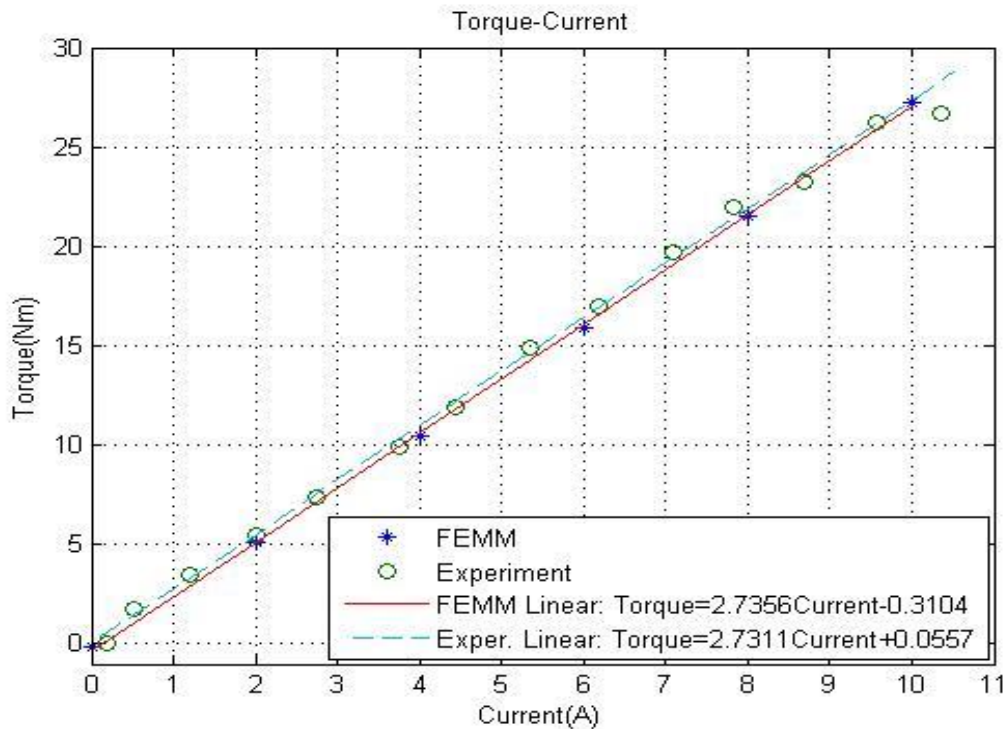
**Σχήμα 8.7:** Το μαγνητικό κύκλωμα του δρομέα για ρεύμα γραμμής (α) 2A, (β) 4A, (γ) 6A, (δ) 8A, (ε) 10A.

Έχει αναφερθεί ότι η ηλεκτρομαγνητική δύναμη υπολογίζεται για το 1/3 της γεννήτριας, στο οποίο γίνεται η προσομοίωση και επομένως αφού πολλαπλασιαστεί με τη μέση ακτίνα και με το σύνολο της γεννήτριας προκύπτει η ηλεκτρομαγνητική ροπή συναρτήσει της γωνίας περιστροφής που παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.8.



**Σχήμα 8.8:** Η ροπή για ονομαστική RMS τιμή ρεύματος γραμμής (10A) και για μετακίνηση του δρομέα για μία περίοδο.

Τέλος, λόγω της μικρής ταλάντωσης της ροπής υπολογίζεται ο μέσος όρος των τιμών και στη συνέχεια υπολογίζεται το σύνολο της ροπής για ολόκληρη τη γεννήτρια και για διαφορετικά ρεύματα φόρτισης (Σχήμα 8.9). Στο παρακάτω Σχήμα 8.9 συγκρίνεται η ηλεκτρομαγνητική ροπή που προκύπτει από το μοντέλο προσομοίωσης με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων με την ηλεκτρομαγνητική ροπή που μετρήθηκε στο πείραμα για την επαλήθευση του ηλεκτρικού μέρους της γεννήτριας ονομαστικής ισχύος 850W με διάκενο  $g=3mm$  και αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 5.



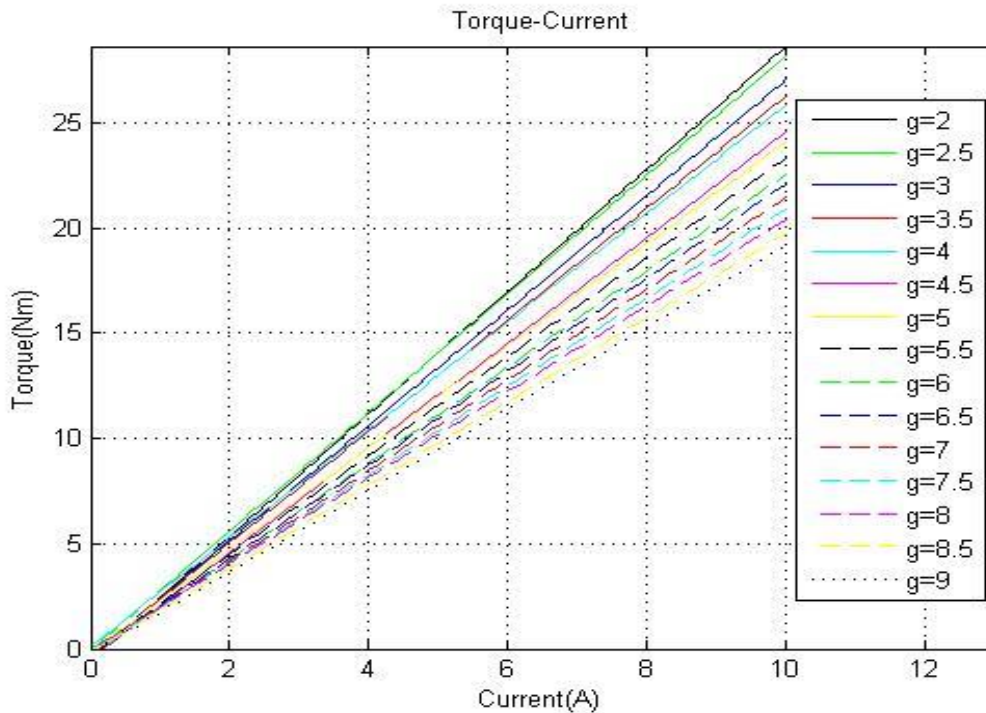
**Σχήμα 8.9:** Η ροπή για διαφορετικές φορτίσεις μέχρι και το ονομαστικό ρεύμα και η γραμμική εξίσωση που προκύπτει από το μοντέλο στο FEMM και η σύγκριση με τις πειραματικές μετρήσεις.

Όπως ήταν αναμενόμενο, η σχέση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής με το ρεύμα γραμμής είναι γραμμική. Η εξίσωση της, λοιπόν, συναρτήσεως του ρεύματος προσεγγιστικά από τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων:

$$Torque = 2,7356 \cdot Current - 0,3104$$

Συνεπώς, προκύπτει από την παραπάνω διαδικασία ο σταθερός συντελεστής της γραμμικής σχέσης ροπής με ρεύμα, Torque Constant, να είναι  $2.7356(Nm/A)$  για διάκενο  $3mm$ . Ενώ από τις πειραματικές μετρήσεις προκύπτει πως ο σταθερός αυτός συντελεστής είναι  $2.7311(Nm/A)$  και η απόκλιση τους υπολογίζεται  $0.16\%$  που είναι, σαφώς, αποδεκτή.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τη σχέση ηλεκτρομαγνητικής ροπής συναρτήσει του ρεύματος γραμμής που προέκυψαν εφαρμόζοντας την ίδια διαδικασία για διάκενα από 2 έως 9mm με βήμα 0.5m/s για τη γεννήτρια ονομαστικής ισχύος 850W.



**Σχήμα 8.10:** Η γραμμική σχέση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής συναρτήσει του ρεύματος γραμμής για διάκενα της γεννήτριας 2mm έως 9mm.

Από το παραπάνω σχήμα συμπεραίνουμε πως αυξάνοντας την τιμή του διακένου μεταξύ των πηνίων και των μαγνητών στη γεννήτρια, η κλίση της γραμμικής σχέσης της ηλεκτρομαγνητικής ροπής συναρτήσει του ρεύματος γραμμής μειώνεται. Στον πίνακα που ακολουθεί καταγράφονται οι τιμές της ροπής, Torque Constant, για τα διάκενα 2mm έως 9mm της γεννήτριας που εισέρχονται στο μοντέλο της γεννήτριας που δημιουργήθηκε στο περιβάλλον του Simulink Matlab.

<b>g (mm)</b>	<b>Torque Constant</b>
2	2,9096
2,5	2,8213
3	2,7356
3,5	2,6531
4	2,5711
4,5	2,4955
5	2,4239
5,5	2,3530

<b>g (mm)</b>	<b>Torque Constant</b>
6	2,2870
6,5	2,2239
7	2,1618
7,5	2,1038
8	2,0463
8,5	1,9917
9	1,9390

**Πίνακας 8.2:** Τιμές της σταθεράς της ροπής προς το ρεύμα, Torque Constant, για τιμές διακένου 2 έως 9mm με βήμα 0.5mm για τη γεννήτρια ονομαστικής ισχύος 850W.



## Κεφάλαιο 9: Μεγιστοποίηση της απόδοσης του δρομέα μικρών ανεμογεννητριών

### 9.1 Υπολογισμός ενεργειακής παραγωγής ανεμογεννητριών

Η ενεργειακή παραγωγή μιας ανεμογεννήτριας, όπως έχει ήδη αναφερθεί, εκφράζει την ενέργεια που αποδίδει σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, συνήθως ένα έτος. Επί της ουσίας, το μέγεθος αυτό είναι το πιο σημαντικό στην ανάλυση μας και μας ενδιαφέρει περισσότερο και από τα ονομαστικά μεγέθη της.

Συνδέεται άμεσα, βέβαια, με τα ονομαστικά της μεγέθη καθώς και την απόδοσή της, αλλά επιπλέον σχετίζεται και με την κατανομή του ανέμου στην περιοχή που θα τοποθετηθεί η ανεμογεννήτρια. Επομένως, εκείνο που χρειάζεται να είναι γνωστό για τον υπολογισμό της είναι αφενός η κατανομή του ανέμου, κι αφετέρου η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας η οποία περιγράφει αυτή ακριβώς τη μεταβολή της ισχύος εξόδου σε σχέση με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της αλλά και τον τρόπο σύνδεσης της. Η εν λόγω καμπύλη θα είναι διαφορετική για απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές και διαφορετική για σύνδεση σε λειτουργία MPPT κλπ. Συνεπώς, αναλόγως θα μεταβάλλεται και η ενεργειακή της παραγωγή.

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση της ανεμογεννήτριας είναι το εύρος του ανέμου στην περιοχή όπου τοποθετείται. Σε γενικές γραμμές σε περιοχές όπου οι μέσες τιμές ανέμου είναι χαμηλές, είναι απαραίτητο η γεννήτρια να έχει πολύ καλή συμπεριφορά γύρω από αυτές τις τιμές. Έτσι, για μία μέση τιμή ανέμου 5 m/s μία γεννήτρια που εργάζεται από 3-10 m/s, θα έχει καλύτερη ενεργειακή απόδοση από μία αντίστοιχη που εργάζεται από 4-11 m/s καθώς η τελευταία κατασκευάζεται με ονομαστικό άνεμο τα 11 m/s και θα έχει μικρότερη φτερωτή άρα και μικρότερο κόστος κατασκευής. Επιπλέον, η ίδια γεννήτρια θα έχει καλύτερη ενεργειακή απόδοση από μία που εργάζεται σε εύρος 4-10 m/s επειδή αυτά είναι τα όρια του επιλεγμένου αντιστροφέα. Πρέπει, λοιπόν, να δίνεται μεγάλη προσοχή στην ενεργειακή παραγωγή για να γίνει η επιλογή μεταξύ των μικρών εμπορικών ανεμογεννητριών διαφορετικών ποιοτικών χαρακτηριστικών.

Η μαθηματική σχέση που μας δίνει την ενεργειακή παραγωγή είναι η εξής:

$$E = T \int_0^{\infty} h(v_w)P(v_w)dv_w \quad (9.1)$$

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι ο υπολογισμός της ενεργειακής παραγωγής για διάφορα είδη σύνδεσης. Θα μελετηθεί μια γεννήτρια ονομαστικής ισχύος 850W που έχει κατασκευαστεί με τα κριτήρια χαμηλού κόστους και ιδιοκατασκευής για DC σύνδεση και συγκεκριμένα σύνδεσης απευθείας σε συσσωρευτές.

## 9.2 DC σύνδεση

Στο σημείο αυτό, θα γίνει μία σύντομη παρουσίαση της ανεμογεννήτριας των 850W και στη συνέχεια θα γίνει ανάλυση των χαρακτηριστικών λειτουργίας της σε απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές καθώς και υπολογισμός της ενεργειακής της παραγωγής.

Η βελτιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας θα πραγματοποιηθεί εξετάζοντας τα εξής χαρακτηριστικά του συστήματος απευθείας σύνδεσης της ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές:

- *το καλώδιο που συνδέει τη γεννήτρια με τον ανορθωτή:* η μεταβολή της αντίστασης του καλωδίου επηρεάζει την ενεργειακή παραγωγή του συστήματος
- *το διάκενο μεταξύ των μαγνητών και των πηνίων της γεννήτριας:* το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό αποτελεί πλεονέκτημα της γεννήτριας αξονικής ροής όσον αφορά την επιλογή μας ανάμεσα στα είδη των γεννητριών.

### 9.2.1 Παρουσίαση των χαρακτηριστικών της γεννήτριας 850W

Η γεννήτρια αυτή κατασκευάστηκε με στόχο τη σύνδεση σε σύστημα με μπαταρίες 48 V, ενώ συνδέεται μέσω ανορθωτή απευθείας στους συσσωρευτές. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας που είτε εισάγαμε στο μοντέλο προσομοίωσης της είτε εξάγαμε από αυτό είναι τα εξής:

<b>Ονομαστική Ισχύς</b>	850W
<b>Αριθμός πόλων</b>	12
<b>Αριθμός πηνίων/φάση</b>	3
<b>Αντίσταση φάσης</b>	0.657Ω
<b>Αυτεπαγωγή φάσης</b>	2.191mH
<b>Ακτίνα φτερωτής</b>	1.2m
<b>Βέλτιστο λ</b>	5.44
<b>Μέγιστο <math>c_p</math></b>	0.40
<b>Ονομαστικός άνεμος</b>	10.5m/s
<b>Άνεμος cut-in</b>	3m/s
<b>Ονομαστικές στροφές</b>	406RPM
<b>Cut-in στροφές</b>	210RPM
<b>Cut-in ΗΕΔ</b>	20.76V

Πίνακας 9.1: Βασικά χαρακτηριστικά γεννήτριας 850W.

Η γεννήτρια πάντα συνδέεται με καλώδιο το οποίο οδηγείται στον ανορθωτή, ο οποίος έχει πτώση τάσης σε κάθε δίοδο 0.7 V. Στη συνέχεια η έξοδος από τον ανορθωτή οδηγείται στους συσσωρευτές των οποίων η τάση ανοιχτοκύκλωσης θεωρείται 48 V.

### 9.2.2 Απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές

Για την ανάλυση μας θα χρησιμοποιήσουμε τη μοντελοποίηση σε Simulink Matlab που έχει αναπτυχθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Το πρόβλημα γενικότερα της απευθείας σύνδεσης σε συσσωρευτές είναι ότι κρατούν την τερματική τάση της γεννήτριας σε πολύ χαμηλά επίπεδα, καθιστώντας έτσι την διαδικασία απορρόφησης μέγιστης αεροδυναμικής ισχύος αδύνατη.

Κατά τη διάρκεια της ανάλυσης του μοντέλου έγινε προφανές ότι ένα μέγεθος το οποίο παίζει σημαντικό ρόλο στην συμπεριφορά του συστήματος μας αλλά και ειδικότερα στην ενεργειακή απόδοση είναι η αντίσταση του καλωδίου με το οποίο συνδέεται η γεννήτρια με τον ανορθωτή αλλά και το καλώδιο που συνδέει τον ανορθωτή με την μπαταρία. Και οι δύο αυτές καταστάσεις θα αναλυθούν στη συνέχεια και θα εξαχθούν ιδιαίτερα χρήσιμα συμπεράσματα.

Όλα τα παρακάτω έχουν προκύψει με τη βοήθεια προγραμμάτων που έχουν γραφτεί σε λογισμικό Matlab και ακολουθούν την εξής πορεία: Για κάθε τιμή της αντίστασης του καλωδίου  $R_{cable}$  αυξάνονται οι στροφές και υπολογίζεται η ΗΕΔ της γεννήτριας. Η έγχυση ισχύος προς το σύστημα ξεκινά όταν η ΗΕΔ ξεπεράσει την ισοδύναμη τάση αντιστροφέα – συσσωρευτών  $V_b$  και οι στροφές στις οποίες συμβαίνει αυτό είναι οι cut-in. Στη συνέχεια υπολογίζονται και λοιπά μεγέθη όπως ηλεκτρική, μηχανική ισχύς, απώλειες συστήματος και προκύπτουν και οι χαρακτηριστικές του συστήματος.

### 9.2.3 Θεωρητική προσέγγιση και επεξήγηση της διαδικασίας

Γνωρίζουμε ότι η αντίσταση ενός καλωδίου χαλκού δίνεται από την κάτωθι σχέση:

$$R_{cable} = \rho \frac{l}{S} \quad (9.2)$$

όπου,

- R: η αντίσταση του καλωδίου,
- ρ: η ειδική αντίσταση του χαλκού,
- l: το μήκος του καλωδίου,
- S: η διατομή του καλωδίου.

Επομένως, παρατηρούμε ότι ουσιαστικά αυτό που επηρεάζει την αντίσταση του καλωδίου είναι τόσο το μήκος του, όσο και η διατομή του. Στο πρόγραμμα που έχει γραφτεί σε λογισμικό Matlab, αρχικά υπολογίστηκε η βέλτιστη αντίσταση του καλωδίου στο κομμάτι που συνδέει

την γεννήτρια με τον ανορθωτή (AC κομμάτι), στη συνέχεια γίνεται μελέτη και στο κομμάτι που συνδέει τον ανορθωτή με τις μπαταρίες (DC κομμάτι) και τέλος γίνεται εκτενής μελέτη πάνω στους παράγοντες μήκος καλωδίου καθώς και διατομή και παρουσιάζονται αναλυτικοί πίνακες με συνδυαστικά στοιχεία.

Για κάθε, λοιπόν, τιμή της αντίστασης καλωδίου  $R_{cable}$  αυξάνοντας την ταχύτητα ανέμου από 2.5m/s έως 16m/s με βήμα 0.5m/s στο μοντέλο προσομοίωσης, εξάγουμε στοιχεία για την ισχύ, μηχανική και ηλεκτρική, τον αεροδυναμικό συντελεστή  $c_p$ , το λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου  $\lambda$ , το ρεύμα  $I_{ac}$  που ρέει στο κύκλωμα, καθώς και για την ενεργειακή παραγωγή (ΑΕΡ).

#### 9.2.4 Διαδικασία εύρεσης και υπολογισμού της βέλτιστης αντίστασης καλωδίου

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναλυθεί η διαδικασία εύρεσης της τιμής της βέλτιστης αντίστασης του καλωδίου. Χρησιμοποιώντας, λοιπόν, το μοντέλο της απευθείας σύνδεσης της ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές που δημιουργήθηκε στο περιβάλλον του Simulink Matlab, υπολογίστηκε η ετήσια ενεργειακή παραγωγή για διάφορες τιμές της αντίστασης του καλωδίου ώστε να βρεθεί η βέλτιστη. Το κριτήριο με βάση το οποίο επιλέχθηκε η βέλτιστη τιμή της αντίστασης είναι η μέγιστη ενεργειακή παραγωγή σε διάστημα ενός χρόνου και για να υπολογιστεί αυτή χρησιμοποιήθηκε κώδικας που βασίζεται στη δυαδική αναζήτηση (Κώδικας 1, Παράρτημα Γ).

Εξετάζεται, συνεπώς, η ενεργειακή παραγωγή για διάφορες τιμές της αντίστασης του καλωδίου και αναζητείται η τιμή αυτή που προσδίδει τη μέγιστη ενεργειακή παραγωγή. Συγκεκριμένα, υπολογίσαμε ότι η τιμή αυτή της αντίστασης του καλωδίου κατά τη σύνδεση της ανεμογεννήτριας ονομαστικής ισχύος 850W και διακένου μεταξύ των μαγνητών και των πηνίων  $g=3\text{mm}$  σε σύστημα συσσωρευτών 48V είναι  $R_{cable}=1.2476\Omega$  και η ετήσια ενεργειακή παραγωγή που παράγεται είναι  $AEP_{max}=1101.95\text{kWh}$ .

#### 9.2.5 Διαδικασία επιλογής καλωδίου και οικονομική μελέτη

Στην παρούσα ενότητα θα προσπαθήσουμε να διευκρινίσουμε τη διαδικασία επιλογής του κατάλληλου καλωδίου σύνδεσης μεταξύ της γεννήτριας και του ανορθωτή (AC) σύμφωνα με τα διαθέσιμα καλώδια του εμπορίου και να παρουσιάσουμε κάποια οικονομικά μεγέθη τα οποία είναι σημαντικά κατά την επιλογή εμπορικών καλωδίων.

Από τον τύπο (9.2), είναι προφανές ότι τα δύο στοιχεία που μας καθορίζουν την τιμή της αντίστασης ενός καλωδίου, υπό σταθερές συνθήκες περιβάλλοντος (θερμοκρασία, υγρασία κλπ) είναι το μήκος του καλωδίου και η διατομή του. Επομένως, για μήκη καλωδίου στο AC κομμάτι από 30 έως 150 μέτρα και με δεδομένη τη βέλτιστη τιμή καλωδίου  $R_{cable}=1.2476\Omega$

υπολογίστηκε η θεωρητική τιμή της διατομής του καλωδίου σε  $\text{mm}^2$  που θα ήταν απαραίτητη ώστε να επιτευχθεί το θεωρητικό βέλτιστο. Έτσι, προέκυψε ο παρακάτω πίνακας που απεικονίζει αυτή ακριβώς τη διαδικασία ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα με εμπορικά διαθέσιμες διατομές καλωδίων:

Μήκος Καλωδίου (m)	Θεωρητική τιμή διατομής ( $\text{mm}^2$ )
30	0,40398
40	0,53863
50	0,67329
60	0,80795
70	0,94261
80	1,07727
90	1,21193
100	1,34659
110	1,48124
120	1,61590
130	1,75056
140	1,88522
150	2,01988

**Πίνακας 9.2:** Θεωρητική τιμή της διατομής σε σχέση με το μήκος του AC καλωδίου.

Στην πραγματικότητα οι τιμές αυτές δεν αντιστοιχούν σε εμπορικές τιμές διατομών καλωδίου οι οποίες είναι 0.5, 0.75, 1.00, 1.50, 2.50, 4.00  $\text{mm}^2$  κ.ο.κ. Συνεπώς, θα πρέπει να υπάρξει κάποιος τρόπος σύμφωνα με τον οποίο θα γίνει επιλογή εμπορικού καλωδίου που θα ανταποκρίνεται όσο το δυνατόν καλύτερα στα ποιοτικά και ποσοτικά κριτήρια που θα πρέπει να πληροί το σύστημά μας.

Το πρώτο και κύριο κριτήριο που εξετάστηκε είναι η αντοχή του εκάστοτε καλωδίου στις τιμές ρεύματος που διέρχονται μέσα από αυτό. Εν προκειμένω το καλώδιο μας θα πρέπει όχι μόνο να αντέχει το ρεύμα γραμμής που διέρχεται από αυτό αλλά θα πρέπει να μπορεί σε ριπές ανέμου και μέχρι το σύστημα Furling να προλάβει να ενεργοποιηθεί να αντέξει μέχρι και τριπλάσιες τιμές ρεύματος για λίγα δευτερόλεπτα. Σύμφωνα με το [32] έχουμε τα παρακάτω:

- Η διατομή με κριτήριο της εξασφάλιση επαρκούς μηχανικής αντοχής προκύπτει με την επιλογή τιμών ίσων ή μεγαλύτερων από συγκεκριμένες ελάχιστες επιτρεπόμενες διατομές που αναγράφονται σε κανονισμούς. Για δεδομένη διατομή αγωγού, έχουμε μια μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση συνεχούς ροής ρεύματος και αντίστοιχα σε δεδομένη ένταση ρεύματος που θέλουμε να μεταφέρουμε μέσω του αγωγού αντιστοιχεί μια ελάχιστη διατομή αγωγού.

- Ο προσδιορισμός της διατομής με κριτήριο τη θερμική αντοχή κωδικοποιείται στους κανονισμούς όπως περιγράφεται παρακάτω. Οι κανονισμοί αφορούν μονωμένους αγωγούς και καλώδια χαμηλής τάσης με μόνωση PVC ή κοινό πλαστικό με μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία 60°. Σύμφωνα, λοιπόν, με τους κανονισμούς για κάθε τιμή τυποποιημένης διατομής, η μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση για χάλκινους αγωγούς, ώστε η θερμοκρασία της μόνωσης να μην υπερβεί τους 60° καθορίζεται κατά βάση από τις τιμές που αναγράφονται στον πίνακα 9.4 σε συνδυασμό, όμως, με την επιπλέον παρατήρηση ότι ο αγωγός γειώσεως δεν υπολογίζεται ως ενεργός αγωγός και σε τριφασικές γραμμές με ουδέτερο, αυτός δε θεωρείται ενεργός αγωγός. Οι τιμές του παρακάτω πίνακα αναφέρονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 30° και οριακή ανύψωση της θερμοκρασίας του αγωγού υπό συνεχή ροή, ίση με 30°, άρα συνολική μέγιστη θερμοκρασία της μόνωσης του αγωγού 60°. Για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 30°, η μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση περιορίζεται κατά τα ποσοστά που αναγράφονται στον πίνακα 9.4.

Συνεπώς παρακάτω παρουσιάζονται, ο πίνακας με τη μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση συνεχούς ροής για χάλκινους αγωγούς και ο πίνακας με τους συντελεστές διόρθωσης για θερμοκρασίες περιβάλλοντος άνω των 30° :

Ονομαστική διατομή (mm <sup>2</sup> )	Επιτρεπόμενη ένταση (A)		
	Ομάδα I	Ομάδα II	Ομάδα III
0.75	9.00	15.00	7.00
1.00	11.00	18.00	9.00
1.50	14.00	22.00	10.00
2.50	20.00	31.00	15.00
4.00	25.00	41.00	20.00
6.00	33.00	54.00	26.00
10.00	43.00	70.00	35.00
16.00	60.00	96.00	48.00
25.00	83.00	128.00	65.00
35.00	100.00	153.00	78.00
50.00	127.00	197.00	100.00
70.00	147.00	234.00	-
95.00	181.00	287.00	-
120.00	208.00	336.00	-
150.00	238.00	383.00	-
185.00	266.00	435.00	-
240.00	310.00	515.00	-
300.00	355.00	596.00	-

Ονομαστική διατομή (mm <sup>2</sup> )	Επιτρεπόμενη ένταση (A)		
	Ομάδα I	Ομάδα II	Ομάδα III
400.00	-	710.00	-
500.00	-	810.00	-

**Πίνακας 9.3:** Μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση συνεχούς ροής για χάλκινους αγωγούς με μόνωση από PVC ή πλαστικό.

