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

Μελέτη σύνδεσης μικρών ανεμογεννητριών σε μικρής κλίμακας εφαρμογές με αποθήκευση σε συσσωρευτές και μελέτη,σχεδίαση και κατασκευή ρυθμιστή φόρτισης συσσωρευτών με απορριπτικό φορτίο.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θωμάς Β. Πάζιος

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2012

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

Μελέτη σύνδεσης μικρών ανεμογεννητριών σε μικρής κλίμακας εφαρμογές με αποθήκευση σε συσσωρευτές και μελέτη,σχεδίαση και κατασκευή ρυθμιστή φόρτισης συσσωρευτών με απορριπτικό φορτίο.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θωμάς Β. Πάζιος

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε απο την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 16η Ιουλίου 2012

.....	.....	.....
Νικόλαος Χατζηαργυρίου	Σταύρος Σ. Παπαθανασίου	Παύλος Γεωργιλάκης

Αθήνα, Ιούλιος 2012

.....

Θωμάς Β. Πάζιος

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

Copyright © Θωμάς Β. Πάζιος, 2012

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, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μή κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή άλλης φύσεως, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

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

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της σύνδεσης ανεμογεννητριών μικρού μεγέθους σε μικρής κλίμακας εφαρμογές με αποθήκευση σε συσσωρευτές και η μελέτη, προσομοίωση, κατασκευή και βελτιστοποίηση ρυθμιστή φόρτισης συσσωρευτών με απορριπτικό φορτίο.

Αρχικά γίνεται μία παρουσίαση γενικά μεγεθών και χαρακτηριστικών των ανεμογεννητριών και ειδικότερα αυτών που είναι χρήσιμα για την περαιτέρω διεξαγωγή της έρευνας όπως είναι τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά καθώς και η κατανομή του ανέμου που παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο κατά την εύρεση της ενεργειακής απόδοσης της ανεμογεννήτριας.

Εισάγεται η έννοια των μικροδικτύων και μελετώνται τα μοντέλα ανάλυσης της σύνδεσης των ανεμογεννητριών,τα οποία είναι το AC και το DC. Παρουσιάζονται πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και αιτιολογείται η επιλογή του AC μοντέλου στη συνέχεια της έρευνας.

Μελετάται αρχικά η σύνδεση της ανεμογεννήτριας των 850W που έχει κατασκευαστεί στο εργαστήριο, απευθείας σε συστοιχία συσσωρευτών 48V και 24V και εξάγονται συμπεράσματα όσον αφορά στην ισχύ των μπαταριών καθώς και της ενεργειακής απόδοσης του συστήματος.

Ασχολούμαστε στη συνέχεια με τα καλώδια σύνδεσης της γεννήτριας με τους συσσωρευτές και προχωράμε σε βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης ανάλογα με το μήκος και το τύπο του καλωδίου.

Προτείνεται η σύνδεση αυτεπαγωγής εν σειρά για την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης. Αξιοποιούμε το μοντέλο των 48V, προσομοιώνουμε τη λειτουργία του και προτείνουμε βέλτιστες τιμές παραμέτρων όσον αφορά στην αντίσταση του καλωδίου σύνδεσης και στης τιμή της αυτεπαγωγής.

Προχωράμε στην παρουσίαση τόσο εμπορικών όσο και μή εμπορικών ελεγκτών φόρτισης συσσωρευτών και παρουσιάζουμε τη δική μας υλοποίηση χαμηλού κόστους η οποία κατασκευάστηκε εξ' ολοκλήρου στο εργαστήριο και δοκιμάστηκε σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Έπειτα παρουσιάζουμε τη πειραματική διάταξη που στήθηκε για την διεξαγωγή των απαραίτητων πειραμάτων και γίνεται σύγκριση μεταξύ των αποτελεμάτων των θεωρητικών υπολογισμών και των πειραματικών μετρήσεων.

Τέλος εξάγονται συμπεράσματα και προτείνονται βελτιώσεις σε τμήματα της έρευνας μας.

Λέξεις κλειδιά :

ενδιάμεση τεχνολογία, χαμηλό κόστος, μικρές ανεμογεννήτριες, βελτιστοποίηση, μικροδίκτυα, AC σύνδεση , DC σύνδεση, σύνδεση σε συσσωρευτές, αυτεπαγωγή, ελεγκτές φόρτισης, απορριπτικό φορτίο, Arduino, μικροελεγκτές, αύξηση ενεργειακής απόδοσης

Abstract

Subject of the present work is the study of connection of small wind turbines in small scale applications concerning storage to batteries and also the study, simulation, construction and optimization of batteries charge controller with dump loads.

In the beggining we present general characteristics of the wind turbine and especially those which are useful for further progress of our study such as the aerodynamic characteristics and the wind allocation that plays an important role during the calculation of the energy efficiency.

The concept of microgrids is introduced an the models of connection are being studied, the AC model and the DC model. Advantages and disadvantages concerning the two models are presented so as to justify the AC model as the most appropriate for our causes.

At first we study the 850W wind turbine which was constructed in our laboratory directly to 48V and 24V batteries and useful conclusions are exported cooncerning batteries power and energy efficiency.

Then we deal with the connection cables between the batteries and the rectifier and we try to maximize energy efficiency depending on the type and wire length.

We suggest the introduction of an induction in series so as to maximize energy efficiency.We deal with the 48V AC model, simulate its' operation and we suggest optimal parameter values concerning the cable resistance and induction value.

We proceed to the introduction of both commercial an non – commercial charge controllers and present our low cost implementation which was manufactured and tested in real time conditions in our laboratory.

Then we present our experimental setup that was used for the conduc of our experiments and we compare the experiments' results an those of our theoretical work.

Finally conclusions are deducted and further optimizations concerning various parts of our work are proposed.

Key Words :

appropriate technology, low cost, small wind turbines, enhancement, microgrids, AC connection, DC connection, battery connection, induction, charge controllers, dump load, Arduino, microcontrollers, energy efficiency enhancement

Ευχαριστίες

Θερμά ευχαριστώ στον Κώστα Λατούφη, τον Πάνο Κοτσαμπόπουλο και το Γιώργο Μεσσήνη για τις υποδείξεις και τη καθοδήγησή τους κατά τη διεξαγωγή της εργασίας. Ευχαριστώ επίσης το Γιώργο Κατσαρό για τη πολύτιμη βοήθεια του στο στάδιο της κατασκευής του ελεγκτή καθώς και όλα τα παιδιά του εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας για τις συμβουλές, τη βοήθεια και τις υποδείξεις τους στα διάφορα στάδια της έρευνας. Ιδιαίτερα ευχαριστώ στον κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου, καθηγητή Ε.Μ.Π για την υποστήριξη της παρούσας εργασίας.