Θερμοκρασία περιβάλλοντος (°C)	Ποσοστό εντάσεως του πίνακα 3.2 (%)
30	100
35	91
40	82
45	71
50	58
55	41

**Πίνακας 9.4:** Συντελεστές διόρθωσης του πίνακα 3.2 για θερμοκρασίες περιβάλλοντος άνω των 30°.

Οι ομάδες που αναφέρονται παραπάνω έχουν ως εξής:

- *Ομάδα I* : Τρεις το πολύ ενεργοί αγωγοί στον ίδιο σωλήνα ή καλώδιο σε ορατή ή χωνευτή εγκατάσταση.
- *Ομάδα II* : Μονοπολικά καλώδια ή μονοπολικοί αγωγοί σε ορατές εγκαταστάσεις, εφ' όσον το μεταξύ τους διάστημα δεν είναι μικρότερο από την εξωτερική τους διάμετρο.
- *Ομάδα III* : Σειρίδες των τριών το πολύ ενεργών αγωγών σε ορατή εγκατάσταση και γραμμές προσαγωγής σε κινητές ή φορητές συσκευές.

Επιλέχθηκαν για τη συγκεκριμένη μελέτη τα καλώδια της Ομάδας II, και επομένως στους κώδικες, που πραγματοποιήσαμε στο περιβάλλον του Matlab, εισάγαμε τα όρια ασφαλούς λειτουργίας που αναγράφονται στον πίνακα 9.3 στη στήλη *Ομάδα II*.

Επιπρόσθετα, ένας σημαντικός παράγοντας επιλογής καλωδίου στην ανάλυσή μας, εκτός της ενεργειακής παραγωγής, είναι το κόστος της εγκατάστασης που υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας τα μέτρα του καλωδίου, δηλαδή την απόσταση της ανεμογεννήτριας από τον ανορθωτή, με την τιμή ανά μέτρο του κάθε καλωδίου ανάλογα με τη διατομή του. Παρακάτω, λοιπόν, καταγράφεται η τιμή του καλωδίου ανά μέτρο, ανάλογα με τις εμπορικά

διαθέσιμες διατομές, η οποία χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της βέλτιστης διατομής του καλωδίου.

Διατομή καλωδίου (mm <sup>2</sup> )	Τιμή καλωδίου (€)/m
0.75	0.56
1.00	0.84
1.50	0.61
2.50	0.91
4.00	1.44
6.00	2.09
10.00	3.60
16.00	5.78

**Πίνακας 9.5:** Τιμή καλωδίου ανά μέτρο σύμφωνα με τις εμπορικά διαθέσιμες διατομές.

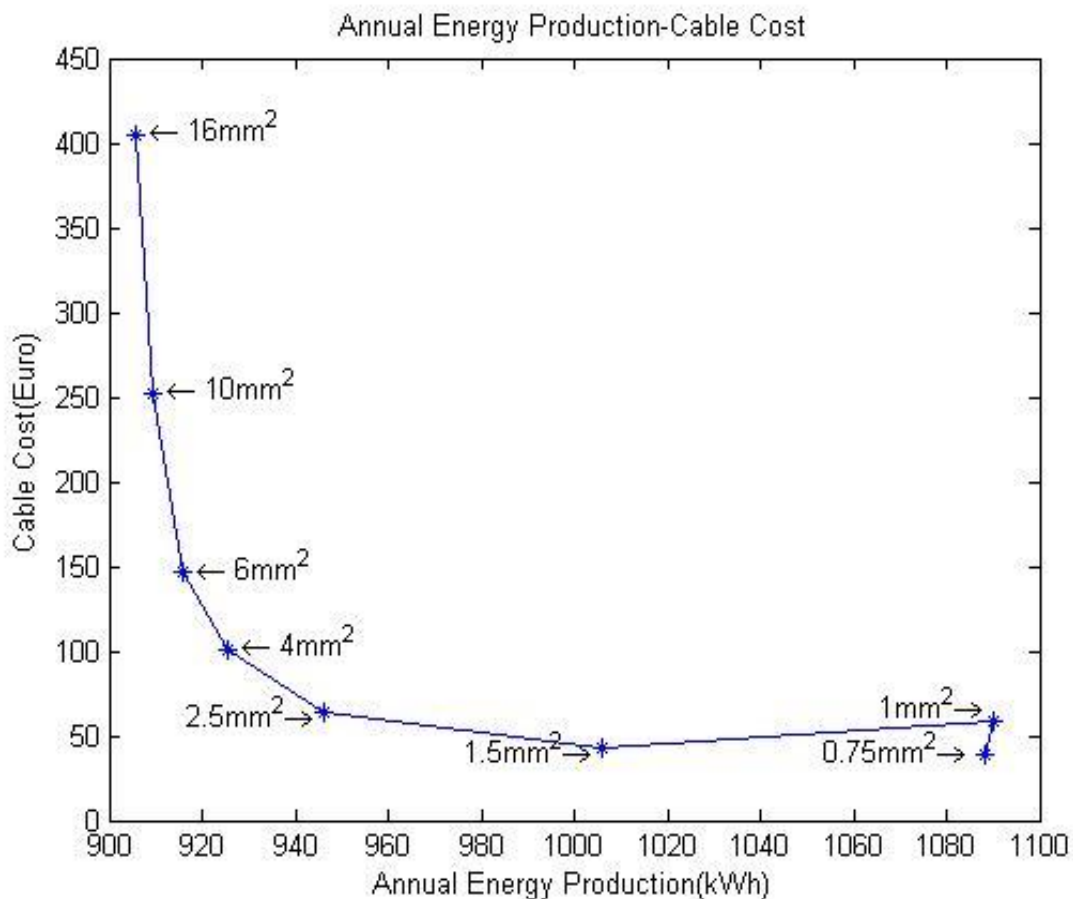
Συνεπώς, στις εφαρμογές χαμηλού κόστους για τις οποίες ενδιαφερόμαστε, το βέλτιστο καλώδιο επιλέγεται ανάμεσα από τα εμπορικά διαθέσιμα σύμφωνα με:

- τη μέγιστη ετήσια ενεργειακή παραγωγή που παράγεται με κάθε διατομή καλωδίου,
- και το κόστος της εγκατάστασης.

Αυτή η λειτουργία υλοποιείται στο περιβάλλον του Matlab (Κώδικας 2, Παράρτημα Γ) στον οποίο ως είσοδος εισέρχεται η απόσταση της ανεμογεννήτριας από τις μπαταρίες –δηλαδή το μήκος του καλωδίου-, στη συνέχεια υπολογίζεται το κόστος και η ετήσια ενεργειακή παραγωγή για κάθε διατομή καλωδίου, σχεδιάζεται το διάγραμμα της ενεργειακής παραγωγής συναρτήσει του κόστους του καλωδίου για όλες τις εμπορικά διαθέσιμες διατομές και τέλος επιλέγεται ο βέλτιστος συνδυασμός των δύο μεγεθών που μας υποδεικνύει και την τελική βέλτιστη διατομή που πρέπει να επιλεγεί.

Πιο αναλυτικά, το διάγραμμα της ενεργειακής παραγωγής συναρτήσει του κόστους καλωδίου για κάθε διατομή μπορεί να έχει δύο μορφές. Η πρώτη μορφή απεικονίζεται στο σχήμα 9.1(α) και η δεύτερη στο σχήμα 9.1(β).

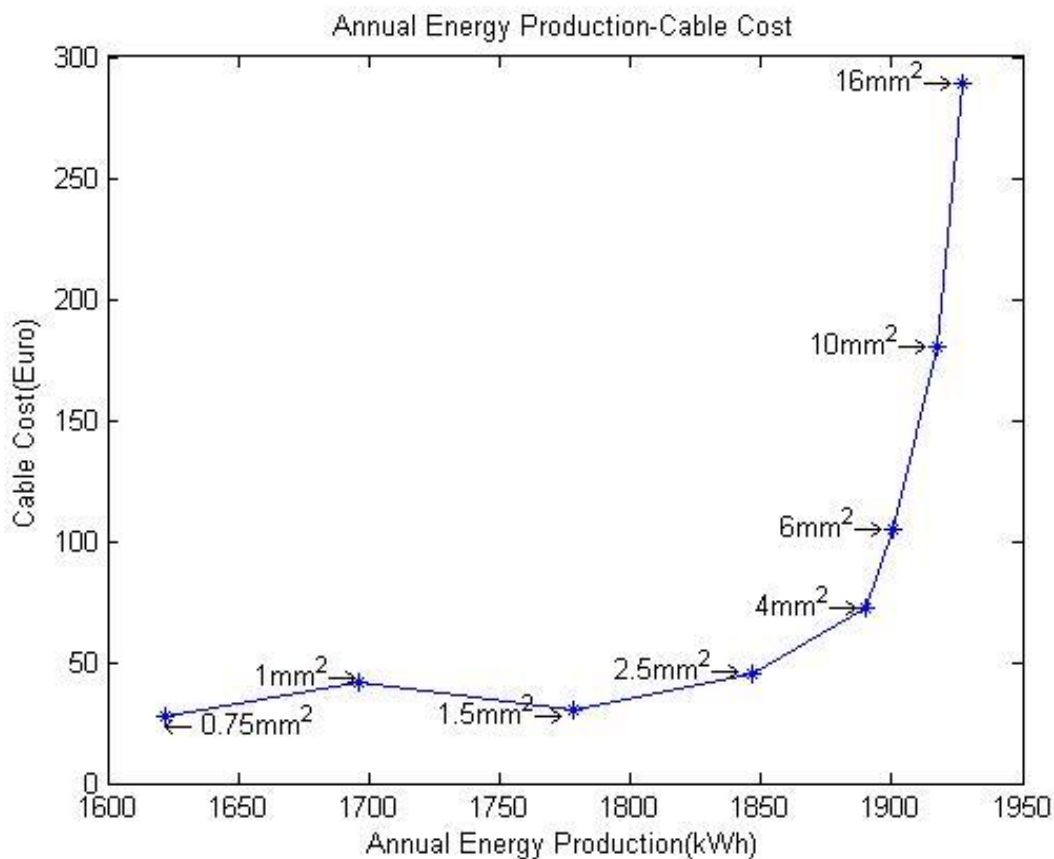




**Σχήμα 9.1(α):** Επιλογή διατομής καλωδίου σύμφωνα με την ενεργειακή παραγωγή και το κόστος του καλωδίου, Μορφή Α.

Στο παραπάνω διάγραμμα εξετάσαμε τη γεννήτρια ονομαστικής ισχύος 850W με  $g=3mm$  για απόσταση της ανεμογεννήτριας από τον ανορθωτή 70m και η βέλτιστη διατομή καλωδίου, λοιπόν, είναι  $1mm^2$  καθώς σε αυτή παρατηρήσαμε ότι έχει τη μέγιστη ενεργειακή παραγωγή και πολύ χαμηλό κόστος.

Όμως, εξετάζοντας γεννήτρια μεγαλύτερης ισχύος σχεδιάστηκε το διάγραμμα ενεργειακής παραγωγής συναρτήσε του κόστους του καλωδίου που απεικονίζεται στο σχήμα 9.1(β) και παρατηρούμε ότι η βέλτιστη διατομή βρίσκεται στο “γόνατο” της καμπύλης και συγκεκριμένα για  $4mm^2$  όπου η ενεργειακή παραγωγή είναι αρκετά μεγάλη και το κόστος παραμένει χαμηλό. Συνεπώς, στην υλοποίηση του κώδικα 2 συμπεριλάβαμε και τις δύο περιπτώσεις (Μορφή Α,Β) για την εύρεση της βέλτιστης διατομής καλωδίου.



**Σχήμα 9.1(β):** Επιλογή διατομής καλωδίου σύμφωνα με την ενεργειακή παραγωγή και το κόστος του καλωδίου, Μορφή Β.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί πως σε περίπτωση που το ρεύμα γραμμής  $I_{ac}$ , το οποίο μετράται στο μοντέλο προσομοίωσης, ξεπερνά τα όρια ασφαλούς λειτουργίας (Πίνακας 9.3) της βέλτιστης διατομής καλωδίου ως προς την ενεργειακή παραγωγή που προκύπτει από την άνωθι διαδικασία τότε επιλέγεται η επόμενη εμπορικά διαθέσιμη διατομή.

### 9.2.6 Διαδικασία εύρεσης βέλτιστου διακένου της γεννήτριας και αποτελέσματα ετήσιας ενεργειακής παραγωγής

Στην προηγούμενη ενότητα, αναλύθηκε η διαδικασία εύρεσης της βέλτιστης διατομής καλωδίου που συνδέει την ανεμογεννήτρια με τον ανορθωτή καθώς και υπολογισμού της ενεργειακής παραγωγής για δεδομένη απόσταση της ανεμογεννήτριας από τον ανορθωτή και τις μπαταρίες. Σε αυτή την ενότητα, λοιπόν, κρίνεται απαραίτητο η μελέτη αυτή να επαναληφθεί για διάφορες τιμές των μεταβλητών ώστε να βρεθεί το βέλτιστο διάκενο της γεννήτριας που καθορίζεται στην κατασκευή της (κώδικας 3, Παράρτημα Γ):

- απόστασης της ανεμογεννήτριας από τον ανορθωτή-μπαταρίες, συγκεκριμένα από 30 έως 150m με βήμα 10m
- διακένου  $g$  μεταξύ των μαγνητών και των πηνίων στη γεννήτρια,  $g=2-9\text{mm}$  με βήμα 0.5mm.

Συνεπώς, στον πίνακα 9.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ετήσιας ενεργειακής παραγωγής,  $AEP(kWh)$ , συναρτήσει της απόστασης της ανεμογεννήτριας από τον ανορθωτή-μπαταρίες,  $L(m)$ , και του διακένου μεταξύ των μαγνητών και των πηνίων στη γεννήτρια,  $g(mm)$ , για τη γεννήτρια αξονικής ροής μονίμων μαγνητών ονομαστικής ισχύος 850W.

$g \setminus L(m)$	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
2	863	886	918	977	1.033	1.045	1.042	1.041	1.046	1.042	1.035	1.033	1.041
2,5	913	949	1.008	1.058	1.070	1.064	1.070	1.071	1.063	1.058	1.069	1.070	1.071
3	980	1.037	1.085	1.096	1.090	1.096	1.090	1.085	1.096	1.096	1.094	1.088	1.079
3,5	1.061	1.109	1.121	1.120	1.121	1.111	1.120	1.121	1.118	1.111	1.106	1.114	1.120
4	1.132	1.146	1.146	1.142	1.144	1.146	1.142	1.135	1.140	1.146	1.146	1.146	1.142
4,5	1.170	1.170	1.164	1.170	1.168	1.162	1.168	1.170	1.169	1.166	1.160	1.155	1.169
5	1.192	1.191	1.191	1.188	1.192	1.192	1.190	1.183	1.174	1.192	1.192	1.191	1.188
5,5	1.213	1.211	1.213	1.212	1.207	1.201	1.193	1.212	1.208	1.204	1.200	1.195	1.189
6	1.237	1.235	1.229	1.221	1.233	1.229	1.224	1.219	1.213	1.206	1.199	1.193	1.185
6,5	1.251	1.243	1.250	1.245	1.239	1.231	1.223	1.217	1.209	1.200	1.191	1.184	1.176
7	1.266	1.259	1.250	1.242	1.234	1.225	1.215	1.206	1.198	1.189	1.179	1.170	1.162
7,5	1.262	1.253	1.243	1.233	1.223	1.213	1.203	1.193	1.184	1.175	1.165	1.155	1.146
8	1.250	1.240	1.229	1.218	1.207	1.197	1.187	1.176	1.166	1.156	1.147	1.137	1.127
8,5	1.239	1.227	1.216	1.204	1.193	1.182	1.171	1.160	1.150	1.139	1.129	1.119	1.109
9	1.223	1.211	1.199	1.187	1.176	1.164	1.152	1.141	1.130	1.120	1.109	1.098	1.088

**Πίνακας 9.6:** Αποτελέσματα ετήσιας ενεργειακής παραγωγής (kWh) συναρτήσει της απόστασης της ανεμογεννήτριας από τον ανορθωτή-μπαταρίες,  $L(m)$ , και του διακένου της γεννήτριας,  $g(mm)$ .

Στη συνέχεια, προσθέτοντας για κάθε διάκενο τα αποτελέσματα της ενεργειακής παραγωγής στα διάφορα μήκη καλωδίου υπολογίζουμε το βέλτιστο διάκενο της γεννήτριας σύμφωνα με το μέγιστο άθροισμα της ενεργειακής παραγωγής σ' αυτά τα μήκη καλωδίου. Το βέλτιστο αυτό διάκενο καθορίζεται από την κατασκευή της γεννήτριας, και για την εξεταζόμενη ονομαστικής ισχύος 850W προκύπτει  $g=6.5\text{mm}$ .

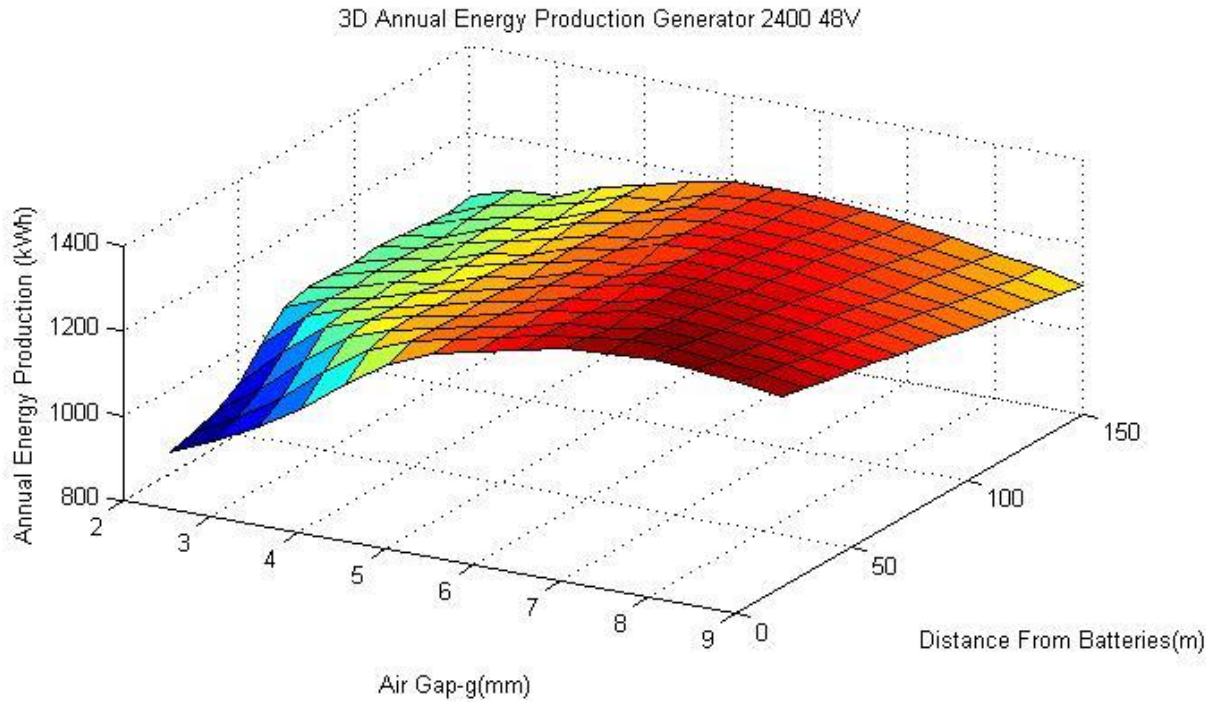
Επιπλέον, στον πίνακα 9.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βέλτιστης διατομής του καλωδίου,  $S(mm^2)$ , συναρτήσει της απόστασης της ανεμογεννήτριας από τον ανορθωτή-

μπαταρίες,  $L(m)$ , και του διακένου μεταξύ των μαγνητών και των πηνίων στη γεννήτρια,  $g(mm)$ , για τη γεννήτρια αξονικής ροής μονίμων μαγνητών ονομαστικής ισχύος 850W.

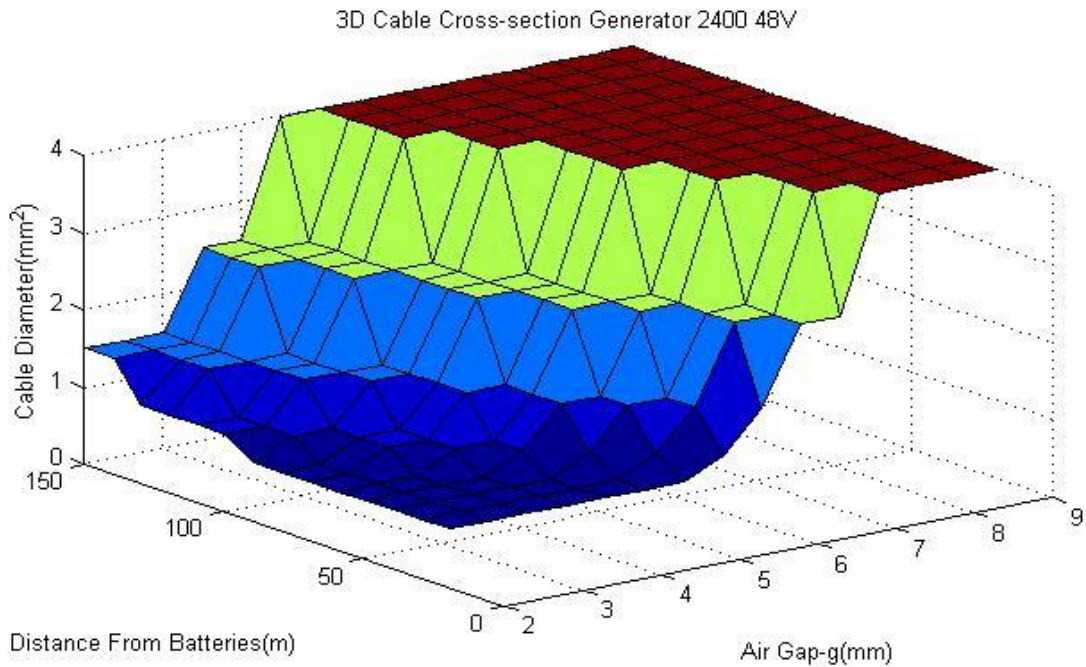
G(mm)\L(m)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
2	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	1,00	1,00	1,00	1,00	1,50	1,50
2,5	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	1,00	1,00	1,00	1,50	1,50	1,50	1,50
3	0,75	0,75	0,75	0,75	1,00	1,00	1,00	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
3,5	0,75	0,75	0,75	1,00	1,00	1,00	1,50	1,50	1,50	1,50	2,50	2,50	2,50
4	0,75	0,75	1,00	1,00	1,50	1,50	1,50	1,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
4,5	0,75	1,00	1,50	1,50	1,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	4,00
5	1,00	1,50	1,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	4,00	4,00	4,00	4,00
5,5	1,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
6	2,50	2,50	2,50	2,50	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
6,5	2,50	2,50	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
7	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
7,5	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
8	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
8,5	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
9	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00

**Πίνακας 9.7:** Αποτελέσματα βέλτιστης διατομής καλωδίου ( $mm^2$ ) συναρτήσει της απόστασης της ανεμογεννήτριας από τον ανορθωτή-μπαταρίες,  $L(m)$ , και του διάκενου της γεννήτριας,  $g(mm)$ .

Σύμφωνα με τους πίνακες 9.6 και 9.7, σχεδιάστηκαν οι τρισδιάστατες γραφικές παραστάσεις της ενεργειακής παραγωγής,  $AEP(kWh)$ , και της βέλτιστης διατομής καλωδίου,  $S(mm^2)$ , συναρτήσει της απόστασης της ανεμογεννήτριας από τον ανορθωτή-μπαταρίες,  $L(m)$ , και του διακένου μεταξύ των μαγνητών και των πηνίων της γεννήτριας,  $g(mm)$ , ώστε να έχουμε καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων (Σχήματα 9.2 και 9.3).



**Σχήμα 9.2:** Τρισδιάστατο γράφημα ετήσιας ενεργειακής παραγωγής (kWh) συναρτήσει της απόστασης της ανεμογεννήτριας από τον ανορθωτή-μπαταρίες,  $L(m)$ , και του διάκενου της γεννήτριας,  $g(mm)$ .



**Σχήμα 9.2:** Τρισδιάστατο γράφημα της βέλτιστης διατομής του καλωδίου ( $mm^2$ ) συναρτήσει της απόστασης της ανεμογεννήτριας από τον ανορθωτή-μπαταρίες,  $L(m)$ , και του διάκενου της γεννήτριας,  $g(mm)$ .

### 9.2.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων της απευθείας σύνδεσης της ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές και της σύνδεσης μέσω MPPT

Στις προηγούμενες ενότητες καταγράφηκαν και αναλύθηκαν τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης της απευθείας σύνδεσης της ανεμογεννήτριας σε συστοιχία συσσωρευτών. Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης της σύνδεσης της ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές μέσω MPPT (Maximum Power Point Tracking) και θα γίνει η σύγκριση των δύο μοντέλων. Και άρα, για την πραγματοποίηση του δεύτερου μοντέλου προστέθηκε στο ήδη υπάρχον η λειτουργία του MPPT (Κώδικας 4, Παράρτημα Γ) για την οποία γίνεται εκτενής ανάλυση σε προηγούμενο κεφάλαιο. Ουσιαστικά πρόκειται για τη μεγιστοποίηση της ισχύος εξόδου και επομένως της ενέργειας που παράγεται από την ανεμογεννήτρια μέσω του βέλτιστου ζεύγους αεροδυναμικού συντελεστή  $c_p$  και αεροδυναμικού λόγου του ακροπτερυγίου  $\lambda$ .

Στον πίνακα 9.8 καταγράφονται τα αποτελέσματα της απευθείας σύνδεσης της ανεμογεννήτριας ονομαστικής ισχύος 850W σε συσσωρευτές 48V για βέλτιστο διάκενο που υπολογίστηκε μέσω του Κώδικα 3,  $g=6.5mm$ , και βέλτιστη διατομή καλωδίου,  $S=4mm^2$ . Επιλέχθηκε η παρουσίαση των αποτελεσμάτων να γίνει για απόσταση 50m της ανεμογεννήτριας από τον ανορθωτή-μπαταρίες καθώς ορίζεται από το πρότυπο IEC 61400-12-1 η ελάχιστη επιτρεπόμενη απόσταση του χρήστη, και άρα των μπαταριών, από την ανεμογεννήτρια να είναι 3 φορές το ύψος του πύργου στον οποίο είναι εγκατεστημένη η ανεμογεννήτρια [31]. Επίσης, μέσω μελετών που έχουν γίνει για το θόρυβο της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας κρίθηκε πως η κατάλληλη τιμή απόστασης της ανεμογεννήτριας από συσσωρευτές για την έρευνά μας είναι τα 50m. Παρακάτω καταγράφονται τα αποτελέσματα της ισχύος που αποδίδεται στις μπαταρίες  $P_{batt}$ , των απωλειών ισχύος στο καλώδιο που συνδέει την ανεμογεννήτρια με τον ανορθωτή  $P_{cable}$ , της συνολικής απόδοσης του συστήματος *Efficiency* η οποία υπολογίζεται από την εξίσωση 6.5 καθώς και της ετήσιας ενεργειακής παραγωγής *AEP*.

Vw (m/s)	Pbatt (W)	Pcable (W)	Efficiency	AEP (kWh)
2,5	0,0	0,000	0,0000	1253,0
3	0,0	0,000	0,0000	
3,5	4,7	0,023	0,0400	
4	18,7	0,068	0,1078	
4,5	50,2	0,448	0,2030	
5	81,4	1,161	0,2400	
5,5	116,2	2,335	0,2574	
6	154,0	4,043	0,2627	
6,5	208,1	7,256	0,2792	
7	257,6	10,951	0,2766	

Vw (m/s)	Pbatt (W)	Pcable (W)	Efficiency	AEP (kWh)
7,5	316,7	16,294	0,2765	
8	387,8	23,998	0,2790	
8,5	470,0	34,585	0,2820	
9	557,0	47,667	0,2815	
9,5	639,8	61,907	0,2749	
10	713,8	75,952	0,2630	
10,5	774,5	88,501	0,2465	
11	817,3	97,783	0,2262	
11,5	819,0	98,230	0,1984	
12	650,1	63,784	0,1386	
12,5	538,3	44,704	0,1015	
13	493,1	37,878	0,0827	
13,5	459,5	33,119	0,0688	
14	425,2	28,579	0,0571	
14,5	384,5	23,623	0,0465	
15	338,1	18,462	0,0369	
15,5	289,5	13,714	0,0286	
16	243,9	9,866	0,0219	

**Πίνακας 9.8 :** Αποτελέσματα ισχύος στους συσσωρευτές, απωλειών στο καλώδιο, συνολικής απόδοσης του συστήματος και ενεργειακής παραγωγής της απευθείας σύνδεσης της ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές για γεννήτρια 2400 σε συσσωρευτές 48V,  $g=6.5\text{mm}$ ,  $S=4\text{mm}^2$  και  $L=50\text{m}$ .

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα της σύνδεσης της ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές μέσω MPPT για διατομή καλωδίου  $10\text{mm}^2$  η οποία επιλέχθηκε ώστε οι απώλειες στο καλώδιο να είναι ελάχιστες καθώς δε μας ενδιαφέρει το κόστος σε αυτή την περίπτωση. Επίσης, παρακάτω καταγράφονται τα αποτελέσματα του ποσοστού της απόκλισης της ισχύος που αποδίδεται στις μπαταρίες με και χωρίς MPPT.

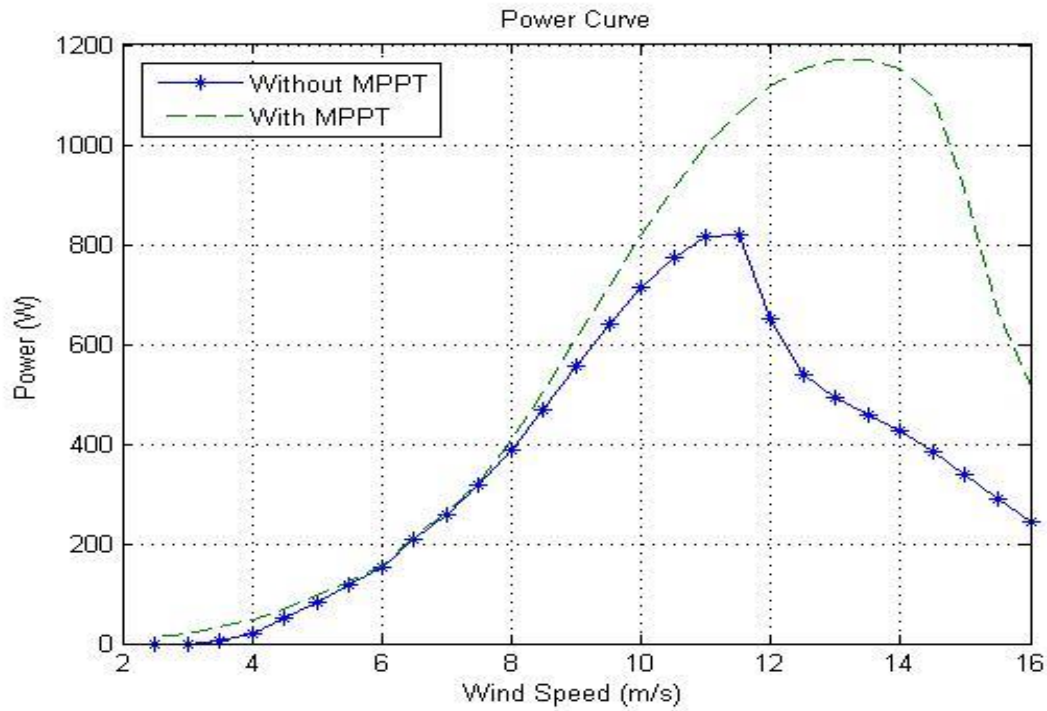
Vw (m/s)	Pbatt (W)	Pcable (W)	Efficiency	AEP (kWh)	PbattMPPT-Pbatt (%)
2,5	11,9	0,043	0,2410	1484,9	100,00
3	20,4	0,090	0,1990		100,00
3,5	32,7	0,183	0,1730		85,77
4	46,6	0,328	0,2598		59,87
4,5	68,0	0,614	0,2671		26,13
5	95,2	1,056	0,2822		14,47
5,5	125,8	1,611	0,2774		7,57
6	154,8	1,475	0,2728		0,51
6,5	212,7	2,684	0,2852		2,15

Vw (m/s)	Pbatt (W)	Pcable (W)	Efficiency	AEP (kWh)	PbattMPPT-Pbatt (%)
7	264,7	3,808	0,2839		2,69
7,5	322,5	3,834	0,2865		1,81
8	407,6	6,018	0,2935		4,86
8,5	505,1	8,611	0,3037		6,94
9	612,0	11,716	0,3096		8,99
9,5	718,2	14,470	0,3090		10,92
10	819,3	17,503	0,3026		12,87
10,5	914,8	21,861	0,2912		15,34
11	997,7	25,845	0,2763		18,08
11,5	1065,8	29,696	0,2585		23,15
12	1117,5	32,583	0,2383		41,82
12,5	1152,7	34,864	0,2176		53,30
13	1171,4	36,066	0,1966		57,90
13,5	1171,0	36,033	0,1754		60,76
14	1153,9	33,818	0,1555		63,15
14,5	1095,0	29,416	0,1325		64,88
15	909,1	20,439	0,0909		62,81
15,5	665,5	11,221	0,0600		56,50
16	514,3	6,818	0,0433		52,57

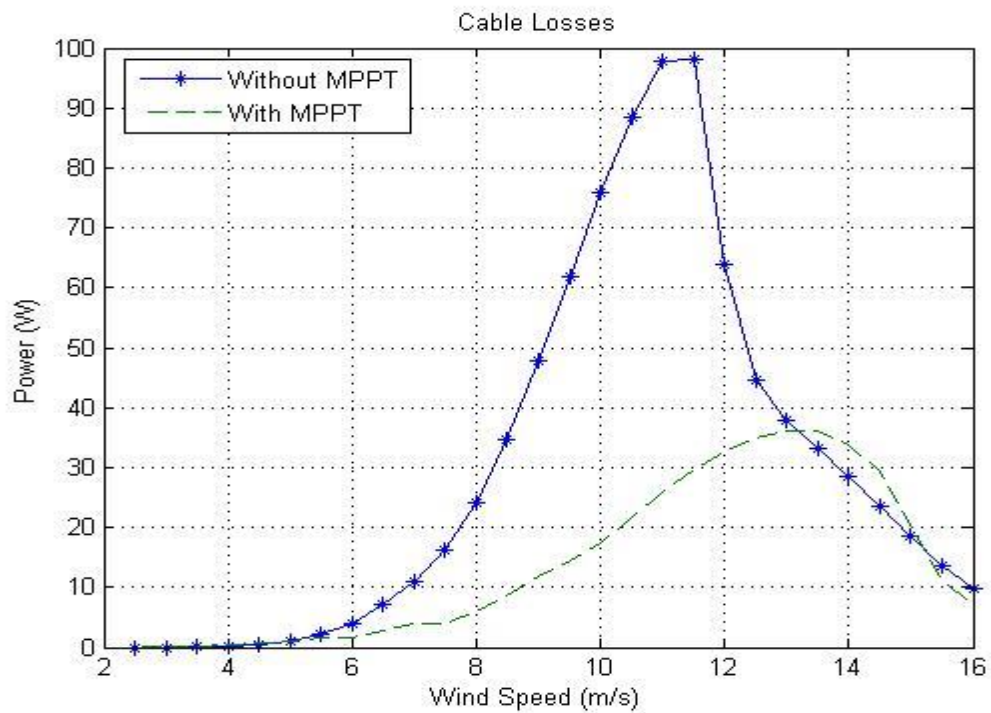
**Πίνακας 9.9:** Αποτελέσματα ισχύος στους συσσωρευτές, απωλειών στο καλώδιο, συνολικής απόδοσης του συστήματος και ενεργειακής παραγωγής της σύνδεσης της ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές μέσω MPPT για γεννήτρια 2400 σε συσσωρευτές 48V,  $g=6.5\text{mm}$ ,  $S=10\text{mm}^2$  και  $L=50\text{m}$  και το ποσοστό απόκλισης της ισχύος των μπαταριών με και χωρίς MPPT .

Σύμφωνα με τα δεδομένα που παρουσιάζονται στους πίνακες 9.8 και 9.9, σχεδιάζονται γραφικές με τα αποτελέσματα των μοντέλων προσομοίωσης της απευθείας σύνδεσης της ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές και της σύνδεσης αυτής μέσω MPPT ώστε να αποτυπωθούν εποπτικά και οι αποκλίσεις τους. Συγκεκριμένα, πρόκειται για τις γραφικές της ισχύος που αποδίδεται στις μπαταρίες, των απωλειών ισχύος στο καλώδιο που συνδέει την ανεμογεννήτρια με τον ανορθωτή-μπαταρίες, της συνολικής απόδοσης του συστήματος και του ποσοστού της απόκλισης της ισχύος των μπαταριών με και χωρίς MPPT συναρτήσε της ταχύτητας ανέμου (Σχήματα 9.3-9.6).

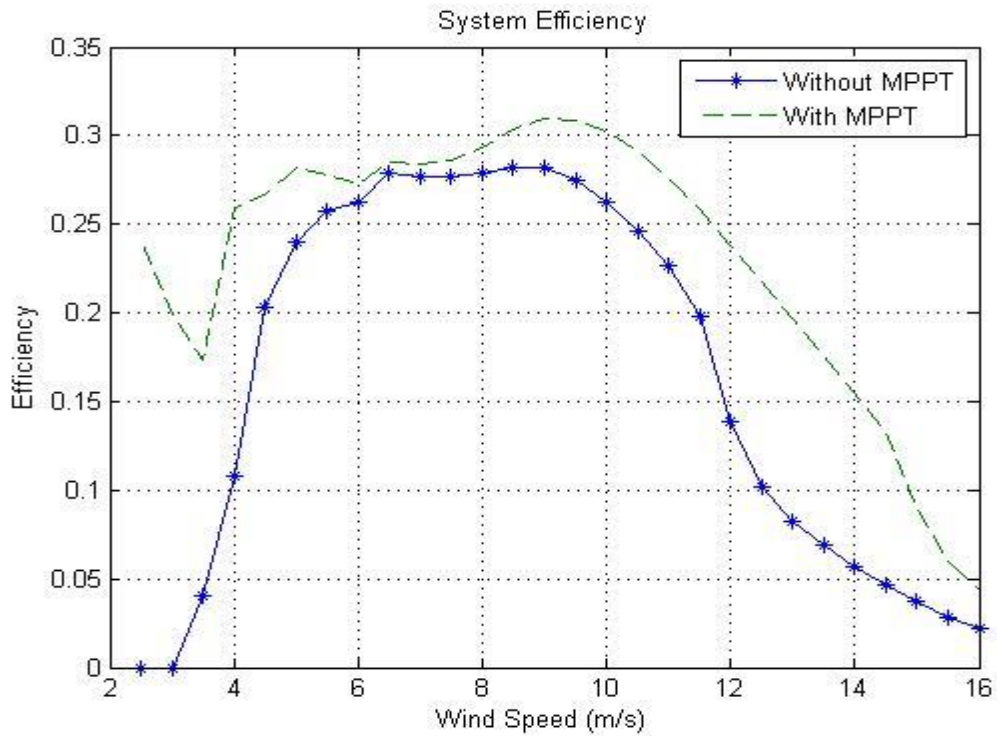




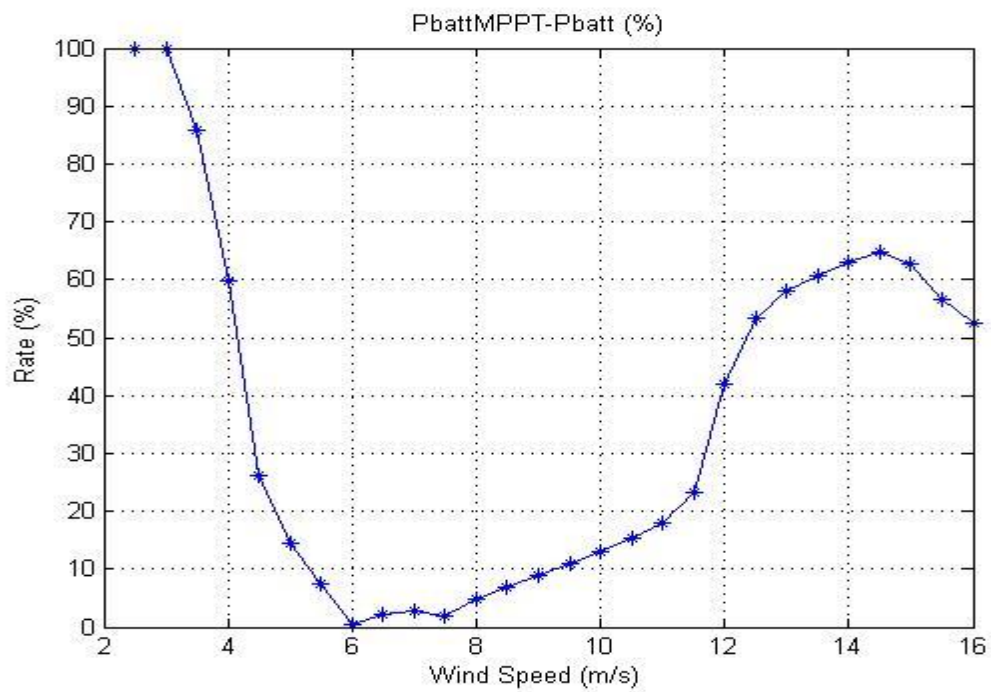
**Σχήμα 9.3:** Αποτελέσματα ισχύος που αποδίδεται στις μπαταρίες συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου με και χωρίς MPPT.



**Σχήμα 9.4:** Αποτελέσματα απωλειών ισχύος στο καλώδιο συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου με και χωρίς MPPT.



**Σχήμα 9.5:** Αποτελέσματα συνολικής απόδοσης του συστήματος συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου με και χωρίς MPPT.



**Σχήμα 9.6:** Απόκλιση της ισχύος που αποδίδεται στις μπαταρίες με και χωρίς MPPT συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου.

Από τα σχήματα 9.3 και 9.6 παρατηρούμε πως οι αποκλίσεις στην ισχύ που αποδίδει η ανεμογεννήτρια στις μπαταρίες μεταξύ του μοντέλου της απευθείας σύνδεσης και του μοντέλου σύνδεσης μέσω MPPT είναι κάτω από 10% για ταχύτητες ανέμου 5.5 έως 9.5m/s οι οποίες είναι συχνότερα εμφανιζόμενες. Διαπιστώνουμε, λοιπόν, ότι η μοντελοποίηση που έγινε για τη σύνδεση της ανεμογεννήτριας απευθείας σε συσσωρευτές είναι αρκετά ικανοποιητική καθώς μας ενδιαφέρει κυρίως η λειτουργία της ανεμογεννήτριας σε αυτό το εύρος ταχυτήτων ανέμου και όχι σε αυτές που βρίσκονται κοντά στην ονομαστική ταχύτητα ανέμου. Και αυτό διότι όταν έχουμε ταχύτητες ανέμου κοντά στην ονομαστική οι συσσωρευτές φτάνουν σε πλήρη κατάσταση φόρτισης πολύ σύντομα με συνέπεια η υπόλοιπη ενέργεια να οδηγείται στο απορριπτικό φορτίο, γεγονός το οποίο δε μας προσφέρει κάτι.

Επιπλέον, από το γράφημα 9.5 παρατηρούμε πως στην περίπτωση της σύνδεσης της ανεμογεννήτριας στους συσσωρευτές μέσω MPPT η συνολική απόδοση του συστήματος μειώνεται πιο ομαλά σε σύγκριση με την απευθείας σύνδεση για ταχύτητες μεγαλύτερες από 11.5m/s. Αυτό οφείλεται κυρίως στις απώλειες του καλωδίου οι οποίες όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στο γράφημα 9.4 είναι σημαντικά μεγαλύτερες στην περίπτωση της απευθείας σύνδεσης. Και είναι λογικό να συμβαίνει αυτό καθώς στη σύνδεση της ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές μέσω MPPT χρησιμοποιήθηκε καλώδιο διατομής 10mm<sup>2</sup> το οποίο έχει αρκετά μικρή αντίσταση και συνεπώς σημαντικά λίγες απώλειες. Ενώ, στην απευθείας σύνδεση προέκυψε σύμφωνα με τον Κώδικα 2 πως η βέλτιστη διατομή καλωδίου με βάση την ετήσια ενεργειακή παραγωγή και το κόστος εγκατάστασης του καλωδίου είναι 4mm<sup>2</sup> η οποία συγκριτικά με το καλώδιο διατομής 10mm<sup>2</sup> έχει αρκετά μεγαλύτερη αντίσταση και επομένως περισσότερες απώλειες.



## Συμπεράσματα-Προτάσεις

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε κυρίως το κομμάτι της σύνδεσης ανεμογεννητριών απευθείας σε συσσωρευτές καθώς και το κομμάτι της εύρεσης της βέλτιστης διατομής καλωδίου αλλά και του βέλτιστου διακένου μεταξύ των μαγνητών και των πηνίων της γεννήτριας για τη μέγιστη ενεργειακή παραγωγή. Ακόμη, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων της απευθείας σύνδεσης ανεμογεννητριών σε συσσωρευτές με τα αποτελέσματα της σύνδεσης μέσω MPPT.

Όσον αφορά τη σύνδεση σε συστοιχία συσσωρευτών παρατηρήσαμε την καταλυτική σημασία που παίζει το καλώδιο σύνδεσης μεταξύ της γεννήτριας και του ανορθωτή καθώς και το διάκενο μεταξύ των μαγνητών και των πηνίων της γεννήτριας. Αυτό που έχει ιδιαίτερη σημασία σε αυτό το σημείο είναι τα κριτήρια με τα οποία επιλέγεται η βέλτιστη διατομή καλωδίου. Στην εργασία μας, δόθηκε τόση προσοχή στην ενεργειακή παραγωγή όσο και στο κόστος του καλωδίου όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 9.1(β) και παρατηρήσαμε πως στο σύστημα 24V (Παράρτημα Β) θα μπορούσαμε να επιλέξουμε, για κάποιες τιμές απόστασης της ανεμογεννήτριας από τη συστοιχία συσσωρευτών, το επόμενο μέγεθος διατομής καλωδίου. Αυτό, όμως, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους του καλωδίου. Για την εξήγηση του παραπάνω συμπεράσματος, θα παραθέσουμε το παράδειγμα της γεννήτριας 3000 24V στο οποίο παρατηρούμε με το Σχήμα Α.6.1 πως για μεγάλες τιμές του μήκους καλωδίου υπάρχει μία απρόβλεπτη αύξηση της ενεργειακής παραγωγής η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι για τη συγκεκριμένη γεννήτρια είναι λεπτά τα όρια επιλογής βέλτιστης διατομής. Όμως, αυτό δεν είναι πρόβλημα και η συγκεκριμένη αύξηση θα μπορούσε να αποφευχθεί επιλέγοντας για τις υπόλοιπες τιμές μήκους καλωδίου το επόμενο μέγεθος διατομής αυξάνοντας το κόστος της εγκατάστασης, αν φυσικά είμαστε διατεθειμένοι.

Σημαντική είναι η διαφορά που υπάρχει στην ισχύ των συσσωρευτών και κατ' επέκταση στην ενεργειακή παραγωγή μεταξύ του συστήματος 48V και του συστήματος 24V. Ενώ οι τιμές του ρεύματος και της χωρητικότητας των συσσωρευτών στο μοντέλο προσομοίωσης θέτονται διπλάσιες στην περίπτωση του συστήματος 24V από τις αντίστοιχες τιμές στην περίπτωση του συστήματος 48V και αυτό συμβαίνει ώστε να μην υπάρχει διαφορά στην ισχύ που αποδίδεται στους συσσωρευτές από την ανεμογεννήτρια, παρατηρούμε πως τα αποτελέσματα της ενεργειακής παραγωγής εν τέλει απέχουν. Αυτό οφείλεται κυρίως στη σχεδίαση των γεννητριών που πραγματοποιείται με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (FEMM) και στον υπολογισμό μέσω του συγκεκριμένου προγράμματος των τιμών, που εισάγονται στο μοντέλο προσομοίωσης, της αντίστασης και της αυτεπαγωγής του τυλίγματος του στάτη καθώς και της ηλεκτρομαγνητικής ροπής της γεννήτριας. Επίσης, θα πρέπει να σημειωθεί πως αυτό παρατηρείται καθώς η ενεργειακή παραγωγή εξαρτάται από τη μία από το ποσοστό της αεροδυναμικής ισχύος που φτάνει στις μπαταρίες, και από την άλλη από την κατανομή του

ανέμου και σχετίζεται με τις καταστάσεις λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Με αυτό εννοούμε ότι είναι διαφορετικές οι τιμές τόσο των στροφών που λειτουργεί η γεννήτρια στα συστήματα 48V και 24V καθώς και των τιμών του  $c_p$  και  $\lambda$ .

Επιπλέον, στη σχεδίαση των γεννητριών μέσω του FEMM οφείλεται η διαφορά στο βέλτιστο διάκενο μεταξύ τόσο των διαφόρων γεννητριών όσο και των συστημάτων 48V και 24V. Συγκεκριμένα, η γεννήτρια 2400 48V παρουσιάζει βέλτιστο διάκενο  $g=6.5mm$  ενώ οι υπόλοιπες γεννήτριες για σύνδεση σε συσσωρευτές 48V παρουσιάζουν βέλτιστο διάκενο  $g=3-3.5mm$  και τούτο διότι, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, έχει πραγματοποιηθεί διαφορετική σχεδίαση των γεννητριών στο περιβάλλον του FEMM. Επιπρόσθετα, για ορθότερο και πιο ακριβή υπολογισμό του βέλτιστου διακένου στο σύστημα 24V θα έπρεπε να πραγματοποιηθεί διαφορετική σχεδίαση των γεννητριών με τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων (FEMM) ώστε να υπάρχει δυνατότητα εξέτασης διακένων μικρότερων των 2mm καθώς για τις γεννήτριες 3000 24V και 3600 24V υπολογίζεται πως το βέλτιστο διάκενο παρουσιάζεται για  $g=2mm$ .

Όσον αφορά, τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της απευθείας σύνδεσης της ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές και των αποτελεσμάτων της σύνδεσης μέσω MPPT παρατηρούμε πως για ταχύτητες ανέμου 5.5 έως 9.5m/s, οι οποίες εμφανίζονται πιο συχνά, οι αποκλίσεις στην ισχύ που αποδίδεται στους συσσωρευτές είναι κάτω από 10%. Πρέπει να αναφερθεί, επίσης, πως εστιάζουμε την προσοχή μας σε αυτό το εύρος ταχυτήτων και όχι σε ταχύτητες κοντά στην ονομαστική καθώς, εκτός του γεγονότος ότι αυτό το εύρος εμφανίζεται συχνότερα, για ταχύτητες ανέμου κοντά στην ονομαστική οι συσσωρευτές φτάνουν σε πλήρη κατάσταση φόρτισης πολύ σύντομα με αποτέλεσμα η υπόλοιπη ενέργεια να οδηγείται στο απορριπτικό φορτίο. Και αυτό συμβαίνει διότι πρόκειται για συσσωρευτές μικρής χωρητικότητας καθώς επικεντρωνόμαστε κυρίως σε εφαρμογές χαμηλού κόστους. Διαπιστώνουμε, λοιπόν, πως η μελέτη μας έχει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δοθεί στο σχήμα 7.3 και να παρατηρήσουμε πως υπάρχουν εμφανείς αποκλίσεις για ταχύτητες ανέμου 10m/s έως 11.5m/s μεταξύ των μετρήσεων της ισχύος στο πεδίο δοκιμών στη Ραφήνα και των αποτελεσμάτων του μοντέλου προσομοίωσης οι οποίες οφείλονται στο γεγονός ότι το πείραμα για τη μέτρηση της γωνίας Furling διεξήχθη χωρίς να προηγηθεί τρίψιμο και βάψιμο της φτερωτής. Συγκεκριμένα, η μέγιστη απόκλιση υπολογίζεται 6% για ταχύτητα ανέμου 10.5m/s. Για την ελαχιστοποίηση, λοιπόν, των αποκλίσεων αυτών πραγματοποιήθηκε συντήρηση της φτερωτής και σ' αυτό το στάδιο αναμένουμε για την καταμέτρηση των απαραίτητων μετρήσεων με στόχο την ορθότερη εξαγωγή της εξίσωσης της γωνίας Furling συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου και την εισαγωγή της στο μοντέλο προσομοίωσης.

Τέλος, πρόταση για μελλοντική εργασία θα μπορούσε να αποτελέσει η ανάπτυξη του ίδιου κώδικα, που υλοποιήθηκε στο περιβάλλον του Matlab, με καταναμημένο και παράλληλο

προγραμματισμό ο οποίος στηρίζεται στην κατανομή και ταυτόχρονη εκτέλεση μιας μεθόδου ή ενός αλγορίθμου σε πολλούς επεξεργαστικούς πυρήνες. Με αυτόν τον τρόπο, δίνεται η δυνατότητα να αυξηθούν οι επιδόσεις ενός προγράμματος με την εκμετάλλευση της υπολογιστικής ισχύος περισσότερων του ενός επεξεργαστικών πυρήνων και επομένως να μειωθεί σημαντικά η χρονική διάρκεια εκτέλεσης του προγράμματος και εξαγωγής των αποτελεσμάτων του μοντέλου προσομοίωσης.





## Παραρτήματα

### Παράρτημα Α: Μετρήσεις $c_p$ - $\lambda$

Οι μετρήσεις  $c_p$ - $\lambda$  για ταχύτητες ανέμου μέχρι 3.7m/s, 4.4m/s, 5.5m/s και 7.2m/s παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες και μέσω αυτών σχεδιάζονται οι καμπύλες  $c_p(\lambda)$  όπου εισάγονται στο μοντέλο της φτερωτής (Κεφάλαιο 4).