Στους γονείς μου

Περιεχόμενα

1 . Εισαγωγή

1.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και μικρής κλίμακας εφαρμογές.....11

1.2 Χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών.....12
1.2.1 Χαρακτηριστικά ισχύος 12
1.2.2 Κατανομή ανέμου.....14
1.2.3 Περιορισμός της ισχύος.....16

2. Σύνδεση ανεμογεννητριών

2.1 Μικροδίκτυα.....18

2.1.1 Πληροφορίες πάνω στα μικροδίκτυα.....18
,παρουσίαση πλεονεκτημάτων καθώς και μειονεκτημάτων
2.1.2 Διάταξη Μικροδικτύου.....19

2.2 Σύνδεση Ανεμογεννητριών 22

2.2.1 Η AC σύνδεση..... 22
2.2.1.1 Δομή της AC σύνδεσης.....22
2.2.1.2 Λειτουργία μεγιστοποίησης αποδιδόμενης ισχύος 23
2.2.2 Η DC σύνδεση.....24
2.2.2.1 Μοντέλο AC ανάλυσης – Σύστημα.....27
συνδεδεμένο απευθείας σε μπαταρίες
2.2.2.2 Μοντέλο DC ανάλυσης – Σύνδεση απευθείας σε μπαταρίες.....30

3.Ενεργειακή απόδοση ανεμογεννήτριας

3.1 Υπολογισμός της ενεργειακής απόδοσης.....32

3.2 Η DC σύνδεση..... 32

3.2.1 Παρουσίαση των χαρακτηριστικών της γεννήτριας 850 W.....33
3.2.2 Απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές.....33
3.2.2.1 Απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές – Σύστημα 48V.....34
3.2.2.1.1 Θεωρητική προσέγγιση και επεξήγηση της διαδικασίας.....34
3.2.2.1.2 Διαδικασία επιλογής καλωδίου και οικονομική μελέτη.....43

3.2.2.2 Απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές – Σύστημα 24V.....49
3.2.2.2.1 Μεγιστοποίηση ενεργειακής απόδοσης 50
και επιλογή βέλτιστου καλωδίου σύνδεσης

3.2.2.3 Σύνδεση με σύστημα μεγιστοποίησης ισχύος (MPPT).....58

3.2.2.4 Βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης – Σύνδεση αυτεπαγωγής..... 64
3.2.2.4.1 Θεωρητική ανάλυση και προσέγγιση του μοντέλου.....64
3.2.2.4.2Προσομοίωση μοντέλου συνδεδεμένου 67
σε συσσωρευτές 48V
3.2.2.4.3 Διαδικασία επιλογής καλωδίου.....77
και οικονομική μελέτη για σύστημα 48V

4.Dump Load Controllers

4.1 Γενικά για τους Dump Load Controllers.....85

4.2 Μή εμπορικοί ελεγκτές.....89

4.2.1 Folkecenter Dump Load Controller.....89
4.2.1.1 Παρουσίαση του κυκλώματος και επεξήγηση της λειτουργίας του.....89
4.2.1.2 Προσομοίωση στο LTSpice.....91

4.2.2 Hugh Piggott Dump Load Controller.....96
4.2.2.1 Παρουσίαση του κυκλώματος και επεξήγηση της λειτουργίας του.....96
4.2.2.2 Προσομοίωση στο LTSpice.....98

4.2.3 gHurd Dump Load Controller.....101
4.2.3.1 Παρουσίαση του κυκλώματος και επεξήγηση της λειτουργίας του.....101

4.2.4 Arduino Dump Load Controller.....104
4.2.4.1 Λίγα λόγια για τους μικροελεγκτές.....104
4.2.4.2 Παρουσίαση της πρωτότυπης πλατφόρμας Arduino.....105
4.2.4.3 Παρουσίαση του κυκλώματος του Dump Load Controller.....106
και επεξήγηση της λειτουργίας του

5.Πειραματικές διατάξεις και μέτρηση μεγεθών της γεννήτριας κατά τη σύνδεση της σε συσσωρευτές

5.1 Σύνδεση στη γεννήτρια 850 W και διεξαγωγή πειραμάτων.....122

Συμπεράσματα και προτάσεις.....129

Βιβλιογραφία.....131

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή

1.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και μικρής κλίμακας εφαρμογές

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

Και μιλάμε για μια συνθήκη χρήσης παρά για μια αντικειμενική πραγματικότητα καθώς αυτό που στην ουσία διαχωρίζει τις προσπάθειες για παραγωγή ενέργειας απο ανανεώσιμες πηγές είναι από τη μία η ευκολία και η σχετικά ανέξοδη διαδικασία παραγωγής και απο την άλλη η δυνατότητα αυτονόμησης της διαχείρισης σε επίπεδο μικρών κοινοτήτων και η δυνατότητα κατασκευής, ελέγχου ,επισκευής των εν λόγω εγκαταστάσεων μικρής κλίμακας απο 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 απο πολιτική – κοινωνική σκοπιά. Η συλλογική εργασία που απαιτούν τα έργα αυτά, δημιουργούν σχέσεις μεταξύ των ατόμων που απαρτίζουν την ομάδα, εξασφαλίζουν την οριζόντια διάχυση της γνώσης στο κοινωνικό πεδίο και διασφαλίζουν μια συνθήκη που εν ολίγοις καταλήγει στο ότι : "Κατασκευάζουμε, δημιουργούμε αυτόνομα εμείς για εμάς...με τρόπο απλό και κατανοητό σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο κομμάτι κόσμου, με μικρό κόστος και με συλλογική εργασία"

Όταν αναφέρουμε κατασκευές και έργα μικρής κλίμακας, ειδικά όταν αναφερόμαστε σε ανεμογεννήτριες και μικρά αιολικά πάρκα, εννοούμε κατασκευές με ονομαστική ισχύ κάτω απο 70kW ενώ ανεμογεννήτριες κάτω απο 10kW χαρακτηρίζονται ως ιδιαίτερα μικρές. Ένα απο τα βασικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών είναι η καμπύλη ισχύος η οποία και αξιοποιείται για να υπολογιστεί η ενέργεια που παράγουν σε διάστημα ενός έτους και ονομάζεται ενεργειακή απόδοση. Με τη σειρά του το μέγεθος αυτό εξαρτάται απο την κατανομή του ανέμου και είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την ανάλυση μας να γνωρίζουμε ότι έργα με τα μεγέθη που αναφέρουμε συνήθως πραγματοποιούνται σε περιοχές με σχετικά χαμηλό άνεμο.

Όσον αφορά στη σύνδεση και την εκμετάλλευση των εν λόγω ανεμογεννητριών αυτές μπορούν είτε να συνδεθούν με αυτόνομο τρόπο είτε στο δίκτυο χαμηλής τάσης. Είναι κάτι παραπάνω απο

προφανή τα αποτελέσματα μιας τέτοιας δυνατότητας ειδικά για δυσπρόσιτες και απομακρυσμένες περιοχές καθώς και για μικρές κοινότητες που επιζητούν ενεργειακή αυτονομία.

1.2 Χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών

1.2.1 Χαρακτηριστικά ισχύος

Η μηχανική ισχύς που μπορεί να δεσμευτεί απο τον άνεμο είναι γνωστό ότι δίνεται απο την παρακάτω σχέση:

$$\text{Pair} = \frac{1}{2} p c_p \pi R_{turb}^2 V_w^3$$

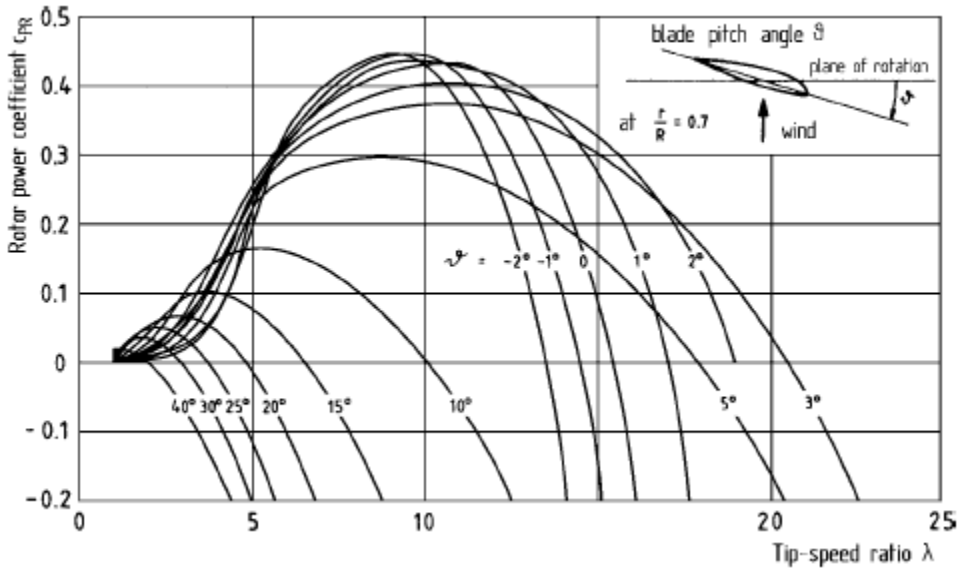
όπου,

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

Ο αεροδυναμικός αυτός συντελεστής υπόκειται σε κάποιους θεωρητικούς περιορισμούς, σύμφωνα με το νόμο του Betz ο οποίος δείχνει ως μέγιστη τιμή το 0.593. Επίσης οι τιμές του δε μένουν σταθερές αλλά μεταβάλλονται ανάλογα με τις τιμές του ανέμου, την ακτίνα της φτερωτής και τις στροφές γεννήτριας σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

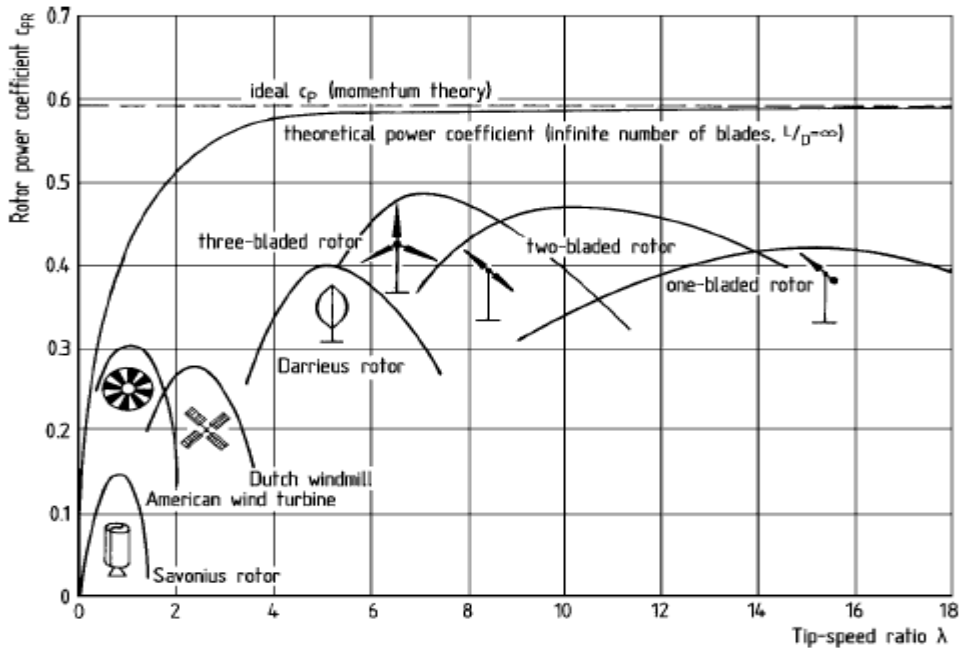
$$\lambda = \omega \frac{R_{turb}}{V_w}$$

όπου ω η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας. Το κλάσμα αυτό αναφέρεται ως λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου και ο αεροδυναμικός συντελεστής είναι άμεση συνάρτηση του λόγου αυτού. Παρακάτω παρατίθενται οι μεταβολές του αεροδυναμικού συντελεστή σε σχέση με το λ και το βήμα πτερυγίου θ, που είναι αεροδυναμική κατασκευαστική παράμετρος που επηρεάζει τη συμπεριφορά των πτερυγίων κατά την πρόσπτωση ανέμου πάνω τους.



Σχήμα 1.1 : Η μεταβολή του αεροδυναμικού συντελεστή σε σχέση με το λόγο ακροπτερυγίου και τη γωνία βήματος πτερυγίου

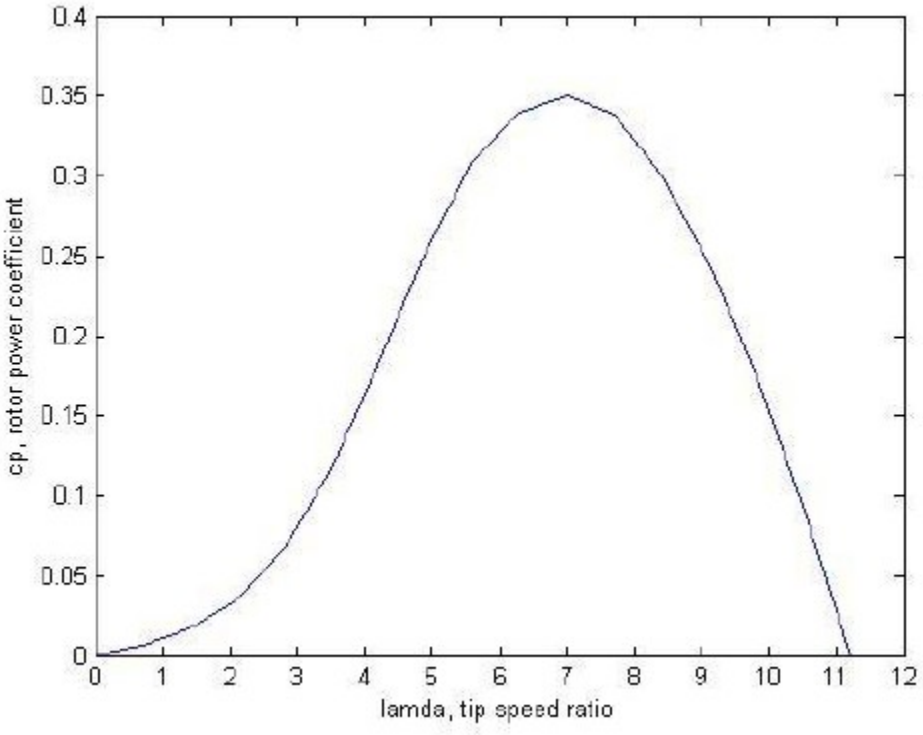
Οι καμπύλες αυτές εξαρτώνται κυρίως απο κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της φτερωτής [1] και κυρίως με τον αριθμό των φτερών, το μήκος της χορδής κατά μήκος του φτερού, τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά και την κατανομή της γωνίας θ. Συνοψίζοντας σχηματικά έχουμε :



Σχήμα 1.2 : Καμπύλες Cp – λ για διάφορους τύπους φτερωτών

Για την περίπτωση της ανεμογεννήτριας στο εργαστήριο και τις συνθήκες που διεξήχθη η παρούσα

έρευνα υπάρχουν απο μεριάς του κατασκευαστή τιμές για το Cp και το λ [10], οι οποίες προέκυψαν μετά απο μετρήσεις και η μεταξύ τους σχέση προσεγίζεται με ένα πολυώνυμο δεκάτου βαθμού όπως φαίνεται απο την παρακάτω γραφική παράσταση καθώς και την σχέση που παρατίθεται :



Σχήμα 1.3 : Η καμπύλη Cp – λ την οποία και θα χρησιμοποιήσουμε κατά την έρευνα μας

Η σχέση μεταξύ Cp και λ είναι η εξής :

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

όπου:

p1 = -2.2042e-008, p2 = 1.1712e-006, p3 = -2.5915e-005, p4 = 0.00030705
p5 = -0.0020796, p6 = 0.0079564, p7 = -0.016329, p8 = 0.018201, p9 = -0.0064757
p10 = 0.0092843, p11 = 3.2532e-005

Απο τα παραπάνω προκύπτει ότι ο βέλτιστος λόγος ακροπτερυγίου είναι 7 και ο αντίστοιχος αεροδυναμικός συντελεστής είναι 0.35 .