- Για ταχύτητες ανέμου μέχρι 3.7 m/s:

$\lambda$	$c_p$
0,0000000000	0,0000000000
1,0300000000	0,0300000000
1,8800000000	0,0700000000
2,6129457912	0,107324298
2,7995847763	0,118708681
2,9522894005	0,125183700
3,3595017316	0,155836517
4,2757294766	0,238090047
4,6659746272	0,253623219
4,9035151537	0,266534946
5,3616290262	0,312799810
5,4125305676	0,315769428
5,4294977480	0,309547934
5,5313008308	0,315351958
5,5822023722	0,318253970
5,8536772596	0,318181856
5,9894147033	0,341470065
6,0742506056	0,338239034
6,2608895907	0,340316246
6,4135942149	0,323061360
6,5153972976	0,328189318
6,6172003804	0,306950715
6,7529378241	0,304278002
6,9056424483	0,301986703
7,0413798920	0,289218076
7,2958875989	0,270600918
7,4655594035	0,257062703
7,6861327496	0,234031962
7,7370342910	0,225305645
7,9745748174	0,179264446

$\lambda$	$c_p$
8,1442466221	0,161444482
8,4157215095	0,122115488
8,6800000000	0,000000000

**Πίνακας Α.1:** Μετρήσεις  $c_p$ - $\lambda$  για ταχύτητες ανέμου μέχρι 3.7m/s.

- Για ταχύτητες ανέμου μέχρι 4.4m/s:

$\lambda$	$c_p$
0,0000000000	0,000000000
0,8400000000	0,030000000
1,4900000000	0,070000000
2,8065227420	0,123174530
2,9216621365	0,128227844
2,9936242581	0,134247050
4,1450182036	0,241337695
4,6199682060	0,273406090
4,6775379033	0,267872752
4,8214621465	0,280722667
5,0949182085	0,320989286
5,3251969976	0,330408201
5,3539818463	0,327077607
5,4979060894	0,330615890
5,5266909381	0,327065229
5,7281848785	0,355412065
5,7857545758	0,358984045
5,8001470001	0,354334075
5,8721091217	0,353118542
5,9152863947	0,361368002
5,9584636676	0,352617200
5,9728560919	0,353468932
6,0736030622	0,353626762
6,0879954865	0,348646689
6,1167803351	0,344449578
6,1887424567	0,348501926
6,2607045783	0,346571172
6,3038818512	0,342936954
6,3758439728	0,334665487
6,3902363971	0,341527830
6,4046288215	0,336176392

$\lambda$	$c_p$
6,4765909431	0,333764240
6,5341606403	0,330486600
6,6061227619	0,327813116
6,6493000349	0,329955686
6,7932242780	0,324113565
7,2393894319	0,283135163
7,8582636776	0,217221669
8,4339606503	0,152535398
8,6642394394	0,107019811
8,9100000000	0,070000000
9,3300000000	0,000000000

**Πίνακας Α.2:** Μετρήσεις  $c_p$ - $\lambda$  για ταχύτητες ανέμου μέχρι 4.4m/s.

- Για ταχύτητες ανέμου μέχρι 5.5m/s:

$\lambda$	$c_p$
0,0000000000	0,000000000
0,9900000000	0,040000000
2,0300000000	0,100000000
2,6474843614	0,133031622
2,7395707739	0,135978506
2,8086355834	0,137683872
2,9007219959	0,143977242
2,9928084085	0,146712323
3,0158300116	0,144141389
3,0273408132	0,152118768
3,4762620745	0,189601347
3,6834565028	0,201353935
3,9136725342	0,268668420
4,4661910096	0,331251934
4,5582774222	0,332490275
4,5697882237	0,336132755
4,5928098269	0,332192162
4,6273422316	0,334689848
4,6503638347	0,330650414
4,6618746363	0,337187533
4,7194286442	0,347139621
4,7654718504	0,344680590
4,7769826520	0,339653272

$\lambda$	$c_p$
4,7884934536	0,346345713
4,8345366599	0,349675960
4,8690690646	0,346200805
4,8805798662	0,347019246
5,0071986834	0,349879821
5,0187094850	0,350684142
5,2028823101	0,385891428
5,2259039133	0,377983062
5,2834579211	0,382145871
5,2949687227	0,382978433
5,3179903259	0,378120028
5,3295011274	0,388744943
5,3640335321	0,374813785
5,4446091431	0,377104610
5,5366955557	0,380086794
5,5482063573	0,377474029
5,5597171588	0,371437118
5,5827387620	0,379823452
5,5942495636	0,373744180
5,6172711667	0,378727549
5,6748251746	0,375646700
5,7323791824	0,372424648
5,7438899840	0,376695477
5,7784223887	0,371871843
5,8014439918	0,373353404
5,8129547934	0,363398139
5,8244655950	0,376399306
5,9856168170	0,370520894
6,0777032295	0,365038023
6,2158328484	0,350459631
6,2388544515	0,347931058
6,2503652531	0,352406629
6,2503652531	0,356240261
6,6187109034	0,340698166
6,8834593395	0,324772531
6,9525241490	0,310973927
7,0330997599	0,305950492
7,1366969741	0,297325349
7,1712293788	0,303162460
7,3438914024	0,292444352

$\lambda$	$c_p$
7,3669130055	0,279805721
7,6201506401	0,252033775
7,9194314809	0,232788306
8,2900000000	0,190000000
8,5900000000	0,150000000
8,8400000000	0,110000000

**Πίνακας Α.3:** Μετρήσεις  $c_p$ - $\lambda$  για ταχύτητες ανέμου μέχρι 5.5m/s.

- Για ταχύτητες ανέμου μέχρι 7.2m/s:

$\lambda$	$c_p$
3,2173642661	0,1413017
3,4361028790	0,1591649
3,5498469577	0,170780
3,5673460467	0,1707485
3,7073387590	0,1755384
4,2323114300	0,2412334
4,7922822791	0,3496668
4,8972768133	0,3614837
5,2647576830	0,3990662
5,2822567721	0,3873205
5,3610026727	0,3972156
5,4397485734	0,4003762
5,4922458405	0,3978075
5,5272440185	0,3902038
5,5972403747	0,3992930
5,6147394637	0,3971469
5,6409880973	0,3992298
5,6672367308	0,3977284
5,6847358198	0,3919111
5,7372330869	0,3923314
5,8159789876	0,3946672
5,9384726108	0,3926237
6,0697157786	0,3868158
6,1484616792	0,3943576
6,2447066689	0,3812424
6,3322021141	0,3790510
6,3846993812	0,3845750
6,4546957373	0,3792946

$\lambda$	$c_p$
6,5771893606	0,3762477
6,7609297954	0,3703950
6,7609297954	0,3682153
6,9359206858	0,3674820
7,0846629426	0,3531778
7,1546592987	0,3500381

**Πίνακας Α.4:** Μετρήσεις  $c_p$ - $\lambda$  για ταχύτητες ανέμου μέχρι 7.2m/s.

## Παράρτημα Β: Αποτελέσματα διαφόρων γεννητριών

### Β.1 Γεννήτρια 1800 48V

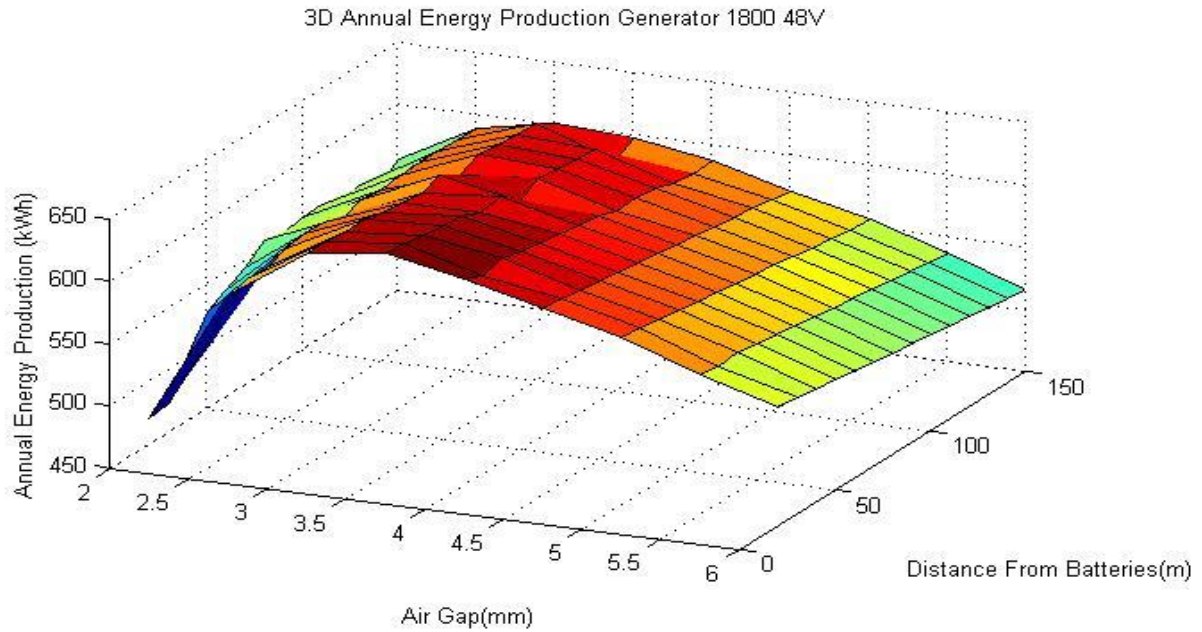
Από το πρόγραμμα Femm προκύπτουν για τη γεννήτρια 1800 σε σύνδεση σε συσσωρευτές 48V:

<b>Rphase (<math>\Omega</math>)</b>	2,4028
<b>Lphase (H)</b>	0,0151
<b>Rturbine</b>	0,9

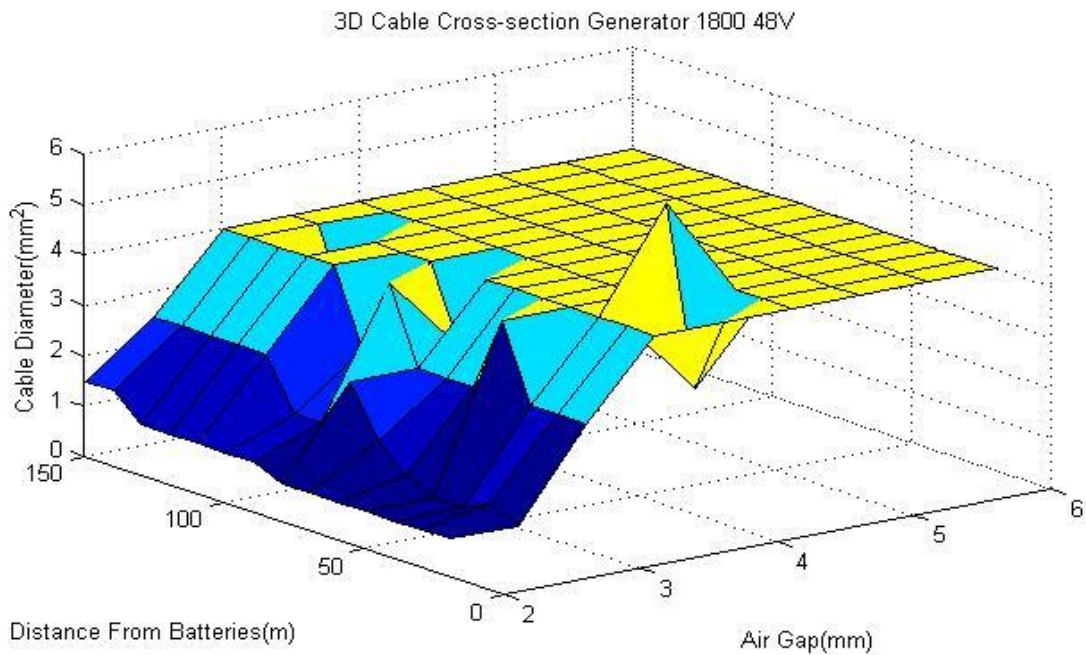
**Πίνακας Β.1.1:** Χαρακτηριστικά της γεννήτριας 1800 σε συσσωρευτές 48V.

<b>g (mm)</b>	<b>Torque Constant</b>
2	2,2821
2,5	2,1864
3	2,1032
3,5	2,0211
4	2,9426
4,5	2,8722
5	2,8034
5,5	2,7381
6	2,6762

**Πίνακας Β.1.2:** Τιμές της σταθεράς της ροπής προς το ρεύμα, Torque Constant, για τιμές διακένου 2 έως 6mm με βήμα 0.5mm για τη γεννήτρια 1800 σε συσσωρευτές 48V.



**Σχήμα Β.1.1:** Τρισδιάστατο γράφημα ετήσιας ενεργειακής παραγωγής (kWh) συναρτήσει της απόστασης της ανεμογεννήτριας από τον ανορθωτή-μπαταρίες,  $L(m)$ , και του διάκενου της γεννήτριας,  $g(mm)$  για τη γεννήτρια 1800 σε συσσωρευτές 48V.



**Σχήμα Β.1.2:** Τρισδιάστατο γράφημα της βέλτιστης διατομής του καλωδίου ( $mm^2$ ) συναρτήσει της απόστασης της ανεμογεννήτριας από τον ανορθωτή-μπαταρίες,  $L(m)$ , και του διάκενου της γεννήτριας,  $g(mm)$  για τη γεννήτρια 1800 σε συσσωρευτές 48V.



Μέσω του Κώδικα 3, υπολογίστηκε πως για τη γεννήτρια 1800 σε σύνδεση σε συσσωρευτές 48V το βέλτιστο διάκενο είναι  $g=3mm$ , και βέλτιστη διατομή καλωδίου,  $S=2.5mm^2$ . Επίσης, επιλέχθηκε για τα παρακάτω αποτελέσματα η απόσταση από τις μπαταρίες να είναι 50m:

Vw (m/s)	Pbatt (W)	Pcable (W)	Efficiency	AEP (kWh)
2,5	0,0	0,000	0,0000	560,1
3	0,0	0,000	0,0000	
3,5	0,0	0,000	0,0000	
4	0,0	0,001	0,0000	
4,5	0,0	0,002	0,0000	
5	4,8	0,013	0,0252	
5,5	51,6	0,709	0,2031	
6	78,6	1,600	0,2383	
6,5	105,3	2,799	0,2512	
7	128,3	4,081	0,2450	
7,5	154,1	5,797	0,2393	
8	187,2	8,442	0,2395	
8,5	228,7	12,449	0,2439	
9	270,4	17,291	0,2429	
9,5	305,9	22,054	0,2337	
10	334,6	26,303	0,2192	
10,5	356,9	29,909	0,2019	
11	372,4	32,516	0,1832	
11,5	376,0	33,118	0,1619	
12	315,8	23,361	0,1197	
12,5	251,1	14,952	0,0842	
13	227,2	12,304	0,0677	
13,5	205,8	10,156	0,0548	
14	184,7	8,223	0,0441	
14,5	164,5	6,581	0,0353	
15	144,7	5,144	0,0281	
15,5	124,3	3,848	0,0219	
16	103,6	2,722	0,0166	

**Πίνακας Β.1.3:** Αποτελέσματα ισχύος στους συσσωρευτές, απωλειών στο καλώδιο, συνολικής απόδοσης του συστήματος και ενεργειακής παραγωγής της απευθείας σύνδεσης της ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές για γεννήτρια 1800 σε συσσωρευτές 48V,  $g=3mm$ ,  $S=2.5mm^2$  και  $L=50m$ .

Vw (m/s)	Pbatt (W)	Pcable (W)	Efficiency	AEP (kWh)	PbattMPPT-Pbatt (%)
2,5	0,0	0,000	0,0000	674,3	0,00000
3	0,0	0,000	0,0000		0,00000
3,5	0,0	0,000	0,0000		0,00000
4	0,0	0,000	0,0008		0,00000
4,5	1,1	0,001	0,0082		99,99999
5	25,0	0,048	0,1321		80,77466
5,5	56,1	0,252	0,2207		8,07587
6	79,6	0,366	0,2309		1,22970
6,5	109,6	0,651	0,2608		3,90847
7	137,4	0,730	0,2605		6,60565
7,5	169,7	0,823	0,2672		9,15805
8	213,3	1,263	0,2734		12,22780
8,5	263,2	1,903	0,2807		13,11332
9	315,1	2,704	0,2832		14,18561
9,5	364,0	3,588	0,2783		15,96328
10	407,7	4,474	0,2670		17,92155
10,5	444,9	5,324	0,2521	19,79576	
11	476,4	6,097	0,2349	21,83618	
11,5	501,7	6,750	0,2162	25,06094	
12	519,6	7,235	0,1970	39,21654	
12,5	529,4	7,523	0,1778	52,57849	
13	532,7	7,612	0,1588	57,34454	
13,5	524,8	7,375	0,1398	60,77483	
14	481,1	5,949	0,1151	61,62174	
14,5	352,6	3,111	0,0759	53,34191	
15	285,9	2,030	0,0545	49,37186	
15,5	236,0	1,410	0,0397	47,32651	
16	190,3	0,939	0,0291	45,55043	

**Πίνακας Β.1.4:** Αποτελέσματα ισχύος στους συσσωρευτές, απωλειών στο καλώδιο, συνολικής απόδοσης του συστήματος και ενεργειακής παραγωγής της σύνδεσης της ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές μέσω MPPT για γεννήτρια 2400 σε συσσωρευτές 48V, g=3mm, S=10mm<sup>2</sup> και L=50m και το ποσοστό απόκλισης της ισχύος των μπαταριών με και χωρίς MPPT.

## B.2 Γεννήτρια 3000 48V

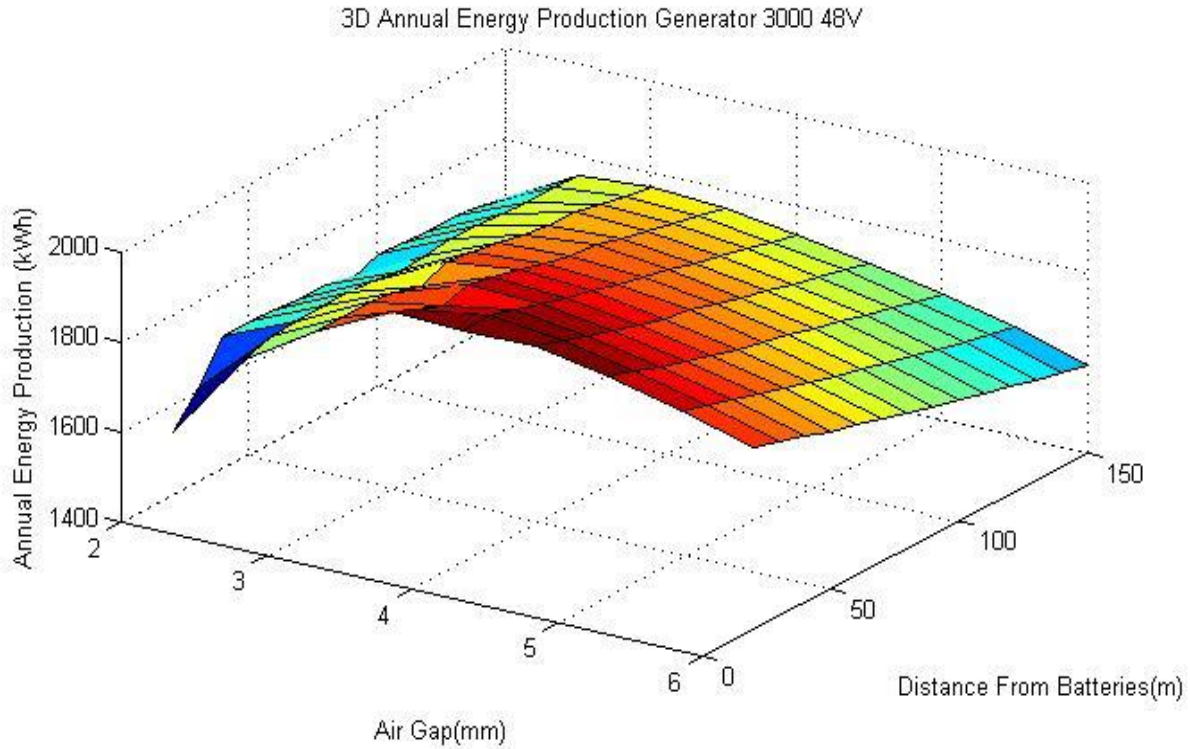
Από το πρόγραμμα Femm προκύπτουν για τη γεννήτρια 3000 σε σύνδεση σε συσσωρευτές 48V:

<b>Rphase (<math>\Omega</math>)</b>	0,8117
<b>Lphase (H)</b>	0,0086
<b>Rturbine</b>	1,5

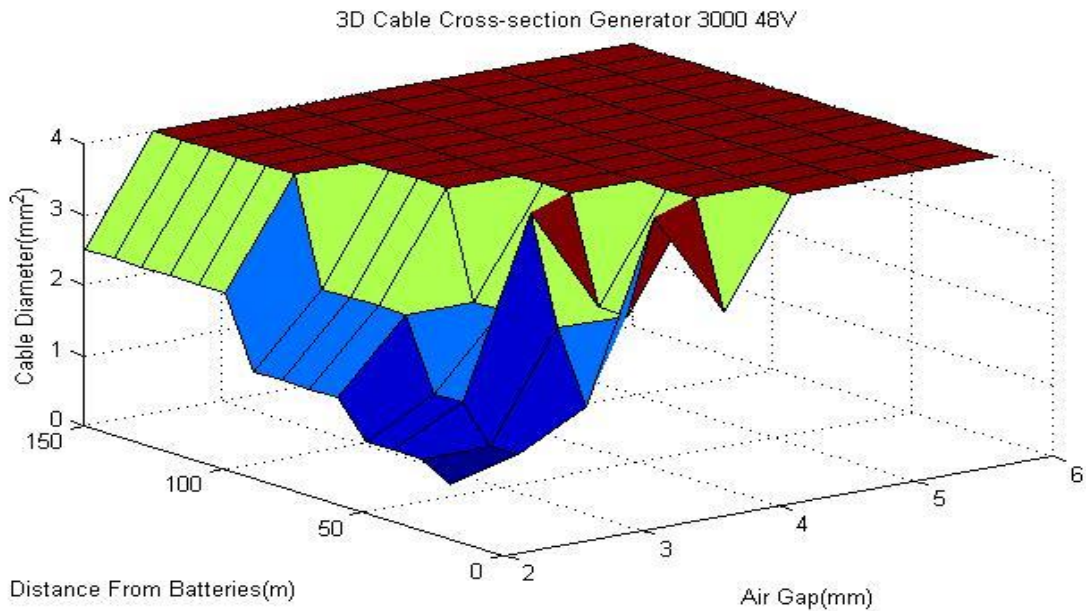
**Πίνακας B.2.1:** Χαρακτηριστικά της γεννήτριας 3000 σε συσσωρευτές 48V.

<b>g (mm)</b>	<b>Torque Constant</b>
2	3,9800
2,5	3,8486
3	3,7270
3,5	3,5975
4	3,4734
4,5	3,3590
5	3,2452
5,5	3,1319
6	3,0210

**Πίνακας B.2.2:** Τιμές της σταθεράς της ροπής προς το ρεύμα, Torque Constant, για τιμές διακένου 2 έως 6mm με βήμα 0.5mm για τη γεννήτρια 3000 σε συσσωρευτές 48V.



**Σχήμα Β.2.1:** Τρισδιάστατο γράφημα ετήσιας ενεργειακής παραγωγής (kWh) συναρτήσει της απόστασης της ανεμογεννήτριας από τον ανορθωτή-μπαταρίες,  $L$ (m), και του διάκενου της γεννήτριας,  $g$ (mm) για τη γεννήτρια 3000 σε συσσωρευτές 48V.



**Σχήμα Β.2.2:** Τρισδιάστατο γράφημα της βέλτιστης διατομής του καλωδίου ( $\text{mm}^2$ ) συναρτήσει της απόστασης της ανεμογεννήτριας από τον ανορθωτή-μπαταρίες,  $L$ (m), και του διάκενου της γεννήτριας,  $g$ (mm) για τη γεννήτρια 3000 σε συσσωρευτές 48V.

Μέσω του Κώδικα 3, υπολογίστηκε πως για τη γεννήτρια 3000 σε σύνδεση σε συσσωρευτές 48V το βέλτιστο διάκενο είναι  $g=3.5mm$ , και βέλτιστη διατομή καλωδίου,  $S=4mm^2$ . Επίσης, επιλέχθηκε για τα παρακάτω αποτελέσματα η απόσταση από τις μπαταρίες να είναι 50m:

Vw (m/s)	Pbatt (W)	Pcable (W)	Efficiency	AEP (kWh)
2,5	0,0	0,000	0,0000	1890,2
3	10,2	0,020	0,0895	
3,5	35,3	0,219	0,1940	
4	65,8	0,745	0,2426	
4,5	99,8	1,676	0,2582	
5	140,9	3,273	0,2658	
5,5	188,1	5,713	0,2666	
6	241,4	9,200	0,2635	
6,5	308,5	14,676	0,2648	
7	373,6	21,027	0,2568	
7,5	449,5	29,709	0,2512	
8	545,1	42,644	0,2510	
8,5	658,3	60,998	0,2527	
9	775,0	83,201	0,2507	
9,5	879,5	106,003	0,2419	
10	970,2	127,843	0,2288	
10,5	1048,5	148,344	0,2136	
11	1115,1	167,114	0,1975	
11,5	1169,5	183,001	0,1813	
12	1209,1	194,984	0,1650	
12,5	1234,8	203,064	0,1491	
13	656,5	60,630	0,0705	
13,5	595,4	50,372	0,0571	
14	534,0	41,017	0,0459	
14,5	474,3	32,848	0,0367	
15	416,4	25,759	0,0291	
15,5	356,7	19,308	0,0226	
16	297,1	13,653	0,0171	

**Πίνακας Β.2.3:** Αποτελέσματα ισχύος στους συσσωρευτές, απωλειών στο καλώδιο, συνολικής απόδοσης του συστήματος και ενεργειακής παραγωγής της απευθείας σύνδεσης της ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές για γεννήτρια 3000 σε συσσωρευτές 48V,  $g=3.5mm$ ,  $S=4mm^2$  και  $L=50m$ .