1.2.2 Κατανομή ανέμου

Όπως έχει αναφερθεί αυτό που μας ενδιαφέρει περισσότερο όταν εξετάζουμε μια ανεμογεννήτρια είναι η ενεργειακή της απόδοση, το μέγεθος δηλαδή εκείνο που μας δίνει μια εικόνα της παραγωγής ενέργειας σε διάστημα ενός έτους. Είναι προφανές ότι απο τη στιγμή που ο άνεμος δε μπορεί να είναι σταθερός σε διάστημα ενός έτους συνεχόμενα και η μηχανική ισχύς στην είσοδο της γεννήτριας δε θα

είναι σταθερή, μιας και αλλάζει τόσο το Cp όσο και το λ. Επομένως για να ξεπεράσουμε το στοχαστικό αυτής της κατάστασης θα χρησιμοποιήσουμε μια κατανομή ανέμου. Έτσι σύμφωνα με τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Weibull [2] η κατανομή του ανέμου σε μία θέση περιγράφεται απο την εξής σχέση :

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

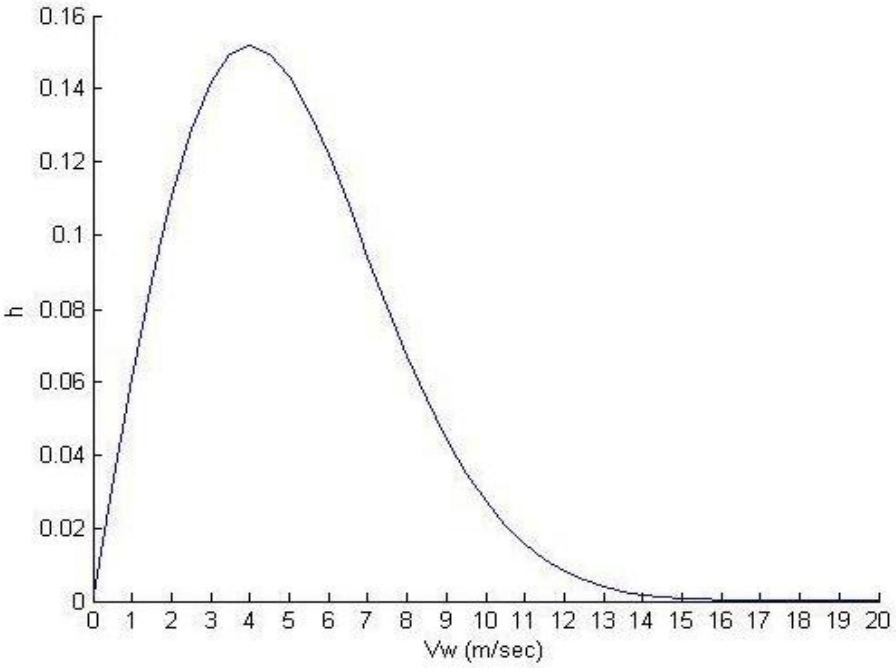
όπου k η παράμετρος μορφής και c η παράμετρος κλίμακας. Για την περιοχή της ελλάδας έχουμε k=1.5-2 και για την τιμή 2 έχουμε τη κατανομή Rayleigh :

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

με τη σειρά του το c καθορίζει τη μέση τιμή ανέμου για συγκεκριμένη θέση. Οπότε για την ανωτέρω κατανομή θα έχω για την τελική κατανομή ανέμου την εξής σχέση :

$$h(Vw) = \frac{1.57\mathrm{Vw}}{(\bar{Vw})^{2}} \mathrm{e}^{-0.875\left(\frac{Vw}{\bar{Vw}}\right)^{2}}$$

Στην παρούσα έρευνα θεωρούμε ότι η μέση τιμή ανέμου είναι τα 5 m/sec οπότε έχουμε και την παρακάτω μορφή της κατανομής :



Σχήμα 1.4 : Κατανομή ανέμου σύμφωμα με Rayleigh και μέση τιμή τα 5 m/sec

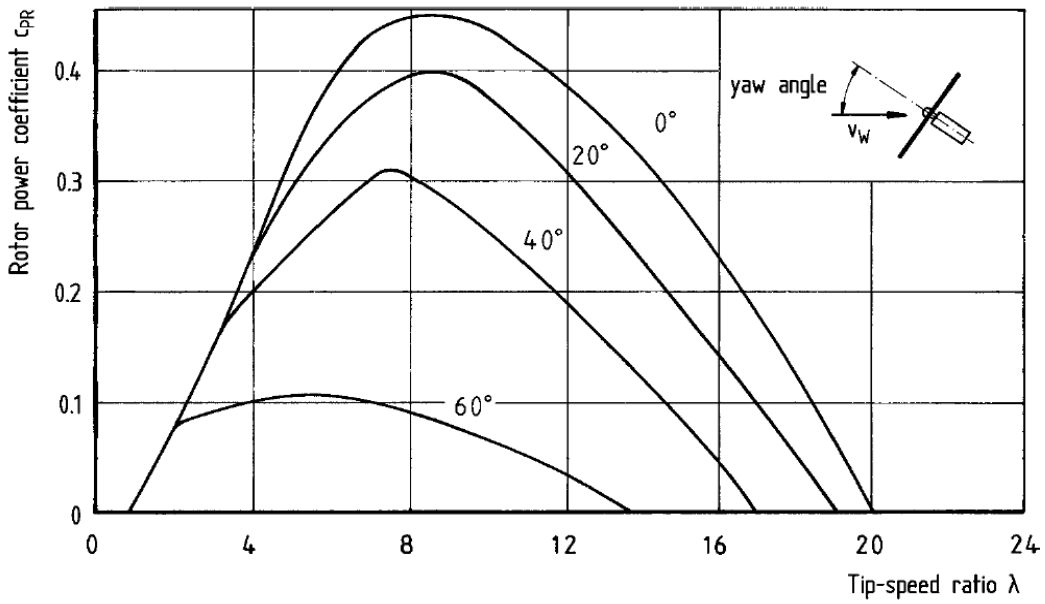
Τα παραπάνω θα αξιοποιηθούν στη συνέχεια στο κομμάτι της έρευνας που αφορά την ενεργειακή απόδοση της ανεμογεννήτριας, όπου όπως θα παρατηρήσουμε παίζει αρκετά σημαντικό ρόλο τόσο η κατανομή του ανέμου αλλά και η σχέση Cp και λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου.

1.2.3 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 έχουν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες τιμές ρευμάτων και επομένως είναι άμεσα ορατός ο κίνδυνος υπερθέρμανσης των τυλιγμάτων. Σημαντικό επίσης είναι το γεγονός ότι και τα ίδια τα φτερά υπάρχει περιπτωση να μην αντέξουν στις καταπονήσεις που επιφέρουν μεγαλύτερες τιμές ανέμου απο τις ονομαστικές.