Vw (m/s)	Pbatt (W)	Pcable (W)	Efficiency	AEP (kWh)	PbattMPPT-Pbatt (%)
2,5	0,0	0,000	0,0000	2176,6	0,00000
3	29,1	0,122	0,1776		64,78019
3,5	46,8	0,289	0,1563		24,59949
4	68,3	0,481	0,2282		3,58326
4,5	101,3	0,688	0,2471		1,48026
5	140,9	1,117	0,2702		0,01211
5,5	188,3	1,931	0,2670		0,08561
6	237,4	2,196	0,2681		1,67102
6,5	323,3	3,492	0,2790		4,58756
7	400,5	4,558	0,2776		6,72583
7,5	500,6	7,167	0,2794		10,22255
8	619,3	10,880	0,2856		11,97458
8,5	757,6	16,036	0,2909		13,10714
9	902,3	22,471	0,2921		14,10375
9,5	1040,8	29,607	0,2864		15,50428
10	1165,1	36,813	0,2749		16,72659
10,5	1275,4	43,823	0,2598		17,79019
11	1370,1	50,372	0,2427		18,61311
11,5	1447,8	56,063	0,2245		19,22149
12	1504,3	60,425	0,2054		19,62086
12,5	1543,6	63,447	0,1864		20,00534
13	1568,1	65,462	0,1682		58,13372
13,5	1584,0	66,723	0,1518		62,41479
14	1598,5	66,612	0,1382		66,59499
14,5	1601,0	63,791	0,1239		70,37529
15	813,3	16,594	0,0569		48,80473
15,5	700,5	11,985	0,0444		49,07086
16	593,9	8,420	0,0341		49,97059

**Πίνακας Β.2.4:** Αποτελέσματα ισχύος στους συσσωρευτές, απωλειών στο καλώδιο, συνολικής απόδοσης του συστήματος και ενεργειακής παραγωγής της σύνδεσης της ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές μέσω MPPT για γεννήτρια 2400 σε συσσωρευτές 48V,  $g=3.5\text{mm}$ ,  $S=10\text{mm}^2$  και  $L=50\text{m}$  και το ποσοστό απόκλισης της ισχύος των μπαταριών με και χωρίς MPPT .

### B.3 Γεννήτρια 3600 48V

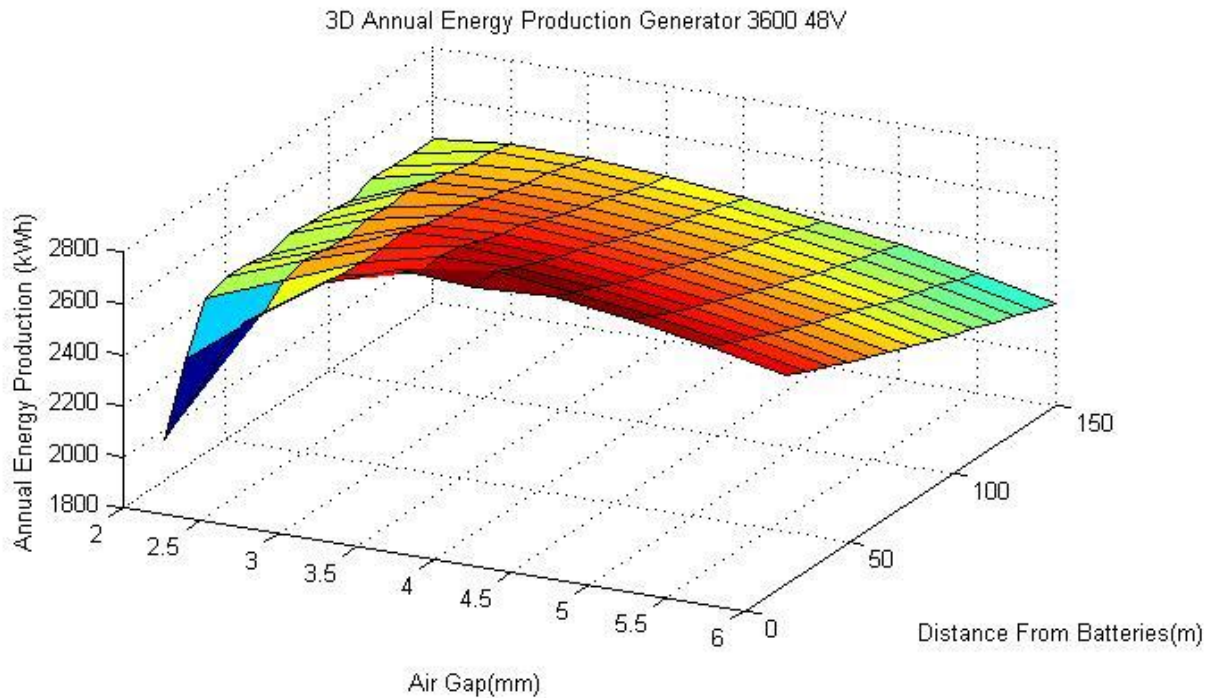
Από το πρόγραμμα Femm προκύπτουν για τη γεννήτρια 3600 σε σύνδεση σε συσσωρευτές 48V:

<b>Rphase (<math>\Omega</math>)</b>	0,5458
<b>Lphase (H)</b>	0,0068
<b>Rturbine</b>	1,8

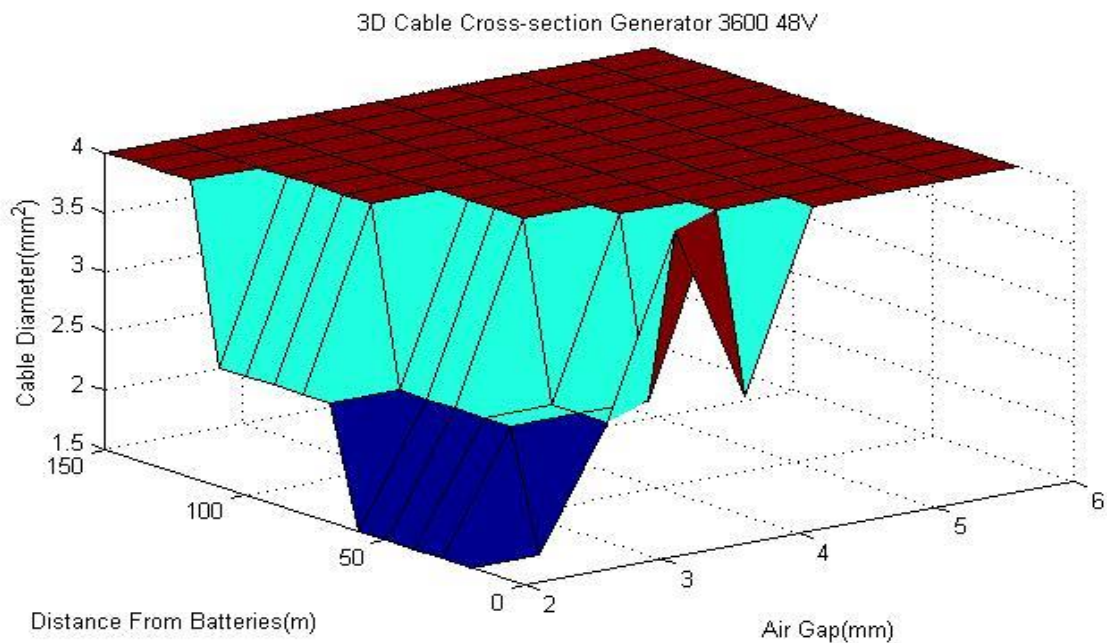
**Πίνακας B.3.1:** Χαρακτηριστικά της γεννήτριας 3600 σε συσσωρευτές 48V.

<b>g (mm)</b>	<b>Torque Constant</b>
2	4,7950
2,5	4,6305
3	4,4806
3,5	4,3246
4	4,1721
4,5	4,0323
5	3,8950
5,5	3,7587
6	3,6248

**Πίνακας B.3.2:** Τιμές της σταθεράς της ροπής προς το ρεύμα, Torque Constant, για τιμές διακένου 2 έως 6mm με βήμα 0.5mm για τη γεννήτρια 3600 σε συσσωρευτές 48V.



**Σχήμα Β.3.1:** Τρισδιάστατο γράφημα ετήσιας ενεργειακής παραγωγής (kWh) συναρτήσει της απόστασης της ανεμογεννήτριας από τον ανορθωτή-μπαταρίες,  $L$ (m), και του διάκενου της γεννήτριας,  $g$ (mm) για τη γεννήτρια 3600 σε συσσωρευτές 48V.



**Σχήμα Β.3.2:** Τρισδιάστατο γράφημα της βέλτιστης διατομής του καλωδίου ( $\text{mm}^2$ ) συναρτήσει της απόστασης της ανεμογεννήτριας από τον ανορθωτή-μπαταρίες,  $L$ (m), και του διάκενου της γεννήτριας,  $g$ (mm) για τη γεννήτρια 3600 σε συσσωρευτές 48V.



Μέσω του Κώδικα 3, υπολογίστηκε πως για τη γεννήτρια 3600 σε σύνδεση σε συσσωρευτές 48V το βέλτιστο διάκενο είναι  $g=3.5mm$ , και βέλτιστη διατομή καλωδίου,  $S=4mm^2$ . Επίσης, επιλέχθηκε για τα παρακάτω αποτελέσματα η απόσταση από τις μπαταρίες να είναι 50m:

Vw (m/s)	Pbatt (W)	Pcable (W)	Efficiency	AEP (kWh)
2,5	0,0	0,000	0,0000	2705,8
3	15,5	0,043	0,0937	
3,5	51,4	0,460	0,1963	
4	95,0	1,543	0,2429	
4,5	143,5	3,455	0,2579	
5	202,2	6,711	0,2648	
5,5	269,3	11,645	0,2650	
6	344,7	18,696	0,2613	
6,5	441,6	29,868	0,2633	
7	533,4	42,730	0,2546	
7,5	644,1	60,689	0,2500	
8	780,4	86,458	0,2496	
8,5	940,5	122,215	0,2508	
9	1101,6	164,678	0,2474	
9,5	1253,4	209,609	0,2394	
10	1385,4	253,054	0,2268	
10,5	1499,0	294,025	0,2120	
11	1596,9	331,210	0,1964	
11,5	1677,7	363,241	0,1806	
12	1736,8	387,969	0,1646	
12,5	1777,4	404,885	0,1490	
13	964,2	128,040	0,0719	
13,5	874,8	106,954	0,0582	
14	788,7	88,032	0,0471	
14,5	695,7	70,008	0,0374	
15	607,8	54,369	0,0295	
15,5	518,5	40,401	0,0228	
16	430,6	28,501	0,0172	

**Πίνακας Β.3.3:** Αποτελέσματα ισχύος στους συσσωρευτές, απωλειών στο καλώδιο, συνολικής απόδοσης του συστήματος και ενεργειακής παραγωγής της απευθείας σύνδεσης της ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές για γεννήτρια 3600 σε συσσωρευτές 48V,  $g=3.5mm$ ,  $S=4mm^2$  και  $L=50m$ .

Vw (m/s)	Pbatt (W)	Pcable (W)	Efficiency	AEP (kWh)	PbattMPPT-Pbatt (%)
2,5	24,0	0,099	0,2533	3116,6	100,00000
3	39,8	0,183	0,2450		61,21723
3,5	69,6	0,526	0,2369		26,15281
4	101,6	0,912	0,2487		6,50165
4,5	129,5	0,842	0,2663		10,87281
5	195,4	1,836	0,2578		3,49082
5,5	268,3	3,389	0,2635		0,37901
6	336,6	4,109	0,2654		2,43074
6,5	465,8	7,108	0,2793		5,19795
7	582,3	10,801	0,2777		8,39214
7,5	720,2	16,259	0,2795		10,56544
8	888,8	23,739	0,2845		12,19495
8,5	1087,3	34,006	0,2901		13,49991
9	1296,4	47,121	0,2914		15,02604
9,5	1496,5	61,683	0,2863		16,24330
10	1680,4	75,995	0,2753		17,55980
10,5	1845,2	89,420	0,2612		18,76457
11	1984,7	103,298	0,2450		19,54172
11,5	2085,8	117,180	0,2272		19,56824
12	2179,3	125,066	0,2066		20,30390
12,5	2247,8	129,731	0,1884		20,92690
13	2288,6	132,689	0,1708		57,86799
13,5	2322,6	133,855	0,1549		62,33545
14	2325,2	136,030	0,1399		66,08157
14,5	1453,9	54,355	0,0786		52,14727
15	1147,9	34,164	0,0559		47,05321
15,5	975,6	24,682	0,0429		46,85104
16	792,9	16,723	0,0324		45,68942

**Πίνακας Β.3.4:** Αποτελέσματα ισχύος στους συσσωρευτές, απωλειών στο καλώδιο, συνολικής απόδοσης του συστήματος και ενεργειακής παραγωγής της σύνδεσης της ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές μέσω MPPT για γεννήτρια 2400 σε συσσωρευτές 48V,  $g=3.5\text{mm}$ ,  $S=10\text{mm}^2$  και  $L=50\text{m}$  και το ποσοστό απόκλισης της ισχύος των μπαταριών με και χωρίς MPPT .

#### B.4 Γεννήτρια 1800 24V

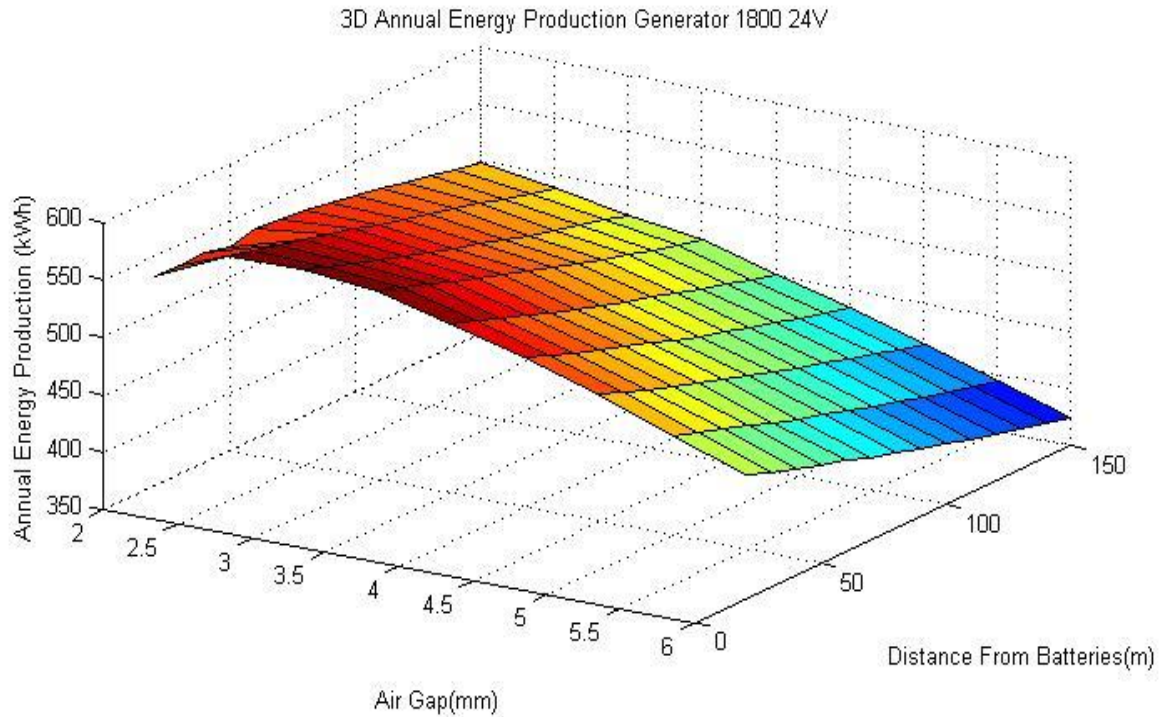
Από το πρόγραμμα Femm προκύπτουν για τη γεννήτρια 1800 σε σύνδεση σε συσσωρευτές 24V:

<b>Rphase (<math>\Omega</math>)</b>	0,5999
<b>Lphase (H)</b>	0,0038
<b>Rturbine</b>	0,9

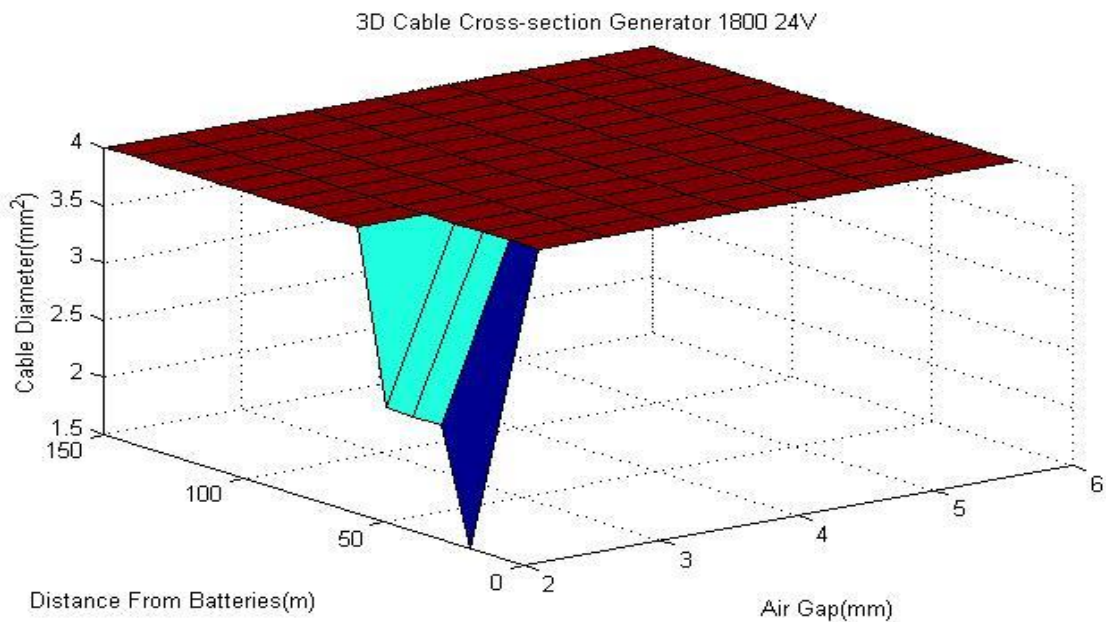
**Πίνακας B.4.1:** Χαρακτηριστικά της γεννήτριας 1800 σε συσσωρευτές 24V.

<b>g (mm)</b>	<b>Torque Constant</b>
2	1,1410
2,5	1,0932
3	1,0516
3,5	1,0105
4	0,9713
4,5	0,9361
5	0,9021
5,5	0,8690
6	0,8381

**Πίνακας B.4.2:** Τιμές της σταθεράς της ροπής προς το ρεύμα, Torque Constant, για τιμές διακένου 2 έως 6mm με βήμα 0.5mm για τη γεννήτρια 1800 σε συσσωρευτές 24V.



**Σχήμα Β.4.1:** Τρισδιάστατο γράφημα ετήσιας ενεργειακής παραγωγής (kWh) συναρτήσει της απόστασης της ανεμογεννήτριας από τον ανορθωτή-μπαταρίες,  $L$ (m), και του διάκενου της γεννήτριας,  $g$ (mm) για τη γεννήτρια 1800 σε συσσωρευτές 24V.



**Σχήμα Β.4.2:** Τρισδιάστατο γράφημα της βέλτιστης διατομής του καλωδίου ( $\text{mm}^2$ ) συναρτήσει της απόστασης της ανεμογεννήτριας από τον ανορθωτή-μπαταρίες,  $L$ (m), και του διάκενου της γεννήτριας,  $g$ (mm) για τη γεννήτρια 1800 σε συσσωρευτές 24V.

Μέσω του Κώδικα 3, υπολογίστηκε πως για τη γεννήτρια 1800 σε σύνδεση σε συσσωρευτές 24V το βέλτιστο διάκενο είναι  $g=2.5mm$ , και βέλτιστη διατομή καλωδίου,  $S=4mm^2$ . Επίσης, επιλέχθηκε για τα παρακάτω αποτελέσματα η απόσταση από τις μπαταρίες να είναι 50m:

Vw (m/s)	Pbatt (W)	Pcable (W)	Efficiency	AEP (kWh)
2,5	0,0	0,000	0,0000	546,5
3	0,0	0,000	0,0000	
3,5	0,0	0,000	0,0000	
4	0,0	0,000	0,0000	
4,5	0,0	0,000	0,0001	
5	5,9	0,017	0,0310	
5,5	49,4	1,574	0,1945	
6	75,1	3,600	0,2278	
6,5	100,8	6,341	0,2405	
7	124,3	9,464	0,2373	
7,5	151,4	13,785	0,2350	
8	184,4	20,045	0,2359	
8,5	221,8	28,545	0,2365	
9	259,2	38,640	0,2329	
9,5	292,6	48,750	0,2235	
10	321,1	58,772	0,2103	
10,5	344,7	67,522	0,1950	
11	363,1	74,367	0,1787	
11,5	374,6	79,231	0,1613	
12	370,4	77,892	0,1404	
12,5	282,6	45,557	0,0948	
13	236,2	32,238	0,0704	
13,5	214,5	26,771	0,0571	
14	193,4	21,961	0,0462	
14,5	170,7	17,326	0,0367	
15	147,9	13,200	0,0287	
15,5	125,8	9,708	0,0221	
16	104,4	6,806	0,0167	

**Πίνακας Β.4.3:** Αποτελέσματα ισχύος στους συσσωρευτές, απωλειών στο καλώδιο, συνολικής απόδοσης του συστήματος και ενεργειακής παραγωγής της απευθείας σύνδεσης της ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές για γεννήτρια 1800 σε συσσωρευτές 24V,  $g=2.5mm$ ,  $S=4mm^2$  και  $L=50m$ .

Vw (m/s)	Pbatt (W)	Pcable (W)	Efficiency	AEP (kWh)	PbattMPPT-Pbatt (%)
2,5	0,0	0,000	0,0000	645,6	0,00000
3	0,0	0,000	0,0000		0,00000
3,5	0,0	0,000	0,0000		0,00000
4	0,0	0,000	0,0000		100,00000
4,5	0,0	0,000	0,0016		100,00000
5	3,9	0,003	0,0222		34,66990
5,5	51,1	0,646	0,2020		3,31152
6	78,0	1,426	0,2372		3,67404
6,5	106,6	2,267	0,2521		5,42638
7	135,0	3,051	0,2560		7,99049
7,5	169,5	3,908	0,2607		10,69675
8	210,7	4,387	0,2686		12,48551
8,5	260,6	7,121	0,2779		14,88779
9	311,1	10,174	0,2800		16,68348
9,5	356,5	14,102	0,2746		17,92584
10	395,2	18,110	0,2609		18,72865
10,5	430,7	21,561	0,2432	19,95818	
11	457,7	24,294	0,2254	20,66692	
11,5	484,3	26,838	0,2088	22,63893	
12	500,1	28,935	0,1897	25,92788	
12,5	509,0	29,294	0,1737	44,48803	
13	518,9	29,819	0,1572	54,47209	
13,5	510,7	28,931	0,1393	57,99143	
14	465,7	23,325	0,1167	58,47907	
14,5	369,7	13,791	0,0798	53,82965	
15	304,6	8,926	0,0593	51,45801	
15,5	250,9	6,020	0,0422	49,87028	
16	199,9	3,904	0,0296	47,76294	

**Πίνακας Β.4.4:** Αποτελέσματα ισχύος στους συσσωρευτές, απωλειών στο καλώδιο, συνολικής απόδοσης του συστήματος και ενεργειακής παραγωγής της σύνδεσης της ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές μέσω MPPT για γεννήτρια 2400 σε συσσωρευτές 48V,  $g=2.5\text{mm}$ ,  $S=10\text{mm}^2$  και  $L=50\text{m}$  και το ποσοστό απόκλισης της ισχύος των μπαταριών με και χωρίς MPPT .

## B.5 Γεννήτρια 2400 24V

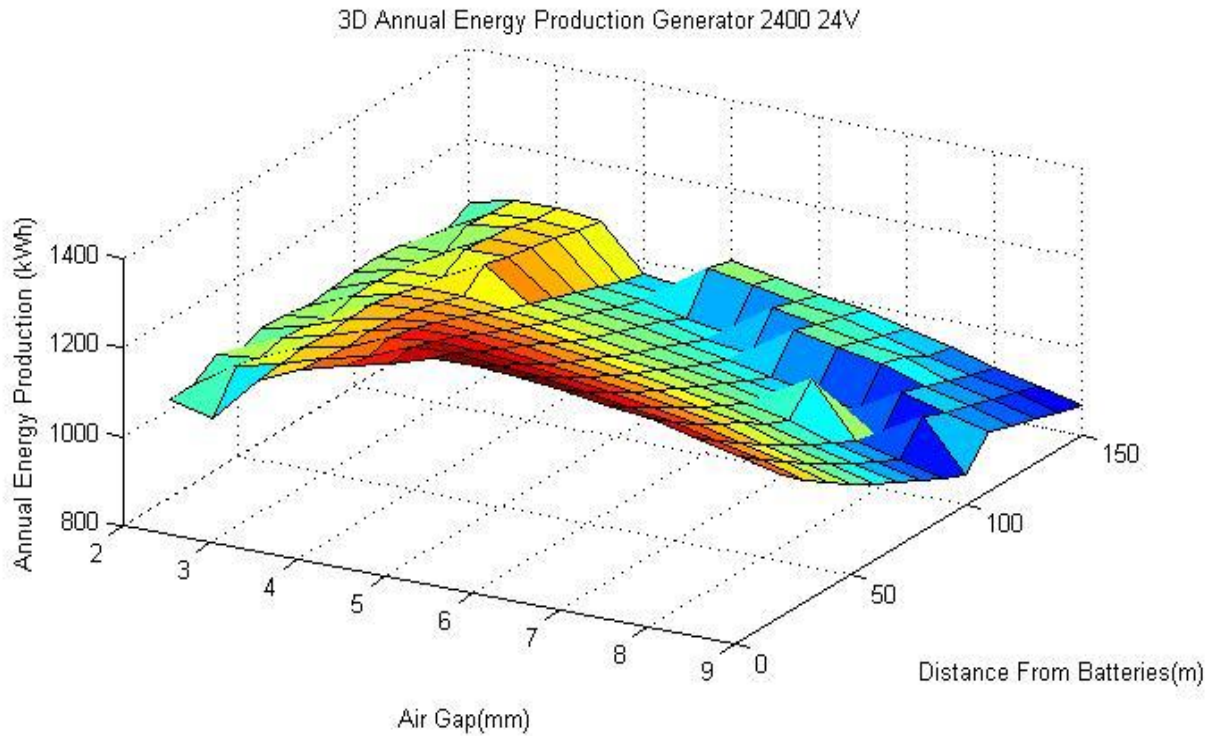
Από το πρόγραμμα Femm προκύπτουν για τη γεννήτρια 2400 σε σύνδεση σε συσσωρευτές 24V:

<b>Rphase (<math>\Omega</math>)</b>	0,1672
<b>Lphase (H)</b>	0,0013
<b>Rturbine</b>	1,2

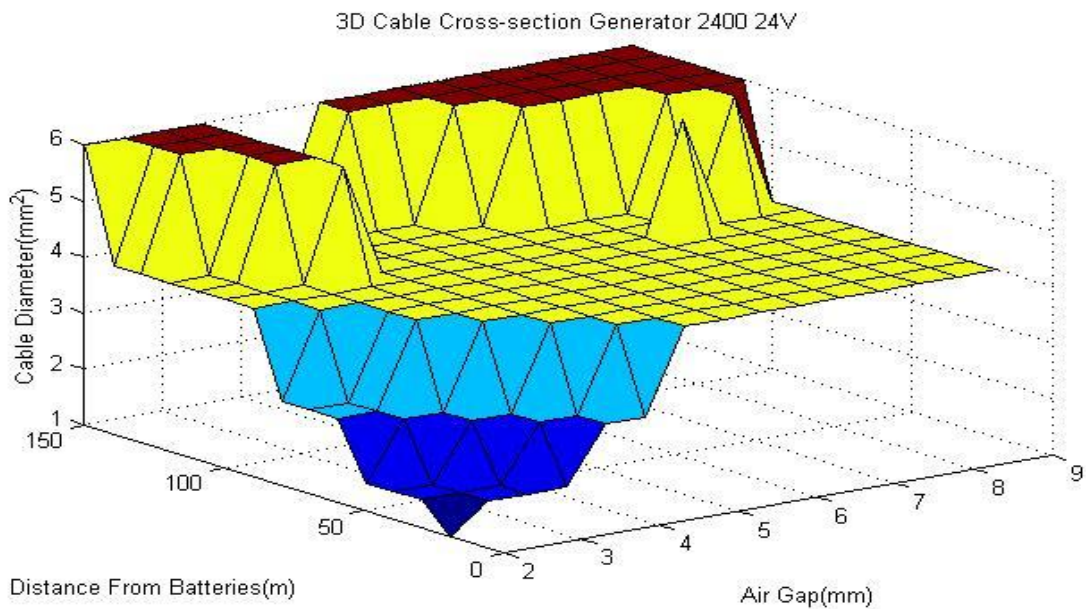
**Πίνακας B.5.1:** Χαρακτηριστικά της γεννήτριας 2400 σε συσσωρευτές 24V.