Σε εφαρμογές και κατασκευές μεγάλου κόστους αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την αλλαγή της γωνίας βήματος θ, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του εμβαδού της φτερωτής, άρα και της επιφάνειας που "βλέπει" ο άνεμος, άρα και την ισχύ. Η τεχνική αυτή ονομάζεται pitch control και επιτυγχάνει τη διατήρηση της ανεμογεννήτριας σε ονομαστικά μεγέθη ακόμα και για αρκετά μεγαλύτερες τιμές ανέμου απο τις ονομαστικές.

Επειδή όμως κάτι τέτοιο είναι οικονομικά ασύμφορο για εφαρμογές χαμηλού κόστους, η τεχνική η οποία χρησιμοποιείται είναι αυτή του furling. Εν ολίγοις το σύστημα αυτό απομακρύνει την ανεμογεννήτρια απο το μέτωπο του ανέμου με αποτέλεσμα να μειώνεται η ισχύς του ανέμου και επομένως να επιτυγχάνεται και έλεγχος ισχύος της γεννήτριας. Ουσιαστικά αποτελείται απο μία ουρά η οποία ανάλογα με τη διεύθυνση του ανέμου και αξιοποιώντας χαρακτηριστικά όπως το βάρος και η κατασκευή της απομακρύνει την φτερωτή απο το μέτωπο του ανέμου κατά μια γωνία, η οποία ονομάζεται γωνία yaw. Έτσι έχουμε την παρακάτω γραφική απεικόνιση του εν λόγω φαινομένου :



Σχήμα 1.5 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. Ως γνωστόν ο αεροδυναμικός συντελεστής προσδιορίζει το βαθμό απορρόφησης της ισχύος απο την ανεμογεννήτρια οπότε, μεταβάλλοντας τον αεροδυναμικό συντελεστή επιτυγχάνεται και έλεγχος της ισχύος. Είναι γενογός όμως ότι ο ακριβής τρόπος λειτουργίας του συστήματος furling δεν είναι προσδιορισμένος και επομένως και οι ανάλογες μετρήσεις περιορίζονται ως προς την ακρίβεια τους.

Κεφάλαιο 2 : Σύνδεση ανεμογεννητριών

Στο παρόν κεφάλαιο θα εξεταστούν οι τρόποι σύνδεσης μιας ανεμογεννήτριας οι οποίες είναι οι AC και η DC .

2.1 Μικροδίκτυα

2.1.1 Πληροφορίες πάνω στα μικροδίκτυα, παρουσίαση πλεονεκτημάτων καθώς και μειονεκτημάτων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην εισαγωγή το συγκεντρωτικό μοντέλο παραγωγής ενέργειας, δηλαδή τεράστιες μονάδες παραγωγής, οι οποίες είναι επιφορτισμένες με τη διανομή ενέργειας σε μεγάλες συνήθως αποστάσεις και οι οποίες στην πλειοψηφία τους αποτελούνται απο συμβατικές μορφές καυσίμων παρουσιάζουν αρκετά προβλήματα κάποια απο τα οποία είναι τα παρακάτω [3] :

1. Οι μεγάλες αποστάσεις διανομής έχουν ως φυσικό επακόλουθο απώλειες κατά τη μεταφορά, αλλά και αυξημένο κόστος για τη δημιουργία ενός τόσο μεγάλου δικτύου.

2. Περιβαλλοντικά προβλήματα λόγω καύσης ορυκτών καυσίμων τα οποία ούτε ανεξάντλητα είναι αλλά ούτε και ιδιαίτερα φιλικά προς το φυσικό περιβάλλον.

3. Κοινωνικά προβλήματα καθώς η ουσιαστική απαγόρευση των διεσπαρμένων κοινοτήτων να έχουν λόγο πάνω τόσο στον τρόπο αλλά και στο κόστος της ενέργειας που παράγουν – καταναλώνουν έχει ως αποτέλεσμα πρώτον τη μή ορθολογική παραγωγή και κατανάλωση αλλά και τή μή διάχυση της γνώσης, των εργαλείων και των μεθόδων που είναι ουσιώδη για την επιβίωση και την πρόοδο των ανθρώπινων και όχι μόνο κοινωνιών.

Μία λύση τουλάχιστον σε τεχνικό επίπεδο μπορεί να είναι η ανάπτυξη και η οργάνωση της παραγωγής σε μικροδίκτυα,τα οποία οδηγούν σε διεσπαρμένη παραγωγή δηλαδή σε μοντέλο παραγωγής που αποτελείται απο μικρούς σταθμούς κοντά στα φορτία και αποτελούνται συνήθως απο 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 φυσικά αξιοποιούνται όλες οι δυνατότητες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας.

Έτσι τα μικροδίκτυα μπορεί να περιλαμβάνουν ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά, μικρά υδροηλεκτρικά, κυψέλες καυσίμου, γεννήτριες Diesel και πολλά άλλα. Ακόμα περιλαμβάνουν μονάδες αποθήκευσης όπως συσσωρευτές και σφονδύλους. Μπορούν να λειτουργήσουν είτε αυτόνομα είτε να επικοινωνούν 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 είναι αυτό που καθορίζει τα παραπάνω επίπεδα ανάλογα με τις ενεργειακές ανάγκες.