<b>g (mm)</b>	<b>Torque Constant</b>
2	1,5204
2,5	1,4753
3	1,4315
3,5	1,3894
4	1,3474
4,5	1,3085
5	1,2717
5,5	1,2352
6	1,2011
6,5	1,1684
7	1,1362
7,5	1,1060
8	1,0761
8,5	1,0475
9	1,0199

**Πίνακας B.5.2:** Τιμές της σταθεράς της ροπής προς το ρεύμα, Torque Constant, για τιμές διακένου 2 έως 9mm με βήμα 0.5mm για τη γεννήτρια 2400 σε συσσωρευτές 24V.



**Σχήμα Β.5.1:** Τρισδιάστατο γράφημα ετήσιας ενεργειακής παραγωγής (kWh) συναρτήσει της απόστασης της ανεμογεννήτριας από τον ανορθωτή-μπαταρίες,  $L$ (m), και του διάκενου της γεννήτριας,  $g$ (mm) για τη γεννήτρια 2400 σε συσσωρευτές 24V.



**Σχήμα Β.5.2:** Τρισδιάστατο γράφημα της βέλτιστης διατομής του καλωδίου ( $\text{mm}^2$ ) συναρτήσει της απόστασης της ανεμογεννήτριας από τον ανορθωτή-μπαταρίες,  $L$ (m), και του διάκενου της γεννήτριας,  $g$ (mm) για τη γεννήτρια 2400 σε συσσωρευτές 24V.



Μέσω του Κώδικα 3, υπολογίστηκε πως για τη γεννήτρια 2400 σε σύνδεση σε συσσωρευτές 24V το βέλτιστο διάκενο είναι  $g=3.5mm$ , και βέλτιστη διατομή καλωδίου,  $S=4mm^2$ . Επίσης, επιλέχθηκε για τα παρακάτω αποτελέσματα η απόσταση από τις μπαταρίες να είναι 50m:

Vw (m/s)	Pbatt (W)	Pcable (W)	Efficiency	AEP (kWh)
2,5	0,0	0,000	0,0000	1465,6
3	0,0	0,000	0,0000	
3,5	31,2	0,457	0,1546	
4	45,3	0,768	0,2483	
4,5	66,1	1,402	0,2659	
5	91,9	2,331	0,2763	
5,5	123,9	4,136	0,2744	
6	151,6	3,562	0,2697	
6,5	207,6	5,524	0,2834	
7	258,6	7,376	0,2829	
7,5	327,4	12,041	0,2848	
8	406,8	19,197	0,2930	
8,5	500,1	28,540	0,3008	
9	601,8	40,544	0,3035	
9,5	699,6	54,097	0,3011	
10	790,2	68,138	0,2914	
10,5	876,5	82,139	0,2775	
11	947,6	96,133	0,2624	
11,5	1017,8	107,040	0,2439	
12	1043,4	114,432	0,2228	
12,5	1067,8	116,355	0,2033	
13	1045,3	108,826	0,1757	
13,5	979,5	92,157	0,1470	
14	792,0	59,981	0,1060	
14,5	612,8	36,781	0,0691	
15	524,9	27,310	0,0545	
15,5	444,3	19,780	0,0418	
16	370,4	13,867	0,0318	

**Πίνακας Β.5.3:** Αποτελέσματα ισχύος στους συσσωρευτές, απωλειών στο καλώδιο, συνολικής απόδοσης του συστήματος και ενεργειακής παραγωγής της απευθείας σύνδεσης της ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές για γεννήτρια 2400 σε συσσωρευτές 24V,  $g=3.5mm$ ,  $S=4mm^2$  και  $L=50m$ .

Vw (m/s)	Pbatt (W)	Pcable (W)	Efficiency	AEP (kWh)	PbattMPPT-Pbatt (%)
2,5	0,0	0,000	0,0000	1139,8	100,00000
3	0,0	0,000	0,0000		100,00000
3,5	19,0	0,249	0,1631		39,08113
4	39,4	1,057	0,2266		13,18453
4,5	61,5	2,559	0,2486		6,97513
5	87,8	5,184	0,2588		4,44915
5,5	116,6	9,051	0,2583		5,89261
6	150,9	14,899	0,2574		0,47694
6,5	193,9	24,192	0,2602		6,55852
7	234,3	34,863	0,2516		9,41457
7,5	280,5	49,164	0,2450		14,31677
8	337,3	69,790	0,2427		17,08198
8,5	405,5	99,052	0,2432		18,93277
9	477,9	134,909	0,2415		20,59404
9,5	546,6	173,666	0,2349		21,87290
10	606,8	211,170	0,2235		23,21559
10,5	652,8	243,008	0,2077		25,52925
11	689,0	266,588	0,1907		27,28326
11,5	531,3	164,624	0,1287		47,79835
12	442,1	116,503	0,0943		57,62804
12,5	413,5	102,683	0,0780		61,27272
13	386,3	90,318	0,0648		63,04254
13,5	357,2	77,772	0,0535		63,53418
14	325,6	65,287	0,0437		58,88924
14,5	293,9	53,700	0,0355		52,04325
15	260,3	42,659	0,0284		50,41677
15,5	225,5	32,318	0,0223		49,25708
16	190,1	23,256	0,0171		48,68494

**Πίνακας Β.5.4:** Αποτελέσματα ισχύος στους συσσωρευτές, απωλειών στο καλώδιο, συνολικής απόδοσης του συστήματος και ενεργειακής παραγωγής της σύνδεσης της ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές μέσω MPPT για γεννήτρια 2400 σε συσσωρευτές 48V,  $g=3.5\text{mm}$ ,  $S=10\text{mm}^2$  και  $L=50\text{m}$  και το ποσοστό απόκλισης της ισχύος των μπαταριών με και χωρίς MPPT.

## B.6 Γεννήτρια 3000 24V

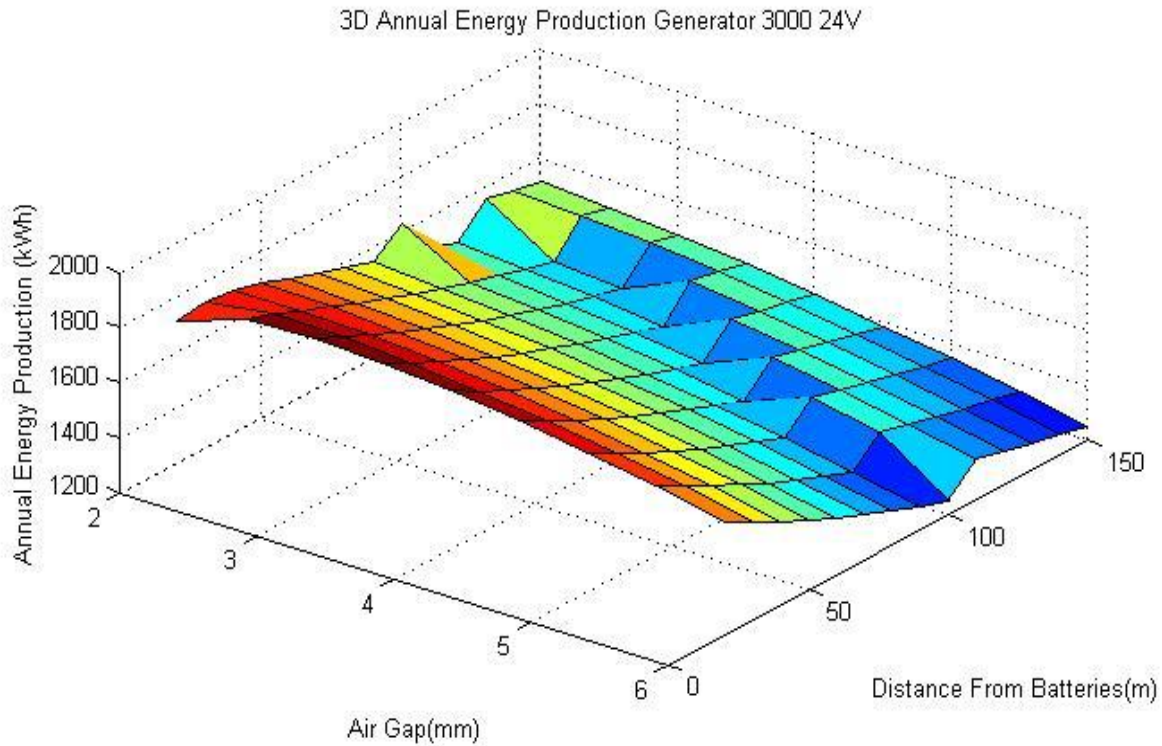
Από το πρόγραμμα Femm προκύπτουν για τη γεννήτρια 3000 σε σύνδεση σε συσσωρευτές 24V:

<b>Rphase (<math>\Omega</math>)</b>	0,2029
<b>Lphase (H)</b>	0,0022
<b>Rturbine</b>	1,5

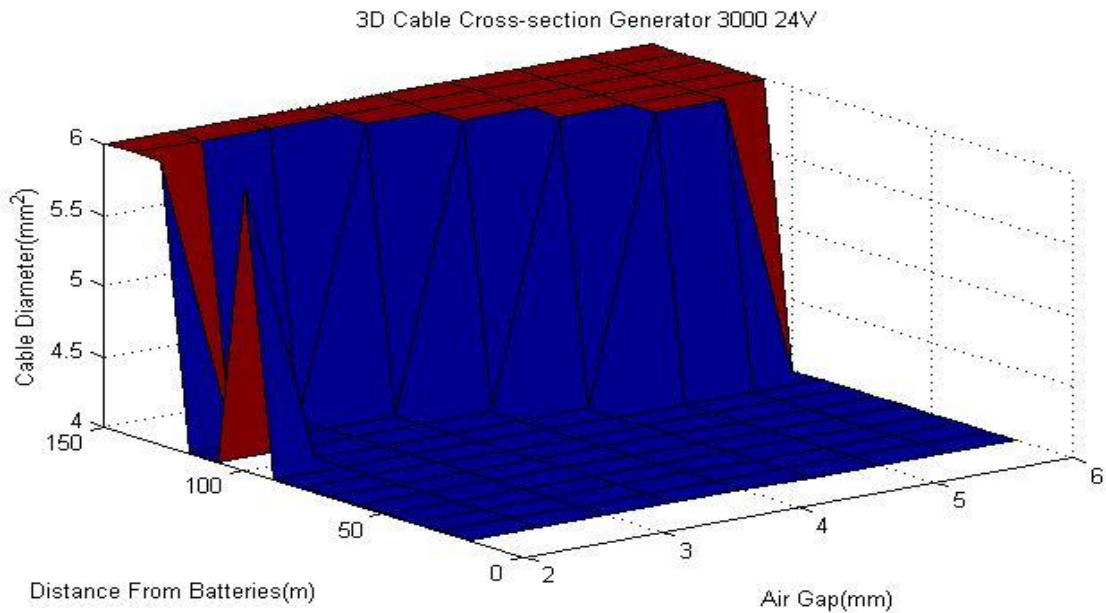
**Πίνακας B.6.1:** Χαρακτηριστικά της γεννήτριας 3000 σε συσσωρευτές 24V.

<b>g (mm)</b>	<b>Torque Constant</b>
2	1,9900
2,5	1,9240
3	1,8630
3,5	1,7987
4	1,7367
4,5	1,6795
5	1,6226
5,5	1,5659
6	1,5105

**Πίνακας B.6.2:** Τιμές της σταθεράς της ροπής προς το ρεύμα, Torque Constant, για τιμές διακένου 2 έως 6mm με βήμα 0.5mm για τη γεννήτρια 3000 σε συσσωρευτές 24V.



**Σχήμα Β.6.1:** Τρισδιάστατο γράφημα ετήσιας ενεργειακής παραγωγής (kWh) συναρτήσει της απόστασης της ανεμογεννήτριας από τον ανορθωτή-μπαταρίες,  $L$ (m), και του διάκενου της γεννήτριας,  $g$ (mm) για τη γεννήτρια 3000 σε συσσωρευτές 24V.



**Σχήμα Β.6.2:** Τρισδιάστατο γράφημα της βέλτιστης διατομής του καλωδίου ( $\text{mm}^2$ ) συναρτήσει της απόστασης της ανεμογεννήτριας από τον ανορθωτή-μπαταρίες,  $L$ (m), και του διάκενου της γεννήτριας,  $g$ (mm) για τη γεννήτρια 3000 σε συσσωρευτές 24V.

Μέσω του Κώδικα 3, υπολογίστηκε πως για τη γεννήτρια 3000 σε σύνδεση σε συσσωρευτές 24V το βέλτιστο διάκενο είναι  $g=2mm$ , και βέλτιστη διατομή καλωδίου,  $S=4mm^2$ . Επίσης, επιλέχθηκε για τα παρακάτω αποτελέσματα η απόσταση από τις μπαταρίες να είναι 50m:

Vw (m/s)	Pbatt (W)	Pcable (W)	Efficiency	AEP (kWh)
2,5	0,0	0,000	0,0000	1690,6
3	32,3	0,722	0,2817	
3,5	40,2	1,113	0,2208	
4	65,7	2,946	0,2421	
4,5	96,4	6,219	0,2493	
5	133,1	11,657	0,2510	
5,5	174,7	19,688	0,2475	
6	219,3	30,480	0,2394	
6,5	276,9	47,504	0,2378	
7	331,9	66,985	0,2282	
7,5	397,1	94,049	0,2220	
8	477,1	132,801	0,2197	
8,5	569,1	184,547	0,2185	
9	663,4	245,712	0,2146	
9,5	749,6	309,993	0,2061	
10	824,2	372,404	0,1943	
10,5	887,9	429,111	0,1808	
11	949,6	484,552	0,1682	
11,5	997,9	531,331	0,1547	
12	1032,1	568,953	0,1408	
12,5	1057,2	594,750	0,1276	
13	587,1	195,679	0,0630	
13,5	537,5	165,293	0,0515	
14	484,0	136,354	0,0416	
14,5	426,0	107,341	0,0329	
15	370,6	82,563	0,0259	
15,5	317,0	61,389	0,0201	
16	262,8	43,041	0,0151	

**Πίνακας Β.6.3:** Αποτελέσματα ισχύος στους συσσωρευτές, απωλειών στο καλώδιο, συνολικής απόδοσης του συστήματος και ενεργειακής παραγωγής της απευθείας σύνδεσης της ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές για γεννήτρια 3000 σε συσσωρευτές 24V,  $g=2mm$ ,  $S=4mm^2$  και  $L=50m$ .

Vw (m/s)	Pbatt (W)	Pcable (W)	Efficiency	AEP (kWh)	PbattMPPT-Pbatt (%)
2,5	0,0	0,000	0,0000	2091,2	100,00000
3	0,0	0,000	0,0000		56,09033
3,5	46,8	0,879	0,1756		14,17285
4	68,5	1,386	0,2356		4,09446
4,5	99,2	2,321	0,2591		2,84266
5	138,7	4,208	0,2631		4,07675
5,5	184,6	6,944	0,2632		5,37392
6	237,2	10,071	0,2609		7,53692
6,5	315,8	13,956	0,2674		12,29547
7	389,5	21,093	0,2681		14,77765
7,5	476,9	31,290	0,2669		16,71995
8	581,6	45,878	0,2681		17,97850
8,5	703,0	65,522	0,2701		19,04563
9	830,2	90,027	0,2695		20,08803
9,5	948,9	116,593	0,2621		21,00496
10	1058,1	142,899	0,2496		22,11028
10,5	1149,6	169,447	0,2346		22,76692
11	1234,2	193,978	0,2188		23,06392
11,5	1298,6	212,899	0,2019		23,15546
12	1354,2	231,143	0,1846		23,78582
12,5	1414,3	234,218	0,1712		25,24828
13	1461,3	232,654	0,1569		59,82411
13,5	1492,7	230,329	0,1440		63,99336
14	1503,4	219,218	0,1301		67,80799
14,5	852,1	70,350	0,0662		50,00941
15	742,5	52,408	0,0501		50,08300
15,5	621,5	37,314	0,0363		49,00117
16	505,3	25,091	0,0267		47,99754

**Πίνακας Β.6.4:** Αποτελέσματα ισχύος στους συσσωρευτές, απωλειών στο καλώδιο, συνολικής απόδοσης του συστήματος και ενεργειακής παραγωγής της σύνδεσης της ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές μέσω MPPT για γεννήτρια 2400 σε συσσωρευτές 48V,  $g=2\text{mm}$ ,  $S=10\text{mm}^2$  και  $L=50\text{m}$  και το ποσοστό απόκλισης της ισχύος των μπαταριών με και χωρίς MPPT.

## B.7 Γεννήτρια 3600 24V

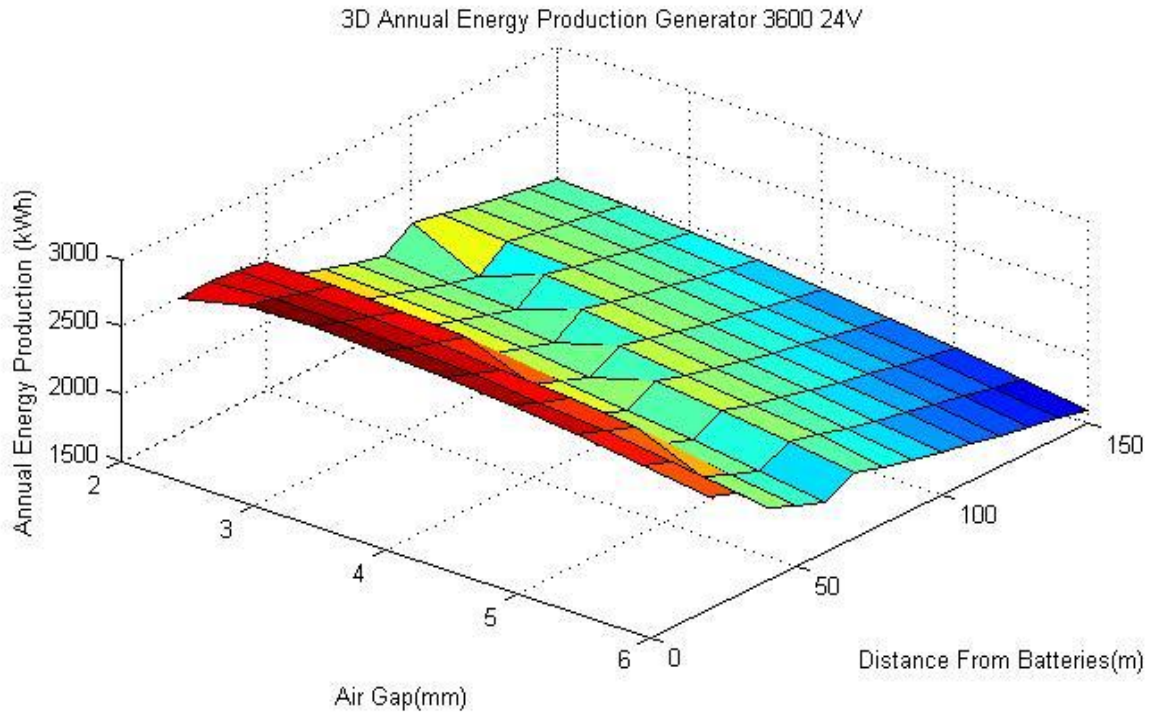
Από το πρόγραμμα Femm προκύπτουν για τη γεννήτρια 3600 σε σύνδεση σε συσσωρευτές 24V:

<b>Rphase (<math>\Omega</math>)</b>	0,1346
<b>Lphase (H)</b>	0,0017
<b>Rturbine</b>	1,8

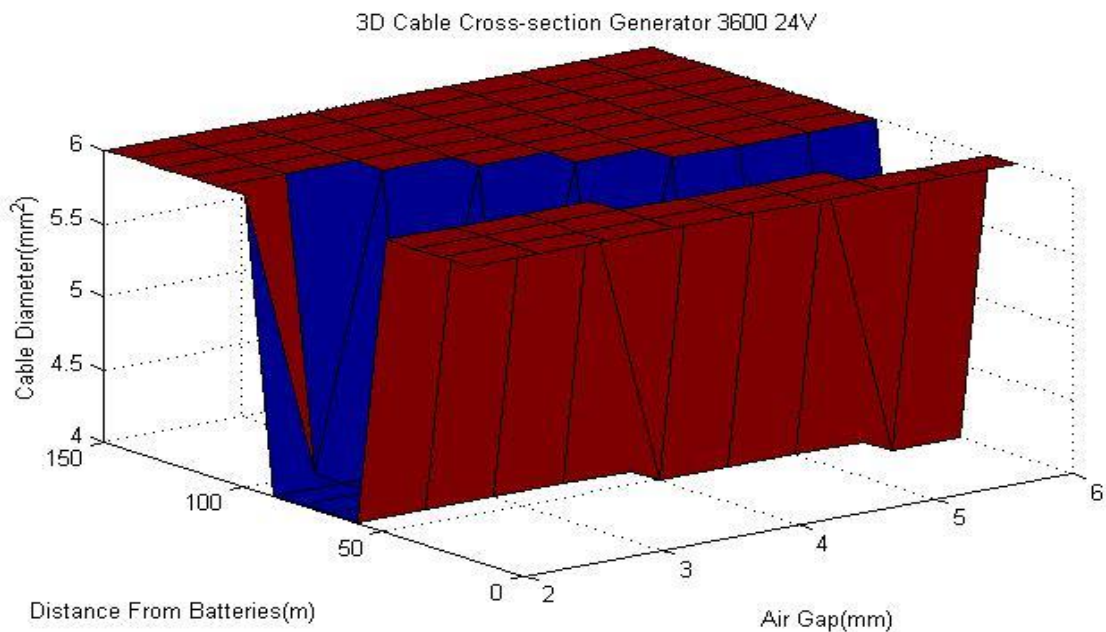
**Πίνακας B.7.1:** Χαρακτηριστικά της γεννήτριας 3600 σε συσσωρευτές 24V.

<b>g (mm)</b>	<b>Torque Constant</b>
2	2,3662
2,5	2,2855
3	2,2121
3,5	2,1356
4	2,0609
4,5	1,9926
5	1,9255
5,5	1,8590
6	1,7937

**Πίνακας B.7.2:** Τιμές της σταθεράς της ροπής προς το ρεύμα, Torque Constant, για τιμές διακένου 2 έως 6mm με βήμα 0.5mm για τη γεννήτρια 3600 σε συσσωρευτές 24V.



**Σχήμα Β.7.1:** Τρισδιάστατο γράφημα ετήσιας ενεργειακής παραγωγής (kWh) συναρτήσει της απόστασης της ανεμογεννήτριας από τον ανορθωτή-μπαταρίες,  $L(m)$ , και του διάκενου της γεννήτριας,  $g(mm)$  για τη γεννήτρια 3600 σε συσσωρευτές 24V.



**Σχήμα Β.7.2:** Τρισδιάστατο γράφημα της βέλτιστης διατομής του καλωδίου ( $mm^2$ ) συναρτήσει της απόστασης της ανεμογεννήτριας από τον ανορθωτή-μπαταρίες,  $L(m)$ , και του διάκενου της γεννήτριας,  $g(mm)$  για τη γεννήτρια 3600 σε συσσωρευτές 24V.



Μέσω του Κώδικα 3, υπολογίστηκε πως για τη γεννήτρια 3600 σε σύνδεση σε συσσωρευτές 48V το βέλτιστο διάκενο είναι  $g=2mm$ , και βέλτιστη διατομή καλωδίου,  $S=6mm^2$ . Επίσης, επιλέχθηκε για τα παρακάτω αποτελέσματα η απόσταση από τις μπαταρίες να είναι 50m:

Vw (m/s)	Pbatt (W)	Pcable (W)	Efficiency	AEP (kWh)
2,5	0,0	0,000	0,0000	2453,6
3	0,0	0,000	0,0000	
3,5	57,5	1,516	0,2194	
4	94,5	4,067	0,2418	
4,5	138,6	8,584	0,2490	
5	192,0	16,125	0,2515	
5,5	252,6	27,317	0,2486	
6	317,1	42,346	0,2404	
6,5	400,1	65,987	0,2385	
7	481,0	93,301	0,2296	
7,5	577,6	131,404	0,2242	
8	693,9	185,184	0,2219	
8,5	827,6	256,010	0,2207	
9	965,9	340,062	0,2169	
9,5	1092,5	429,931	0,2086	
10	1203,2	515,295	0,1970	
10,5	1301,3	597,190	0,1841	
11	1388,2	674,038	0,1708	
11,5	1457,6	739,238	0,1569	
12	1511,2	790,182	0,1432	
12,5	1549,0	823,196	0,1299	
13	865,1	278,077	0,0645	
13,5	788,6	234,801	0,0525	
14	711,8	194,287	0,0425	
14,5	626,3	152,916	0,0336	
15	542,3	116,887	0,0263	
15,5	463,7	86,935	0,0204	
16	384,2	61,064	0,0154	

**Πίνακας Β.7.3:** Αποτελέσματα ισχύος στους συσσωρευτές, απωλειών στο καλώδιο, συνολικής απόδοσης του συστήματος και ενεργειακής παραγωγής της απευθείας σύνδεσης της ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές για γεννήτρια 3600 σε συσσωρευτές 48V,  $g=2mm$ ,  $S=6mm^2$  και  $L=50m$ .

Vw (m/s)	Pbatt (W)	Pcable (W)	Efficiency	AEP (kWh)	PbattMPPT-Pbatt (%)
2,5	0,0	0,000	0,0000	2845,9	100,00000
3	0,0	0,000	0,0000		100,00000
3,5	59,0	2,203	0,1860		2,59282
4	94,6	2,322	0,1880		0,03537
4,5	125,5	2,914	0,2529		10,43119
5	179,8	5,249	0,2480		6,80478
5,5	250,6	9,819	0,2477		0,82088
6	323,4	14,359	0,2500		1,94098
6,5	437,1	20,554	0,2655		8,45962
7	550,3	38,364	0,2631		12,60058
7,5	669,5	59,723	0,2622		13,72514
8	805,8	93,790	0,2613		13,89220
8,5	956,3	139,416	0,2581		13,46265
9	1124,4	188,258	0,2530		14,10239
9,5	1281,9	241,792	0,2447		14,77583
10	1426,2	294,868	0,2338		15,63690
10,5	1551,1	345,796	0,2195	16,10520	
11	1653,4	394,106	0,2045	16,03784	
11,5	1748,9	434,709	0,1884	16,65397	
12	1816,6	465,123	0,1724	16,81117	
12,5	1899,7	476,103	0,1602	18,46349	
13	1964,6	473,375	0,1466	55,96713	
13,5	2025,4	465,797	0,1349	61,06334	
14	2056,2	449,696	0,1232	65,38549	
14,5	1208,5	159,588	0,0723	48,17811	
15	1061,2	117,796	0,0516	48,89999	
15,5	850,3	80,557	0,0409	45,46889	
16	713,4	55,232	0,0292	46,13912	

**Πίνακας Β.7.4:** Αποτελέσματα ισχύος στους συσσωρευτές, απωλειών στο καλώδιο, συνολικής απόδοσης του συστήματος και ενεργειακής παραγωγής της σύνδεσης της ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές μέσω MPPT για γεννήτρια 2400 σε συσσωρευτές 48V, g=2mm, S=10mm<sup>2</sup> και L=50m και το ποσοστό απόκλισης της ισχύος των μπαταριών με και χωρίς MPPT.

## Παράρτημα Γ: Προγράμματα σε Matlab

### Γ.1 Πρόγραμμα υπολογισμού της βέλτιστης αντίστασης του καλωδίου

```
%Inputs

Vw_mean=5; %Mean Wind Speed for Weibull distribution (m/s)
k=2; %Shape Parameter for Weibull distribution
TorqueConstant=2.7356*(2.8525/2.7356)/sqrt(2); %Generator's Torque:
2.7356 for Generator 2400 48V g=3mm
Rphase=0.6566666667; %Generator's Phase Resistance (Ohm): 0.6566666667
for Generator 2400 48V
Lphase=0.0021916666667; %Generator's Phase Inductance (H):
0.0021916666667 for Generator 2400 48V
Rturbine=1.2; %Blade Radius (m): 1.2 for Generator 2400 48V

%Optimal Cable Resistance and Annual Energy Production

start= 0.0001; %Resistance minimum limit for binary search algorithm
final= 5.0000; %Resistance maximum limit for binary search algorithm
mean=(start+final)/2; %Calculation of Mean Resistance for binary
search algorithm

stop=true;
rcount=1;

Rcable=start; %Calculation of Energy Production for minimum resistance
R(rcount)=Rcable;
j=1;
E1=0;
for i = 2.5:0.5:3.5 %Wind Speed 2.5 to 3.5m/s
    Vw=i;
    StopTime=6; %Set simulation stop time
    sim('WindTurbineGenRectBattModel') %Run Simulink Model
    Table_avg_Pdc=movavg(Pdc(:,2),1,500,1);
    P(j)=Table_avg_Pdc(1000,1); %Power Output
    H(j)=weibull(2); %Output of Weibull probability density function
    j=j+1;
end
for i = 4:0.5:16 %Wind Speed 4 to 16m/s
    Vw=i;
    StopTime=2.5; %Set simulation stop time
    sim('WindTurbineGenRectBattModel') %Run Simulink Model
    Table_avg_Pdc=movavg(Pdc(:,2),1,500,1);
    P(j)=Table_avg_Pdc(1000,1); %Power Output
    H(j)=weibull(2); %Output of Weibull probability density function
    j=j+1;
end
[M,CountCutin]=min(P); %Calculation of Cut-in Power
CutinWindSpeed(rcount)=(CountCutin-1)*0.5+2.5; %Calculation of Cut-in
Wind Speed
```

```

for j=1:28
    E1=E1+P(j)*H(j)*0.5; %Calculation of Energy Production
end
Energy=24*365*E1; %Calculation of Annual Energy Production for minimum
Resistance
E(rcount)=Energy;
rcount=rcount+1;

Rcable=final; %Calculation of Energy Production for minimum Resistance
R(rcount)=Rcable;
j=1;
E1=0;
for i = 2.5:0.5:3.5 %Wind Speed 2.5 to 3.5m/s
    Vw=i;
    StopTime=6; %Set simulation stop time
    sim('WindTurbineGenRectBattModel') %Run Simulink Model
    Table_avg_Pdc=movavg(Pdc(:,2),1,500,1);
    P(j)=Table_avg_Pdc(1000,1); %Power Output
    H(j)=weibull(2); %Output of Weibull probability density function
    j=j+1;
end
for i = 4:0.5:16 %Wind Speed 4 to 16m/s
    Vw=i;
    StopTime=2.5; %Set simulation stop time
    sim('WindTurbineGenRectBattModel') %Run Simulink Model
    Table_avg_Pdc=movavg(Pdc(:,2),1,500,1);
    P(j)=Table_avg_Pdc(1000,1); %Power Output
    H(j)=weibull(2); %Output of Weibull probability density function
    j=j+1;
end
[M,CountCutin]=min(P); %Calculation of Cut-in Power
CutinWindSpeed(rcount)=(CountCutin-1)*0.5+2.5; %Calculation of Cut-in
Wind Speed

for j=1:28
    E1=E1+P(j)*H(j)*0.5; % Calculation of Energy Production
end
Energy=24*365*E1/1000; %Calculation of Annual Energy Production for
maximum Resistance(kWh)
E(rcount)=Energy;
rcount=rcount+1;

while (stop==true)
    Rcable=mean; %Calculation of Energy Production for mean Resistance
    R(rcount)=Rcable;
    j=1;
    E1=0;
    for i = 2.5:0.5:3.5 %Wind Speed 2.5 to 3.5m/s
        Vw=i;
        StopTime=6; %Set simulation stop time

```

```

    sim('WindTurbineGenRectBattModel') %Run Simulink Model
    Table_avg_Pdc=movavg(Pdc(:,2),1,500,1);
    P(j)=Table_avg_Pdc(1000,1); %Power Output
    H(j)=weibull(2); %Output of Weibull probability density
function
    j=j+1;
end
for i = 4:0.5:16 %Wind Speed 4 to 16m/s
    Vw=i;
    StopTime=2.5; %Set simulation stop time
    sim('WindTurbineGenRectBattModel') %Run Simulink Model
    Table_avg_Pdc=movavg(Pdc(:,2),1,500,1);
    P(j)=Table_avg_Pdc(1000,1); %Power Output
    H(j)=weibull(2); %Output of Weibull probability density
function
    j=j+1;
end
[M,CountCutin]=min(P); %Calculation of Cut-in Power
CutinWindSpeed(rcount)=(CountCutin-1)*0.5+2.5; %Calculation of
Cut-in Wind Speed

for j=1:28
    E1=E1+P(j)*H(j)*0.5; % Calculation of Energy Production
end
Emean=24*365*E1; %Calculation of Annual Energy Production for mean
Resistance
Energy=Emean;
E(rcount)=Energy;
[PowerOptimal,I]=max(P); %Optimal Power
WindSpeedOptimal=(I-1)*0.5+2.5; %Wind Speed for optimal power

meanstep=mean+0.05; %Calculation of Energy Production for
Resistance: mean+0.05
Rcable=meanstep;
j=2;
E1=0;
for i = 2.5:0.5:3.5 %Wind Speed 2.5 to 3.5m/s
    Vw=i;
    StopTime=6; %Set simulation stop time
    sim('WindTurbineGenRectBattModel') %Run Simulink Model
    Table_avg_Pdc=movavg(Pdc(:,2),1,500,1);
    P(j)=Table_avg_Pdc(1000,1); %Power Output
    H(j)=weibull(2); %Output of Weibull probability density
function
    j=j+1;
end
for i = 4:0.5:16 %Wind Speed 4 to 16m/s
    Vw=i;
    StopTime=2.5; %Set simulation stop time
    sim('WindTurbineGenRectBattModel') %Run Simulink Model
    Table_avg_Pdc=movavg(Pdc(:,2),1,500,1);

```

```

        P(j)=Table_avg_Pdc(1000,1); %Optimal Power
        H(j)=weibull(2); %Output of Weibull probability density
function
        j=j+1;
    end
    [M,CountCutin]=min(P); %Calculation of Cut-in Power
    CutinWindSpeed(rcount)=(CountCutin-1)*0.5+2.5; %Calculation of
Cut-in Wind Speed

    for j=1:28
        E1=E1+P(j)*H(j)*0.5; %Calculation of Energy Production
    end
    Emeanstep=24*365*E1; %Calculation of Annual Energy Production

    a=(Emeanstep-Emean)/(meanstep-mean); %Inclination between Energy-
mean point and Energy-meanstep point

    if (a<0) %If inclination is negative, keep the first half of
resistance range
        temp = mean;
        mean = (start + temp)/2;
        final= temp;
    else %If inclination is positive, keep the first half of
resistance range
        temp = mean;
        start = temp;
        mean = (temp + final)/2;
    end
    if ((round(R(rcount)*100))/100)==((round(R(rcount-
1)*100))/100) %If resistance is equal with previous resistance
        stop = false;
        Rcable=R(rcount);
        CableResistanceMaximum=R(rcount); %Optimal Resistance

AnnualEnergyProductionMaximum=(round(E(rcount)/100))/10; %Maximum
Energy Production for Optimal Resistance
    end
    rcount=rcount+1;
end

%Outputs at Rated Wind Speed (Optimal state)

Vw=WindSpeedOptimal;
sim('WindTurbineGenRectBattModel') %Run Simulink Model
Revolutions_per_minute_RatedWindSpeed=N(2); %Revolution per minute at
Rated Wind Speed
Table_avg_Iac=movavg(Iac(:,2),1,500,1);
Line_Current_RatedWindSpeed=Table_avg_Iac(1000,1); %Line Current at
Rated Wind Speed
Coefficient_of_power_RatedWindSpeed=cp(2); %Coefficient of Power at
Rated Wind Speed

```

```

Tip_Speed_Ratio_RatedWindSpeed=TSR(2); %Tip speed ratio at Rated Wind
Speed
Table_avg_Pdc=movavg(Pdc(:,2),1,500,1);
Power_to_batteries_RatedWindSpeed=Table_avg_Pdc(1000,1); %Power to
Batteries at Rated Wind Speed
Cable_losses_RatedWindSpeed=100*(3*(Line_Current_RatedWindSpeed^2)*Rca
ble)/(0.5*1.225*pi*(1.2^2)*(Vw^3)); %Cable Losses at Rated Wind Speed

%Outputs at Mean Wind Speed

Vw=Vw_mean;
sim('WindTurbineGenRectBattModel') %Run Simulink Model
Revolutions_per_minute_MeanWindSpeed=N(2); %Revolution per minute at
Mean Wind Speed
Table_avg_Iac=movavg(Iac(:,2),1,500,1);
Line_Current_MeanWindSpeed=Table_avg_Iac(1000,1) %Line Current at Mean
Wind Speed;
Coefficient_of_power_MeanWindSpeed=cp(2); %Coefficient of power at
Mean Wind Speed
Tip_Speed_Ratio_MeanWindSpeed=TSR(2); %Tip speed ratio at Mean Wind
Speed
Table_avg_Pdc=movavg(Pdc(:,2),1,500,1);
Power_to_batteries_MeanWindSpeed=Table_avg_Pdc(1000,1); %Power to
batteries at Mean Wind Speed
Cable_losses_MeanWindSpeed=100*(3*(Line_Current_MeanWindSpeed^2)*Rcabl
e)/(0.5*1.225*pi*(1.2^2)*(Vw^3)); %Cable Losses at Mean Wind Speed

```

## Γ.2 Πρόγραμμα επιλογής καλωδίου και οικονομική μελέτη

```

%Inputs

Vw_mean=5; %Mean Wind Speed for Weibull distribution (m/s)
k=2; %Shape Parameter for Weibull distribution
TorqueConstant=2.7356*(2.8525/2.7356)/sqrt(2); %Generator's Torque:
2.7356 for Generator 2400 48V g=3mm
Rphase=0.6566666667; %Generator's Phase Resistance(Ohm): 0.6566666667
for Generator 2400 48V
Lphase=0.0021916666667; %Generator's Phase Inductance(H):
0.0021916666667 for Generator 2400 48V
Rturbine=1.2; %Blade Radius(m): 1.2 for Generator 2400 48V
DistanceFromBatteries=50; %Distance of wind turbine from Batteries

CableCrossSection=[0.75*(10^(-6)),1*(10^(-6)),1.5*(10^(-6)),2.5*(10^(-
6)),4*(10^(-6)),6*(10^(-6)),10*(10^(-6)),16*(10^(-6))]; %Available
Cable Cross-section (mm2)
CableCostPerMeter=[0.56,0.84,0.61,0.91,1.44,2.09,3.6,5.78]; %Cost for
each Cable Cross-section per meter
p=1.68*(10^(-8)); %Air density

LineCurrentLimit=[15,18,22,31,41,54,70,96]; %Limit of Line Current for
each cable Cross-section

```

```

limit=false;

%Optimal Cross-section and Cost/Annual Energy Production

for rcount=1:8 %Calculation of Energy Production for each Cable Cross-
section
    CableCost(rcount)=CableCostPerMeter(rcount)*DistanceFromBatterie;
    %Calculation of Cable Cost
    CableResistance(rcount)=(p*DistanceFromBatteries)/CableDiameter(r
count); %Calculation of Cable Resistance
    Rcable=CableResistance(rcount);
    E1=0;
    j=1;
    for i = 2.5:0.5:3.5 %Wind Speed 2.5 to 3.5m/s
        Vw=i;
        StopTime=6; %Set simulation stop time
        sim('WindTurbineGenRectBattModel') %Run Simulink Model
        Table_avg_Pdc=movavg(Pdc(:,2),1,500,1);
        P(j)=Table_avg_Pdc(1000,1); %Power Output
        H(j)=weibull(2); %Output of Weibull probability density
function
        Table_avg_Iac=movavg(Iac(:,2),1,500,1);
        LineCurrent(j)=Table_avg_Iac(1000,1); %Line Current Output
        j=j+1;
    end
    for i = 4:0.5:16 %Wind Speed 4 to 16m/s
        Vw=i;
        StopTime=2.5; %Set simulation stop time
        sim('WindTurbineGenRectBattModel') %Run Simulink Model
        Table_avg_Pdc=movavg(Pdc(:,2),1,500,1);
        P(j)=Table_avg_Pdc(1000,1); %Power Output
        H(j)=weibull(2); %Output of Weibull probability density
function
        Table_avg_Iac=movavg(Iac(:,2),1,500,1);
        LineCurrent(j)=Table_avg_Iac(1000,1); %Line Current Output
        j=j+1;
    end
    [PowerOptimal(rcount),I]=max(P); %Optimal Power
    WindSpeedOptimal(rcount)=(I-1)*0.5+2.5; %Wind Speed for Optimal
Power
    [M,CountCutin]=min(P); %Calculation of Cut-in Power
    CutinWindSpeed(rcount)=(CountCutin-1)*0.5+2.5; %Calculation of
Cut-in Wind Speed

    [LineCurrentOptimal(rcount),U]=max(LineCurrent); %Maximum Line
Current

    for j=1:28
        E1=E1+P(j)*H(j)*0.5; %Calculation of Energy Production
    end
end

```



```

        AnnualEnergyProduction(rcount)=24*365*E1/1000; %Calculation of
Annual Energy Production(kWh)
end

if (AnnualEnergyProduction(1)<=AnnualEnergyProduction(8)) %Method
"knee" to find Optimal Cross-section
    a=[AnnualEnergyProduction(1),CableCost(1)];
    b=[AnnualEnergyProduction(8),CableCost(8)];
    for rcount=1:8
        x=[AnnualEnergyProduction(rcount),CableCost(rcount)];
        A=[a,1;b,1;x,1];
        distance(rcount)=abs(det(A))/norm(a-b); %Calculation of
Optimal Cross-section by graph Annual Energy Production vs Cable Cost
    end
    [M,I]=max(distance);
    rcount=I;
else
    [M,I]=max(AnnualEnergyProduction);
    rcount=I;
end

while (limit==false)
    if (LineCurrentOptimal(rcount)>LineCurrentLimit(rcount)) %Check
Maximum Line Current and Line Current for each Cross-section
        rcount=rcount+1;
    else
        limit=true;
    end
end

CableCrossSctionOptimal=CableDiameter(rcount); %Optimal Cable Cross-
section
CableResistanceOptimal=p*DistanceFromBatteries/CableDiameterOptimal; %
Optimal Cable Resistance
AnnualEnergyProductionOptimal=AnnualEnergyProduction(rcount); %Maximum
Annual Energy Production for Optimal Cable Cross-section
CableCostOptimal=CableCost(rcount); %Cost for Optimal Cable Cross-
section
AnnualEnergyProduction_rate=100*AnnualEnergyProductionOptimal/AnnualEn
ergyProductionMaximum; %Rate: Annual Energy Production for Optimal
Cable Cross-section/Annual Energy Production for Optimal Cable
Resistance from Code 1

%Outputs for Optimal Cable Cross-section

j=1;
for i = 2.5:0.5:3.5 %Wind Speed 2.5 to 3.5m/s
    Vw=i;
    StopTime=6; %Set simulation stop time
    WindSpeed(j)=i; %Wind Speed
    sim('WindTurbineGenRectBattModel') %Run Simulink Model
end

```

```

Table_avg_Pdc=movavg(Pdc(:,2),1,500,1);
Pbatt(j)=Table_avg_Pdc(1000,1); %Power to batteries (W)
CoefficientPower(j)=cp(2); %Coefficient Power
TipSpeedRatio(j)=TSR(2); %Tip Speed Ratio
Table_avg_Iac=movavg(Iac(:,2),1,500,1);
LineCurrent(j)=Table_avg_Iac(1000,1); %Line Current (A)
Table_avg_Pm=movavg(Pm(:,2),1,500,1);
Pmech(j)=Table_avg_Pm(1000,1); %Mechanical Power (Generator's
input)
Table_avg_Pac1=movavg(Pac1(:,2),1,500,1);
Pelectric(j)=Table_avg_Pac1(1000,1); %Electric Power (Generator's
output)
Table_avg_Pac2=movavg(Pac2(:,2),1,500,1);
Prec(j)=Table_avg_Pac2(1000,1); %Power to Rectifier
Pcable(j)=3*(LineCurrent(j)^2)*Rcable; %Cable Losses
Pphase(j)=3*(LineCurrent(j)^2)*Rphase; %Generator Losses
RevolutionsPerMinute(j)=N(2); %Revolutions per minute
Table_avg_Vbatt=movavg(Vbatt(:,2),1,500,1);
Vdc(j)=Table_avg_Vbatt(1000,1); %Batteries' Voltage
Table_avg_Vac2=movavg(Vac2(:,2),1,500,1);
Vrec(j)=Table_avg_Vac2(1000,1); %Rectifier's Voltage
Table_avg_Vac1=movavg(Vac1(:,2),1,500,1);
Vt(j)=Table_avg_Vac1(1000,1); %Generator's Voltage
Tmech(j)=Pmech(j)/(2*pi*RevolutionsPerMinute(j)/60); %Mechanical
Torque (Generator's input)
GenEfficiency(j)=Pelectric(j)/Pmech(j); %Efficiency of Generator

SysEfficiency(j)=Pbatt(j)/(0.5*1.2*pi*(Rturbine^2)*(Vw^3)); %Efficiency
of Total System

SysRecEfficiency(j)=Prec(j)/(0.5*1.2*pi*(Rturbine^2)*(Vw^3)); %Efficiency
of System until Rectifier Model
j=j+1;
end
for i = 4:0.5:16 %Wind Speed 4 to 16m/s
Vw=i;
StopTime=2.5; %Set simulation stop time
WindSpeed(j)=i; %Wind Speed
sim('WindTurbineGenRectBattModel') %Run Simulink Model
Table_avg_Pdc=movavg(Pdc(:,2),1,500,1);
Pbatt(j)=Table_avg_Pdc(1000,1); %Power to batteries (W)
CoefficientPower(j)=cp(2); %Coefficient Power
TipSpeedRatio(j)=TSR(2); %Tip Speed Ratio
Table_avg_Iac=movavg(Iac(:,2),1,500,1);
LineCurrent(j)=Table_avg_Iac(1000,1); %Line Current (A)
Table_avg_Pm=movavg(Pm(:,2),1,500,1);
Pmech(j)=Table_avg_Pm(1000,1); %Mechanical Power (Generator's
input)
Table_avg_Pac1=movavg(Pac1(:,2),1,500,1);
Pelectric(j)=Table_avg_Pac1(1000,1); %Electric Power (Generator's
output)

```

```

Table_avg_Pac2=movavg(Pac2(:,2),1,500,1);
Prec(j)=Table_avg_Pac2(1000,1); %Power to Rectifier
Pcable(j)=3*(LineCurrent(j)^2)*Rcable; %Cable Losses
Pphase(j)=3*(LineCurrent(j)^2)*Rphase; %Generator Losses
RevolutionsPerMinute(j)=N(2); %Revolutions per minute
Table_avg_Vbatt=movavg(Vbatt(:,2),1,500,1);
Vdc(j)=Table_avg_Vbatt(1000,1); %Batteries' Voltage
Table_avg_Vac2=movavg(Vac2(:,2),1,500,1);
Vrec(j)=Table_avg_Vac2(1000,1); %Rectifier's Voltage
Table_avg_Vac1=movavg(Vac1(:,2),1,500,1);
Vt(j)=Table_avg_Vac1(1000,1); %Generator's Voltage
Tmech(j)=Pmech(j)/(2*pi*RevolutionsPerMinute(j)/60); %Mechanical
Torque (Generator's input)
GenEfficiency(j)=Pelectric(j)/Pmech(j); %Efficiency of Generator

SysEfficiency(j)=Pbatt(j)/(0.5*1.2*pi*(Rturbine^2)*(Vw^3)); %Efficiency
of Total System

SysRecEfficiency(j)=Prec(j)/(0.5*1.2*pi*(Rturbine^2)*(Vw^3)); %Efficie
ncy of System until Rectifier Model
j=j+1;
end

[M,CountCutin]=min(Pbatt); %Cut-in Power
CutinWindSpeedOptimal=(CountCutin-1)*0.5+2.5; %Cut-in Wind Speed

%Outputs at Rated Wind Speed (Optimal state)

Vw=WindSpeedOptimal(rcount);
sim('WindTurbineGenRectBattModel') %Run Simulink Model
Revolutions_per_minute_RatedWindSpeed=N(2); %Revolution per minute at
Rated Wind Speed
Table_avg_Iac=movavg(Iac(:,2),1,500,1);
Line_Current_RatedWindSpeed=Table_avg_Iac(1000,1); %Line Current at
Rated Wind Speed
Coefficient_of_power_RatedWindSpeed=cp(2); %Coefficient of Power at
Rated Wind Speed
Tip_Speed_Ratio_RatedWindSpeed=TSR(2); %Tip speed ratio at Rated Wind
Speed
Table_avg_Pdc=movavg(Pdc(:,2),1,500,1);
Power_to_batteries_RatedWindSpeed=Table_avg_Pdc(1000,1); %Power to
Batteries at Rated Wind Speed
SysEfficiency_RatedWindSpeed=Power_to_batteries_RatedWindSpeed/(0.5*1.
2*pi*(Rturbine^2)*(Vw^3)); %Efficiency of Total System at Rated Wind
Speed
Cable_losses_RatedWindSpeed=100*(3*(Line_Current_RatedWindSpeed^2)*Rca
ble)/(0.5*1.2*pi*(Rturbine^2)*(Vw^3)); %Cable Losses at Rated Wind
Speed

```

```
%Outputs at Mean Wind Speed
```

```
Vw=Vw_mean;
sim('WindTurbineGenRectBattModel') %Run Simulink Model
Revolutions_per_minute_MeanWindSpeed=N(2); %Revolution per minute at
Mean Wind Speed
Table_avg_Iac=movavg(Iac(:,2),1,500,1);
Line_Current_MeanWindSpeed=Table_avg_Iac(1000,1); %Line Current at
Mean Wind Speed
Coefficient_of_power_MeanWindSpeed=cp(2); %Coefficient of Power at
Mean Wind Speed
Tip_Speed_Ratio_MeanWindSpeed=TSR(2); %Tip speed ratio at Mean Wind
Speed
Table_avg_Pdc=movavg(Pdc(:,2),1,500,1);
Power_to_batteries_MeanWindSpeed=Table_avg_Pdc(1000,1); %Power to
Batteries at Mean Wind Speed
SysEfficiency_MeanWindSpeed=Power_to_batteries_MeanWindSpeed/(0.5*1.2*
pi*(Rturbine^2)*(Vw^3)); %Efficiency of Total System at Mean Wind
Speed
Cable_losses_MeanWindSpeed=100*(3*(Line_Current_MeanWindSpeed^2)*Rcabl
e)/(0.5*1.2*pi*(Rturbine^2)*(Vw^3)); %Cable Losses at Mean Wind Speed
```

```
%Outputs and graphs
```

```
figure
plot(WindSpeed,Pbatt)
title('Power Curve')
xlabel('Vw')
ylabel('Pbatt')
figure
plot(WindSpeed,CoefficientPower)
title('Vw-Cp')
xlabel('Vw')
ylabel('Cp')
figure
plot(WindSpeed,TipSpeedRatio)
title('Vw-TSR')
xlabel('Vw')
ylabel('TSR')
figure
plot(WindSpeed,LineCurrent)
title('Vw-Iac')
xlabel('Vw')
ylabel('Iac')
figure
plot(WindSpeed,Pelectric)
title('Vw-Pelectric')
xlabel('Vw')
ylabel('Pelectric')
figure
plot(WindSpeed,Prec)
```

```

title('Vw-Prec')
xlabel('Vw')
ylabel('Prec')
figure
plot(WindSpeed,Pcable)
title('Vw-Pcable')
xlabel('Vw')
ylabel('Pcable')
figure
plot(WindSpeed,GenEfficiency)
title('Vw-GenEfficiency')
xlabel('Vw')
ylabel('GenEfficiency')
figure
plot(WindSpeed,SysEfficiency)
title('Vw-SysEfficiency')
xlabel('Vw')
ylabel('SysEfficiency')
figure
plot(WindSpeed,SysRecEfficiency)
title('Vw-SysRecEfficiency')
xlabel('Vw')
ylabel('SysRecEfficiency')
figure
plot(WindSpeed,RevolutionsPerMinute)
title('Vw-N')
xlabel('Vw')
ylabel('N')
figure
plot(RevolutionsPerMinute,LineCurrent)
title('N-Iac')
xlabel('N')
ylabel('Iac')
figure
plot(RevolutionsPerMinute,Vdc)
title('N-Vdc')
xlabel('N')
ylabel('Vdc')
figure
plot(RevolutionsPerMinute,Vrec)
title('N-Vrec')
xlabel('N')
ylabel('Vrec')
figure
plot(RevolutionsPerMinute,Vt)
title('N-Vt')
xlabel('N')
ylabel('Vt')
figure
plot(RevolutionsPerMinute,Pcable)
title('N-Pcable')