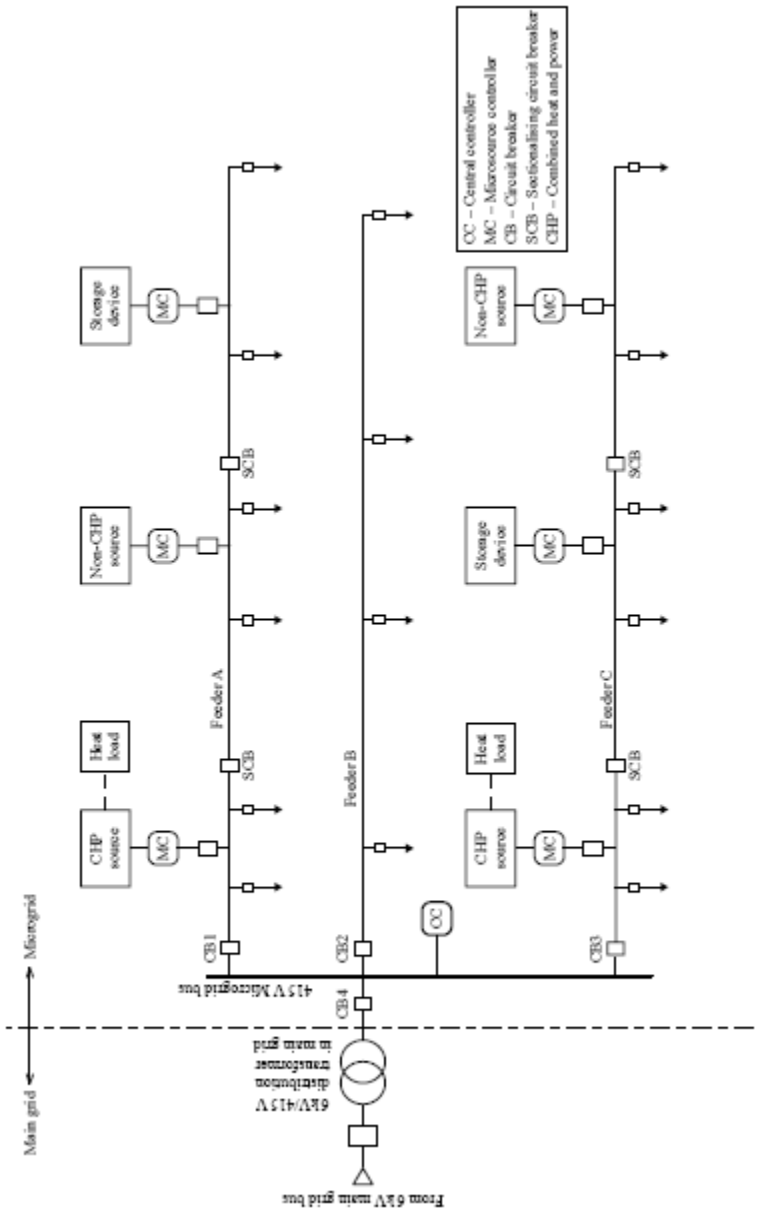
2.1.2 Διάταξη Μικροδικτύου

Μία τυπική διάταξη μικροδικτύου περιλαμβάνει φορτία και μικροπηγές που συνδέονται μέσω ενώς Low Voltage δικτύου,για τάσεις μικότερες του 1kV. Τα φορτία καθώς και οι πηγές τοποθετούνται κοντά μεταξύ τους για να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες κατά τη διανομή. Στο σχήμα 2.1 φαίνεται μια τυπική διάταξη μικροδικτύου που αποτελείται απο 3 κλάδους A,B,C ,οι οποίοι ονομάζονται feeders και αξιοποιούνται κατά την τροφοδοσία. Περιλαμβάνει ακόμα δύο μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (CPH) και δύο μονάδες όπου δεν γίνεται συμπαραγωγή. Οι μικροπηγές καθώς και τα μέσα αποθήκευσης συνδέονται στους κλάδους A και C μέσω ελεγκτών (microsource controllers – MC). Απο τα φορτία κάποια θεωρούνται ότι απαιτούν συνεχή τροφοδοσία και επομένως έχουν προτεραιότητα και κάποια όχι.

Μέσω διακοπτών και πιο συγκεκριμένα μέχω του διακόπτη CB4 το μικροδίκτυο συνδέεται με το δίκτυο μέσης τάσης στο σημειο 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) και φυσικά απομονωμένη λειτουργία (stand-alone). Στην πρώτη κατάσταση το μικροδίκτυο παραμένει ολικώς η 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 την αποτελεσματική διαχείριση των διακοπτών CB1-CB4.

Η λειτουργία και η διαχείριση του μικροδικτύου γίνεται μέσω των MC's καθώς και του κεντρικού ελεγκτή (Central Controller – CC) :



Σχήμα 2.1 Διάταξη ενός τυπικού μικροδικτύου

Ελεγκτής Μικροπηγών : Είναι επιφορτισμένος με τον αυτόνομο έλεγχο της ροής ισχύος, χωρίς δηλαδή τη διαμεσολάβηση του CC, καθώς και της τάσης εξόδου των πηγών σε περιπτώσεις ανωμαλίας ή μεταβολής φορτίου στο μικροδίκτυο. Λοιπές λειτουργίες του είναι ο οικονομικότερος προγραμματισμός της παραγωγής, ο έλεγχος των φορτίων και των μέσων αποθήκευσης. Τέλος εξασφαλίζει ότι κάθε πηγή θα παράγει την σχύ εκείνη που απαιτείται στην περίπτωση απομονωμένης λειτουργίας και ότι θα επανέρχεται σε λειτουργίας σύνδεσης στο δίκτυο όταν απαιτείται.

Κεντρικός ελεγκτής (CC) : Είναι υπεύθυνος για το συνολικό έλεγχο και την προστασία του

μικροδικτύου. Κάποιοι απο 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 καθώς και η βέλτιστη ενεργειακή απόδοση του μικροδικτύου. Τέλος 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 στην ενεργό και άεργο ισχύ, την τάση και τη συχνότητα, τα οποία με τη σειρά τους καθορίζονται απο τις λειτουργικές ανάγκες του μικροδικτύου. Ο ενεργειακός αυτός έλεγχος οφείλει να εξασφαλίζει :

- Ότι οι μικροπηγές τροφοδοτούν ικανοποιητικά τα θερμικά και ηλεκτρικά φορτία.
- Ότι το μικροδίκτυο λειτουργεί ικανοποιητικά ως προς τις απαιτήσεις που θέτει το κεντρικό δίκτυο.
- Ότι το μικροδίκτυο όντως θα μειώνει τις απώλειες του συστήματος καθώς και τις εκπομπές ρύπων.
- Ότι 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 απο την αλλαγή της λειτουργίας απο 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 εξσφαλιστεί 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. Άν 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 απο τις μικροπηγές και φορτία.
- Εκτέλεση εκτίμησης της κατάστασης καθώς και του επιπέδου ασφαλείας, οικονομικός προγραμματισμός της παραγωγής καθώς και έλεγχος ενεργού και αέργου ισχύος των μικροπηγών. Τέλος εξάγει συναρτήσεις για τη ζήτηση των φορτίων, αξιοποιώντας τις πληροφορίες που χει συλλέξει.
- Διασφάλιση της συγχρονισμένης με το κεντρικό δίκτυο λειτουργίας.

Οι λειτουργίες του για απομονωμένη λειτουργία είναι :

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

2.2 Σύνδεση Ανεμογεννητριών

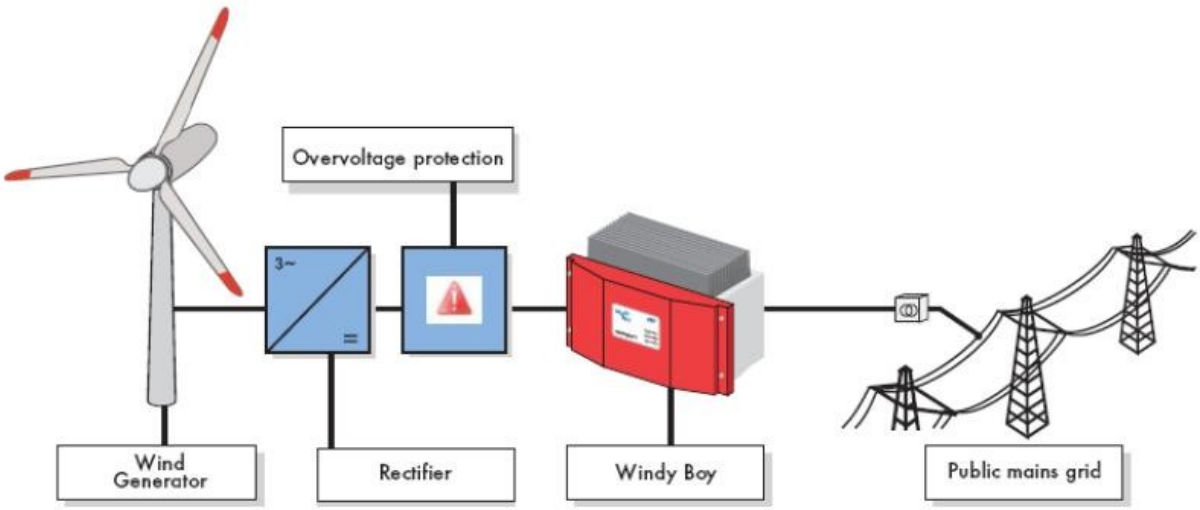
Οι πιο συχνά εμφανιζόμενες πηγές σε ένα μικροδίκτυο είναι τα φωτοβολταϊκά και οι μικρές ανεμογεννήτριες. Η σύνδεση των πηγών μπορεί να γίνει στο ζυγό AC του μικροδικτύου (εναλλακτικά στο ζυγό χαμηλής τάσης του δικτύου) ή σε ένα ζυγό DC που περιλαμβάνει μέσα αποθήκευσης. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα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

2.2.1 Η 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 αλλά και άλλα όπως είναι αυτά που περιγράφονται στη συνέχεια :

2.2.1.1 Δομή της AC σύνδεσης

Το παρακάτω σχήμα περιγράφει την γενική δομή μιας AC σύνδεσης :



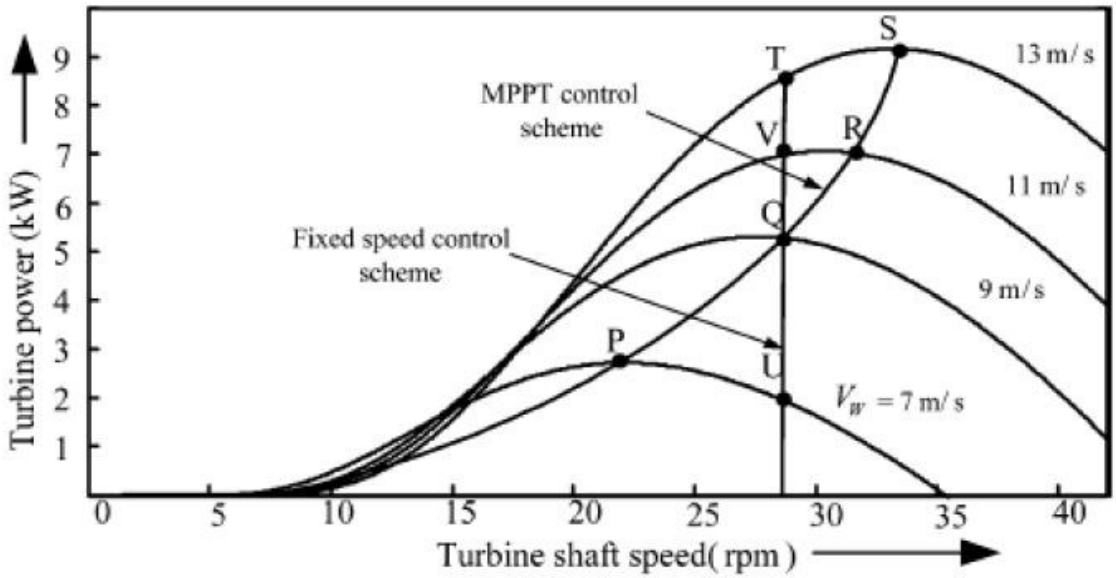
Σχήμα 2.2 Η γενική δομή μιας AC σύνδεσης

Η έξοδος της γεννήτριας μας, που είναι σύγχρονη τριφασική αρχικά ανορθώνεται μέσω μιας μή ελεγχόμενης ανόρθωσης ενώ στη συνέχεια περνά απο ένα μονοφασικό αντιστροφέα όπου εκεί εκτελείται η λειτουργία MPPT η οποία αναλύεται παρακάτω. Τέλος αφού η έξοδος γίνει πάλι AC, όλο το σύστημα ξανασυνδέεται στο δίκτυο.

Η προστασία υπέρτασης που φαίνεται στο σχήμα συνοδεύει τον ανορθωτή και προστατεύει τον αντιστροφέα υπερτάσεις αλλά και την φτερωτή απο ανάπτυξη μεγάλων επιταχύνσεων. Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου, η ΗΕΔ της γεννήτριας και επομένως και η τάση που βλέπει ο ανορθωτής που χρειάζεται προστασία, αυξάνεται. Έτσι όταν φυσήξει πάνω απο τα ονομαστικά και πρίν προλάβει να επενεργήσει το σύστημα Furling, η γεννήτρια θα δώσει ισχύ στην προστασία υπέρτασης, που πλέον λειτουργεί σαν απορριπτικό φορτίο, και κατ' αυτόν τον τρόπο θα περάσουν μεγαλύτερα ρεύματα απο το τύλιγμα της με αποτέλεσμα να επιβραδυνθει, αυξάνοντας την ηλεκτρομαγνητική ροπή. Ουσιαστικά πρόκειται για σταδιακή βραχυκύκλωση της γεννήτριας με σταδιακή αφαίρεση αντιστάσεων [4], που ειδικά στις μικρές γεννήτριες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το φρενάρισμα τους, έχει ως συνέπεια όμως την έντονη φθορά τους. Τέλος αν για κάποιο λόγο χαθεί το δίκτυο που τροφοδοτεί η γεννήτρια τότε όλη η ισχύς παρέχεται στο απορριπτικό φορτίο [5].

2.2.1.2 Λειτουργία μεγιστοποίησης αποδιδόμενης ισχύος (MPPT)

Λαμβάνοντας υπ'όψιν την καμπύλη Cp-λ που έχει αναπτυχθεί και σχολιαστεί παραπάνω, μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε ότι ο αεροδυναμικός συντελεστής μεγιστοποιείται για συγκεκριμένες τιμές του λ. Συνεπώς για τις τιμές αυτές θα έχουμε και μέγιστη παραγόμενη ισχύ απο την γεννήτρια. Αν λοιπόν σχεδιάσουμε το 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 λ όσο και το Cp παραμένουν στις μέγιστες τιμές τους και επομένως έχουμε μέγιστη ενέργεια και ισχύ.



Σχήμα 2.3 Οι καμπύλες ανέμου και η καμπύλη MPPT

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

Δύο απο τους τρόπους με τους οποίους επιτυγχάνεται η λειτουργία MPPT είναι οι παρακάτω [6] :

- **Επαναληπτική μέθοδος**

Στην 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 επόμενου βήματος. Αν είναι μεγαλύτερη απο την επιθυμητή μεταβάλλεται το φορτίο. Αν είναι μικρότερη απο την επιθυμητή, τότε πάλι έχουμε μεταβολή του φορτίου με σκοπό να πετύχουμε τη μέγιστη τιμή. Η μέθοδος αυτή αν και αποτελεσματική, στην περίπτωση των ανεμογεννητριών όπου έχουμε πολλές και συχνές μεταβολές των τιμών του ανέμου, είναι προφανές ότι θα έχουμε καθυστερήσεις. Βελτιώσεις αυτής της μεθόδου αναφέρουν ότι οι αποκλίσεις του φορτίου θα πρέπει να είναι μεγάλες όταν έχουμε μεγάλες αποκλίσεις απο τις βέλτιστες τιμές και ομοίως για τις μικρές μεταβολές. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα πιο γρήγορη σύγκλιση της μεθόδου