```

```

xlabel('N')
ylabel('Pcable')
figure
plot(RevolutionsPerMinute,Prec)
title('N-Prec')
xlabel('N')
ylabel('Prec')
figure
plot(RevolutionsPerMinute,Pphase)
title('N-Pphase')
xlabel('N')
ylabel('Pphase')
figure
plot(RevolutionsPerMinute,Pmech)
title('N-Pmech')
xlabel('N')
ylabel('Pmech')
figure
plot(RevolutionsPerMinute,Tmech)
title('N-Tmech')
xlabel('N')
ylabel('Tmech')
figure
plot(RevolutionsPerMinute,Pbatt)
title('N-Pbatt')
xlabel('N')
ylabel('Pbatt')

```

### Γ.3 Πρόγραμμα εύρεσης βέλτιστου διακένου της γεννήτριας

```

%Inputs

Vw_mean=5; %Mean Wind Speed for Weibull distribution (m/s)
k=2; %Shape Parameter for Weibull distribution
g=2:0.5:9; %Air gap for Generator 2400 48V
Torque_Constant=[2.9096,2.8213,2.7356,2.6531,2.5711,2.4955,2.4239,2.35
3,2.287,2.2239,2.1618,2.1038,2.0463,1.9917,1.939]*(2.8525/2.7356)/sqrt
(2); %%Generator's Torque for each Air-gap (Generator 2400 48V)
Rphase=0.6566666667; %Generator's Phase Resistance(Ohm): 0.6566666667
for Generator 2400 48V
lphase=0.0021916666667; %Generator's Phase Inductance(H):
0.0021916666667 for Generator 2400 48V
Rturbine=1.2; %Blade Radius(m): 1.2 for Generator 2400 48V

CableCrossSection=[0.75*(10^(-6)),1*(10^(-6)),1.5*(10^(-6)),2.5*(10^(-
6)),4*(10^(-6)),6*(10^(-6)),10*(10^(-6)),16*(10^(-6))]; %Available
Cable Cross-section
CableCostPerMeter=[0.56,0.84,0.61,0.91,1.44,2.09,3.6,5.78]; %Cost for
each Cable Cross-section per meter
p=1.68*(10^(-8)); %Air density

```

```

LineCurrentLimit=[9,11,14,20,25,33,43,60]; %Limit of Line Current for
each cable Cross-section
limit=false;

%Optimal Cross-section and Cost per Distance From Batteries & per Air
gap/AnnualEnergyProduction

for tcount=1:15 % Calculation of Energy Production for each Air gap
    TorqueConstant=Torque_Constant(tcount);

    for lcount=1:14; %Calculation of Energy Production for each
Distance From Batteries (30 to 150m)
        DistanceFromBatteries=lcount*10+10;
        L(lcount)=DistanceFromBatteries;

        for rcount=1:8 %Calculation of Energy Production for each
Cable Cross-section
            CableCost(rcount)=CableCostPerMeter(rcount)*DistanceFromBat
teries; %Calculation of Cable Cost
            CableResistance(rcount)=(p*DistanceFromBatteries)/CableDiam
eter(rcount); %Calculation of Cable Resistance
            Rcable=CableResistance(rcount);
            E1=0;
            j=1;
            for i = 2.5:0.5:3.5 %Wind Speed 2.5 to 3.5m/s
                Vw=i;
                StopTime=6; %Set simulation stop time
                sim('WindTurbineGenRectBattModel;') %Run Simulink Model
                Table_avg_Pdc=movavg(Pdc(:,2),1,500,1);
                P(j)=Table_avg_Pdc(1000,1); %Power Output
                H(j)=weibull(2); %Output of Weibull probability density
function
                Table_avg_Iac=movavg(Iac(:,2),1,500,1);
                LineCurrent(j)=Table_avg_Iac(1000,1); %Line Current
Output
                j=j+1;
            end
            for i = 4:0.5:16 %Wind Speed 4 to 16m/s
                Vw=i;
                StopTime=2.5; %Set simulation stop time
                sim('WindTurbineGenRectBattModel') %Run Simulink Model
                Table_avg_Pdc=movavg(Pdc(:,2),1,500,1);
                P(j)=Table_avg_Pdc(1000,1); %Power Output
                H(j)=weibull(2); %Output of Weibull probability
density function
                Table_avg_Iac=movavg(Iac(:,2),1,500,1);
                LineCurrent(j)=Table_avg_Iac(1000,1); %Line Current
Output
                j=j+1;
            end
            [PowerOptimal(rcount),I]=max(P); %Optimal Power

```

```

        WindSpeedOptimal(rcount)=(I-1)*0.5+2.5; %Wind Speed for
Optimal Power
        [M,CountCutin]=min(P); %Calculation of Cut-in Power
        CutinWindSpeed(rcount)=(CountCutin-1)*0.5+2.5; %Calculation
of Cut-in Wind Speed

        [LineCurrentOptimal(rcount),U]=max(LineCurrent); %Maximum
Line Current

        for j=1:28
            E1=E1+P(j)*H(j)*0.5; %Calculation of Energy Production
        end
        AnnualEnergyProduction(rcount)=24*365*E1/1000; %Calculation
of Annual Energy Production(kWh)
    end

    if
(AnnualEnergyProduction(1)<=AnnualEnergyProduction(8)) %Method "knee"
to find Optimal Cross-section
        a=[AnnualEnergyProduction(1),CableCost(1)];
        b=[AnnualEnergyProduction(8),CableCost(8)];
        for rcount=1:8
            x=[AnnualEnergyProduction(rcount),CableCost(rcount)];
            A=[a,1;b,1;x,1];
            distance(rcount)=abs(det(A))/norm(a-b); %Calculation
of Optimal Cross-section by graph Annual Energy Production vs Cable
Cost
        end
        [M,I]=max(distance);
        rcount=I;
    else
        [M,I]=max(AnnualEnergyProduction);
        rcount=I;
    end

    while (limit==false)
        if
(LineCurrentOptimal(rcount)>LineCurrentLimit(rcount)) %Check Maximum
Line Current and Line Current for each Cross-section
            rcount=rcount+1;
            boom=boom+1;
        else
            limit=true;
        end
    end
    CableCrossSectionOptimal(tcount,lcount)=CableDiameter(rcount);
%Optimal Cable Cross-section

    AnnualEnergyProductionOptimal(tcount,lcount)=AnnualEnergyProdu
ction(rcount); %Maximum Annual Energy Production for Optimal
Cable Cross-section

```



```

        CableCostOptimal(tcount,lcounT)=CableCost(rcount); %Cost for
Optimal Cable Cross-section
    end
end

AnnualEnergyProductionOptimalT=AnnualEnergyProductionOptimal.'; %Trans
pose Table of Annual Energy Production
D=CableCrossSectionOptimal.'; %Transpose Table of Optimal Cable Cross-
section

figure %Graph 3D: Annual Energy Production Generator 2400 48V vs
Distance From Batteries vs Generator's Air gap
surf(g,L,AnnualEnergyProductionOptimalT)
title('3-D Plot Annual Energy Production Generator 2400 48V')
xlabel('g(mm)')
ylabel('Distance From Batteries(m)')
zlabel('Annual Energy Production (kWh)')

figure %Graph 3D: Cable Cross-section Generator 2400 48V vs Distance
From Batteries vs Generator's Air gap
surf(g,L,D)
title('3-D Plot Cable Cross-section Generator 2400 48V')
xlabel('g(mm)')
ylabel('Distance From Batteries(m)')
zlabel('Cable Diameter')

for tcount=1:15
    SumEnergy(tcount)=0;
    for lcounT=1:14

        SumEnergy(tcount)=SumEnergy(tcount)+AnnualEnergyProductionOpti
mal(tcount,lcounT); %Calculation of Optimal Air gap
    end
end
[M,I]=max(SumEnergy);
AirGapOptimal=(I-1)*0.5+2.5; %Optimal Air gap

```

#### Γ.4 Πρόγραμμα σύνδεσης ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές μέσω MPPT

```

%Inputs

Vw_mean=5; %Mean Wind Speed for Weibull distribution (m/s)
k=2; %Shape Parameter for Weibull distribution
TorqueConstant=2.7356*(2.8525/2.7356)/sqrt(2); %Generator's Torque:
2.7356 for Generator 2400 48V g=3mm
Rphase=0.6566666667; %Generator's Phase Resistance(Ohm): 0.6566666667
for Generator 2400 48V
Lphase=0.0021916666667; %Generator's Phase Inductance(H):
0.0021916666667 for Generator 2400 48V
Rturbine=1.2; %Blade Radius(m): 1.2 for Generator 2400 48V
DistanceFromBatteries=70; %Distance of wind turbine from Batteries

```

```

p=1.68*(10^(-8)); %Air density
CableCrossSection=10*(10^(-6)); %Cable Cross-section
CableResistance=(p*DistanceFromBatteries)/CableCrossSection; %Calculat
ion of Cable Resistance
Rcable=CableResistance;

%Calculation of Maximum Power Per Wind Speed

j=1;
vwcount=1;
for i=2.5:0.5:3.5 %Wind Speed 2.5 to 3.5m/s
    Vw=i;
    StopTime=6; %Set simulation stop time
    start= 20; %Voltage minimum limit for binary search algorithm
    final= 50; %Voltage maximum limit for binary search algorithm
    mean=(start+final)/2; %Calculation of mean Voltage for binary
search algorithm
    stop=true;
    count=1;

    Vnombatt=start; %Calculation of Maximum Power to Batteries for
minimum Voltage
    Vnominalbattery(vwcount,count)=Vnombatt;
    sim('WindTurbineGenRectBattModel') %Run Simulink Model
    Table_avg_Pdc=movavg(Pdc(:,2),1,500,1);
    Pbatt(vwcount,count)=Table_avg_Pdc(1000,1); %Maximum Power to
Batteries
    count=count+1;

    Vnombatt=final; %Calculation of Maximum Power to Batteries for
maximum Voltage
    Vnominalbattery(vwcount,count)=Vnombatt;
    sim('WindTurbineGenRectBattModel') %Run Simulink Model
    Table_avg_Pdc=movavg(Pdc(:,2),1,500,1);
    Pbatt(vwcount,count)=Table_avg_Pdc(1000,1); %Maximum Power to
Batteries
    count=count+1;

    while (stop==true)

        Vnombatt=mean; %Calculation of Maximum Power to Batteries for
mean Voltage (binary search algorithm)
        Vnominalbattery(vwcount,count)=Vnombatt;
        sim('WindTurbineGenRectBattModel') %Run Simulink Model
        Table_avg_Pdc=movavg(Pdc(:,2),1,500,1);
        Pbattmean=Table_avg_Pdc(1000,1);
        Pbatt(vwcount,count)=Table_avg_Pdc(1000,1); %Maximum Power to
batteries

        meanstep=mean+0.05; %Calculation of Maximum Power to Batteries
for Voltage: mean+0.05

```

```

Vnombatt=meanstep;    %meanstep point
sim('WindTurbineGenRectBattModel') %Run Simulink Model
Table_avg_Pdc=movavg(Pdc(:,2),1,500,1);
Pbattmeanstep=Table_avg_Pdc(1000,1); %Maximum Power to
batteries

a=(Pbattmeanstep-Pbattmean)/(meanstep-mean); %Inclination
between Maximum Power-mean point and Maximum Power-meanstep point
if (a<0) %If inclination is negative, keep the first half of
voltage range
    temp = mean;
    mean = (start + temp)/2;
    final= temp;
else %If inclination is positive, keep the first half of
resistance range
    temp = mean;
    start = temp;
    mean = (temp + final)/2;
end

if ((round(Pbatt(count)))==(round(Pbatt(count-1)))) %If
maximum Power is equal with previous maximum Power
    stop = false;
    Vnombattfinal(j)=Vnominalbattery(count); %Optimal Voltage
for Maximum Power
    WindSpeed(j)=i; %Wind Speed
    sim('WindTurbineGenRectBattModel') %Run Simulink Model
    Table_avg_Pdc=movavg(Pdc(:,2),1,500,1);
    PbattMaximum(j)=Table_avg_Pdc(1000,1); %Power to batteries(W)
    CoefficientPower(j)=cp(2); %Coefficient Power
    TipSpeedRatio(j)=TSR(2); %Tip Speed Ratio
    Table_avg_Iac=movavg(Iac(:,2),1,500,1);
    LineCurrent(j)=Table_avg_Iac(1000,1); %Line Current (A)
    Table_avg_Pm=movavg(Pm(:,2),1,500,1);
    Pmech(j)=Table_avg_Pm(1000,1); %Mechanical Power
(Generator's input)
    Table_avg_Pac1=movavg(Pac1(:,2),1,500,1);
    Pelectric(j)=Table_avg_Pac1(1000,1); %Electric Power
(Generator's output)
    Table_avg_Pac2=movavg(Pac2(:,2),1,500,1);
    Prec(j)=Table_avg_Pac2(1000,1); %Power to Rectifier
    Pcable(j)=3*(LineCurrent(j)^2)*Rcable; %Cable Losses
    Pphase(j)=3*(LineCurrent(j)^2)*Rphase; %Generator Losses
    RevolutionsPerMinute(j)=N(2); %Revolutions per minute
    Table_avg_Vbatt=movavg(Vbatt(:,2),1,500,1);
    Vdc(j)=Table_avg_Vbatt(1000,1); %Batteries' Voltage
    Table_avg_Vac2=movavg(Vac2(:,2),1,500,1);
    Vrec(j)=Table_avg_Vac2(1000,1); %Rectifier's Voltage
    Table_avg_Vac1=movavg(Vac1(:,2),1,500,1);
    Vt(j)=Table_avg_Vac1(1000,1); %Generator's Voltage

```

```

Tmech(j)=Pmech(j)/(2*pi*RevolutionsPerMinute(j)/60; %Mechanical Torque
(Generator's input)
    GenEfficiency(j)=Pelectric(j)/Pmech(j); %Efficiency of
Generator

SysEfficiency(j)=Pbatt(j)/(0.5*1.2*pi*(Rturbine^2)*(Vw^3); %Efficiency
of Total System

SysRecEfficiency(j)=Prec(j)/(0.5*1.2*pi*(Rturbine^2)*(Vw^3); %Efficien
cy of System until Rectifier Model
    end
    count=count+1;
end

vwcount=vwcount+1;
j=j+1;
end

for i=4:0.5:16 %Wind Speed 4 to 16m/s
    Vw=i;
    StopTime=2.5; %Set simulation stop time
    start= 20; %Voltage minimum limit for binary search algorithm
    final= 80; %Voltage maximum limit for binary search algorithm
    mean=(start+final)/2; %Calculation of mean Voltage for binary
search algorithm
    stop=true;
    count=1;

    Vnombatt=start; %Calculation of Maximum Power to Batteries for
minimum Voltage
    Vnominalbattery(vwcount,count)=Vnombatt;
    sim('WindTurbineGenRectBattModel') %Run Simulink Model
    Table_avg_Pdc=movavg(Pdc(:,2),1,500,1);
    Pbatt(vwcount,count)=Table_avg_Pdc(1000,1); %Maximum Power to
Batteries
    count=count+1;

    Vnombatt=final; %Calculation of Maximum Power to Batteries for
maximum Voltage
    Vnominalbattery(vwcount,count)=Vnombatt;
    sim('WindTurbineGenRectBattModel') %Run Simulink Model
    Table_avg_Pdc=movavg(Pdc(:,2),1,500,1);
    Pbatt(vwcount,count)=Table_avg_Pdc(1000,1); %Maximum Power to
Batteries
    count=count+1;

    while (stop==true)

        Vnombatt=mean; %Calculation of Maximum Power to Batteries for
mean Voltage (binary search algorithm)

```

```

Vnominalbattery(vwcount, count)=Vnombatt;
sim('WindTurbineGenRectBattModel') %Run Simulink Model
Table_avg_Pdc=movavg(Pdc(:,2),1,500,1);
Pbattmean=Table_avg_Pdc(1000,1);
Pbatt(vwcount, count)=Table_avg_Pdc(1000,1); %Maximum Power to
batteries

    meanstep=mean+0.05; %Calculation of Maximum Power to Batteries
for Voltage: mean+0.05
    Vnombatt=meanstep; %meanstep point
    sim('WindTurbineGenRectBattModel') %Run Simulink Model
    Table_avg_Pdc=movavg(Pdc(:,2),1,500,1);
    Pbattmeanstep=Table_avg_Pdc(1000,1); %Maximum Power to
batteries

    a=(Pbattmeanstep-Pbattmean)/(meanstep-mean); %Inclination
between Maximum Power-mean point and Maximum Power-meanstep point
    if (a<0) %If inclination is negative, keep the first half of
voltage range
        temp = mean;
        mean = (start + temp)/2;
        final= temp;
    else %If inclination is positive, keep the first half of
resistance range
        temp = mean;
        start = temp;
        mean = (temp + final)/2;
    end

    if ((round(Pbatt(count)))==(round(Pbatt(count-1)))) %If
maximum Power is equal with previous maximum Power
        stop = false;
        Vnombattfinal(j)=Vnominalbattery(count); %Optimal Voltage
for Maximum Power
        WindSpeed(j)=i; %Wind Speed
        sim('WindTurbineGenRectBattModel') %Run Simulink Model
        Table_avg_Pdc=movavg(Pdc(:,2),1,500,1);
        PbattMaximum(j)=Table_avg_Pdc(1000,1); %Power to batteries
(W)
        CoefficientPower(j)=cp(2); %Coefficient Power
        TipSpeedRatio(j)=TSR(2); %Tip Speed Ratio
        Table_avg_Iac=movavg(Iac(:,2),1,500,1);
        LineCurrent(j)=Table_avg_Iac(1000,1); %Line Current (A)
        Table_avg_Pm=movavg(Pm(:,2),1,500,1);
        Pmech(j)=Table_avg_Pm(1000,1); %Mechanical Power
(Generator's input)
        Table_avg_Pac1=movavg(Pac1(:,2),1,500,1);
        Pelectric(j)=Table_avg_Pac1(1000,1); %Electric Power
(Generator's output)
        Table_avg_Pac2=movavg(Pac2(:,2),1,500,1);
        Prec(j)=Table_avg_Pac2(1000,1); %Power to Rectifier

```

```

Pcable(j)=3*(LineCurrent(j)^2)*Rcable; %Cable Losses
Pphase(j)=3*(LineCurrent(j)^2)*Rphase; %Generator Losses
RevolutionsPerMinute(j)=N(2); %Revolutions per minute
Table_avg_Vbatt=movavg(Vbatt(:,2),1,500,1);
Vdc(j)=Table_avg_Vbatt(1000,1); %Batteries' Voltage
Table_avg_Vac2=movavg(Vac2(:,2),1,500,1);
Vrec(j)=Table_avg_Vac2(1000,1); %Rectifier's Voltage
Table_avg_Vac1=movavg(Vac1(:,2),1,500,1);
Vt(j)=Table_avg_Vac1(1000,1); %Generator's Voltage

Tmech(j)=Pmech(j)/(2*pi*RevolutionsPerMinute(j)/60; %Mechanical
Torque (Generator's input)
GenEfficiency(j)=Pelectric(j)/Pmech(j); %Efficiency of
Generator

SysEfficiency(j)=Pbatt(j)/(0.5*1.2*pi*(Rturbine^2)*(Vw^3); %Efficiency
of Total System

SysRecEfficiency(j)=Prec(j)/(0.5*1.2*pi*(Rturbine^2)*(Vw^3); %Efficien
cy of System until Rectifier Model
end
count=count+1;
end
vwcount=vwcount+1;
j=j+1;
end
[M,CountCutin]=min(PbattMaximum); %Cut-in Power
CutinWindSpeedOptimal=(CountCutin-1)*0.5+2.5; %Cut-in Wind Speed

%Outputs and graphs

figure
plot(WindSpeed,PbattMaximum)
title('Power Curve with MPPT')
xlabel('Vw')
ylabel('Pbatt')
figure
plot(WindSpeed,CoefficientPower)
title('Vw-Cp')
xlabel('Vw')
ylabel('Cp')
figure
plot(WindSpeed,TipSpeedRatio)
title('Vw-TSR')
xlabel('Vw')
ylabel('TSR')
figure
plot(WindSpeed,LineCurrent)
title('Vw-Iac')
xlabel('Vw')
ylabel('Iac')

```

```

figure
plot(WindSpeed, Pelectric)
title('Vw-Pelectric')
xlabel('Vw')
ylabel('Pelectric')
figure
plot(WindSpeed, Prec)
title('Vw-Prec')
xlabel('Vw')
ylabel('Prec')
figure
plot(WindSpeed, Pcable)
title('Vw-Pcable')
xlabel('Vw')
ylabel('Pcable')
figure
plot(WindSpeed, GenEfficiency)
title('Vw-GenEfficiency')
xlabel('Vw')
ylabel('GenEfficiency')
figure
plot(WindSpeed, SysEfficiency)
title('Vw-SysEfficiency')
xlabel('Vw')
ylabel('SysEfficiency')
figure
plot(WindSpeed, SysRecEfficiency)
title('Vw-SysRecEfficiency')
xlabel('Vw')
ylabel('SysRecEfficiency')
figure
plot(WindSpeed, RevolutionsPerMinute)
title('Vw-N')
xlabel('Vw')
ylabel('N')
figure
plot(RevolutionsPerMinute, LineCurrent)
title('N-Iac')
xlabel('N')
ylabel('Iac')
figure
plot(RevolutionsPerMinute, Vdc)
title('N-Vdc')
xlabel('N')
ylabel('Vdc')
figure
plot(RevolutionsPerMinute, Vrec)
title('N-Vrec')
xlabel('N')
ylabel('Vrec')
figure

```

```

plot (RevolutionsPerMinute, Vt)
title ('N-Vt')
xlabel ('N')
ylabel ('Vt')
figure
plot (RevolutionsPerMinute, Pcable)
title ('N-Pcable')
xlabel ('N')
ylabel ('Pcable')
figure
plot (RevolutionsPerMinute, Prec)
title ('N-Prec')
xlabel ('N')
ylabel ('Prec')
figure
plot (RevolutionsPerMinute, Pphase)
title ('N-Pphase')
xlabel ('N')
ylabel ('Pphase')
figure
plot (RevolutionsPerMinute, Pmech)
title ('N-Pmech')
xlabel ('N')
ylabel ('Pmech')
figure
plot (RevolutionsPerMinute, Tmech)
title ('N-Tmech')
xlabel ('N')
ylabel ('Tmech')
figure
plot (RevolutionsPerMinute, Pbatt)
title ('N-Pbatt')
xlabel ('N')
ylabel ('Pbatt')

```



## Βιβλιογραφία

- [1] D. Bartmann, D. Fink, "Homebrew Wind Power: Hands-on guide to harnessing the wind", Buckville Publications, 2009.
- [2] Piggott H., "How to build a wind turbine", 2005.
- [3] Hau E., "Wind Turbines, fundamentals, technologies, application, economics", second edition, Springer, 2006.
- [4] Παπαθανασίου Σ., "Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, σημειώσεις παραδόσεων", Ε.Μ.Π, 2008.
- [5] Cui W., Liu X., Yu F., Whitty J., "Analysis of the Passive Yaw Mechanism of Small Horizontal - Axis Wind Turbines", University of Central Lancashire.
- [6] Piggott H., "A wind turbine recipe book", Scoraig, 2009.
- [7] Wang R.J., "Design Aspects and Optimisation of an Axial Field Permanent Magnet Machine with an Ironless Stator", Dissertation, University of Stellenbosch, March 2003.
- [8] K. Nilsson, E. Segergren and M. Leijon, "Simulation of Direct Drive Generators Designed for Underwater Vertical Axis Turbines", Fifth European Wave Energy Conference, 2003.
- [9] F. Rossouw, "Analysis and Design of Axial Flux Permanent Magnet Wind Generator System for Direct Battery Charging Applications", thesis MScEng, Stellenbosch University, 2009.
- [10] Gieras J., Wang R., Kamper M. "Axial flux permanent magnet brushless machines", second edition, Springer, 2008.
- [11] 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.
- [12] M. Dubois, H. Polinder, J. Ferreira, "Axial and radial-flux permanent magnet generators for direct-drive wind turbines", In P Helm (Ed.), Proceedings (pp.5-8), Munich: WIP, January 2001.
- [13] Yicheng C., Pragasen P., Azeem K., "PM Wind Generator Comparison of Different Topologies", Industry Applications Conference, 2004, Vol.3, pp. 1405-1412, October, 2004.
- [14] Aydin M., Huang S., Lipo T.A., "Axial flux permanent magnet machines: A review", Wisconsin Electric Machines & Power Electronics Consortium, 2004.
- [15] Parviainen A., Pyrhönen J., Kontkanen P., "Axial Flux Permanent Magnet Generator with Concentrated Winding for Small Wind Power Application", IEEE Int' 1 Conf. on Electric Machines and Drives, pp. 1187-1191.

- [16] Γ. Μεσσήνης, «Βελτιστοποίηση, προσομοίωση και κατασκευή μικρής ανεμογεννήτριας για εφαρμογές χαμηλού κόστους και μελέτη της AC και DC σύνδεσης», Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., 2011.
- [17] Π. Κοτσαμπόπουλος, “Μελέτη, κατασκευή και προσομοίωση της λειτουργίας μικρής ανεμογεννήτριας αξονικής ροής”, Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., 2010.
- [18] Αικατερίνη Γ. Τρουλλάκη, «Μελέτη διαφορετικών μαγνητικών υλικών για τοπικά κατασκευασμένες μικρές ανεμογεννήτριες αξονικής ροής σε εφαρμογές αγροτικής ηλεκτροδότησης», Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., 2014.
- [19] Huang S., Luo J., Leonardi F., Lipo T.A., “A comparison of power density for axial flux machines based on general purpose sizing equations”.
- [20] Rovio T., “A Feasibility Study of Permanent Magnet Generator Topologies for Small-Scale Wind Power Application”, Doctoral thesis, Tampere University of Tecnology.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] A. Parviainen, “Design of Axial-Flux Permanent Magnet Low-speed Machines and Performance Comparison between Radial-Flux and Axial-Flux Machines”, 2005.
- [25] M. Kamper, R. Wang, F. Rossouw, “Analysis and Performance Evaluation of Axial Flux Air-Cored Stator Permanent Magnet Machine with Concentrated Coils”, Electric Machines & Drives Conference, 2007, IEMDC '07, IEEE International, vol.1, no., pp.13- 20, 3-5 May 2007.
- [26] Chowdhury S., Chowdhury S.P., Crossley P., “Microgrids and Active Distribution Networkd”, IET Renewable Energy Series 6, Institution of Engineering and Technology, 2009.
- [27] 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.
- [28] Gary Moor, Johan Beukes, “Maximum Power Point Tracking methods for small scale Wind Turbines”.
- [29] João P. Monteiro, Miguel R. Silvestre, Hugh Piggott, Jorge C. André, ‘Wind tunnel testing of a horizontal axis wind turbine rotor and comparison with simulations from two Blade Element Momentum codes’, University of Beira Interior, Covilhã, Portugal, 2013.

[30] Datasheet, Standard Rectifier Module, VUO62-12NO7.

[31] Wind turbines – Part 12-1, “Power performance measurements of electricity producing wind turbines”, IEC 61400-12-1, First edition, 2005-12.

[32] Στεφανίδης Στέφανος, “Σχεδιασμός – Αποτύπωση Εσωτερικής Ηλεκτρικής εγκατάστασης και ακουστικής μελέτης της αίθουσας της χορωδίας Μάνος Χατζιδάκις με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή (Autocad – Catta Acoustic)” Πανεπιστήμιο Πατρών 2011.