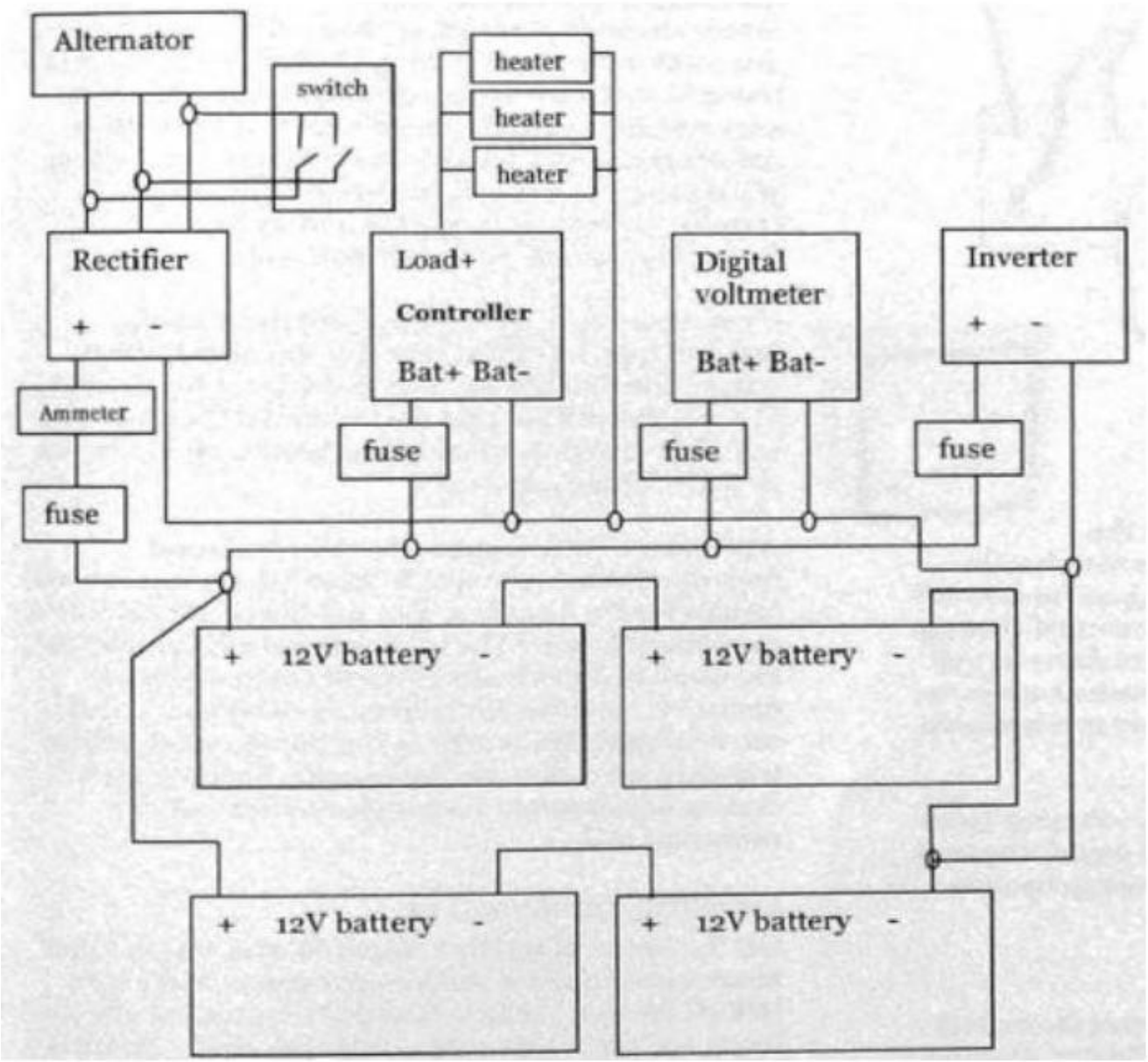
- **Πίνακας ή εξίσωση βέλτιστων φορτίων για κάθε τιμή ανέμου**

Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην ύπαρξη έτοιμων πινάκων ή εξισώσεων, επομένως για κάθε τιμή του ανέμου που μπορεί πολύ εύκολα να μετρηθεί με τη βοήθεια ενός ανεμόπτερου, υπολογίζεται το κατάλληλο φορτίο. Προτιμάται λόγω ταχύτητας και έλλειψης καθυστερήσεων κατά τη υλοποίηση της.

2.2.2 Η DC σύνδεση

Έχει ήδη αναφερθεί ότι στην περίπτωση μιας κατοικίας ή γενικά μίας αυτόνομης εγκατάστασης, προτιμάται η DC σύνδεση καθώς απο τη μία 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. Σύμφωνα με το [7] η DC σύνδεση έχει ως εξής :

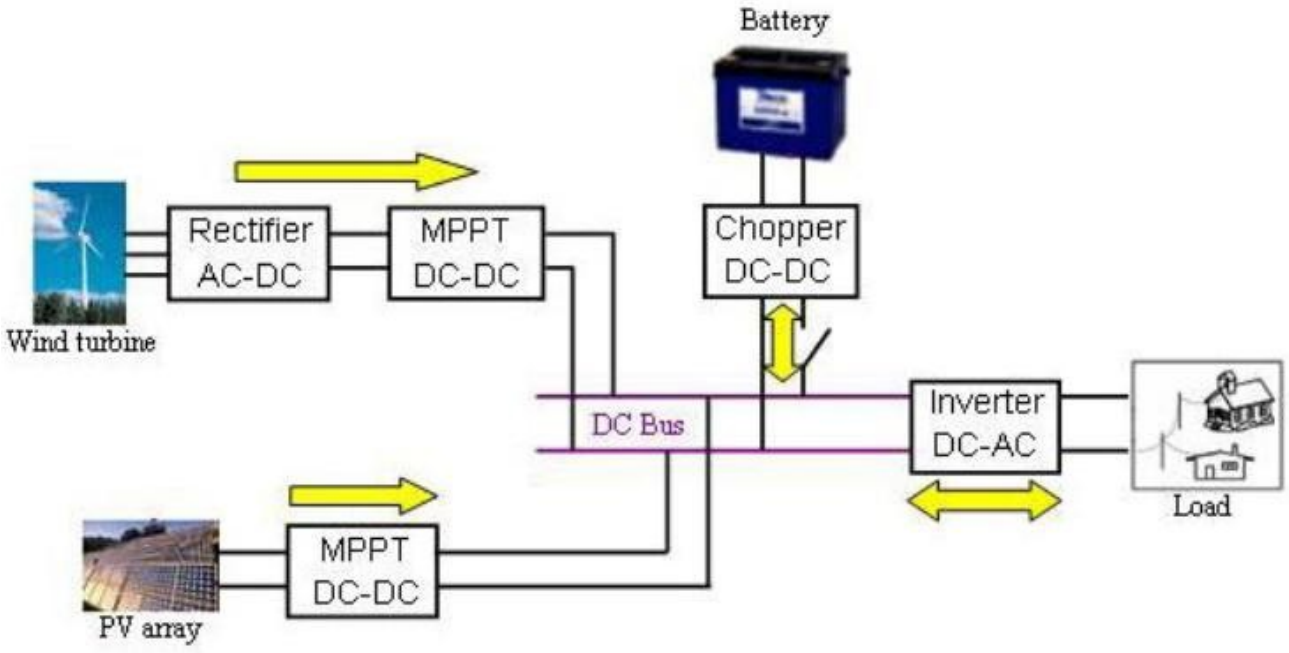
Όλες οι πηγές συνδέονται άμεσα στον DC ζυγό συσσωρευτών, η τάση των οποίων αντιστρέφεται και λαμβάνει την κατάλληλη τιμή (τάση – συχνότητα) μέσω ενός αντιστροφέα πηγής τάσης. Εν συνεχεία ο αντιστροφέας αυτός τροφοδοτεί φορτίο. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται μια τυπική σύνδεση DC :



Σχήμα 2.4 Σύνδεση ανεμογεννήτριας σε σύστημα DC με συσσωρευτές

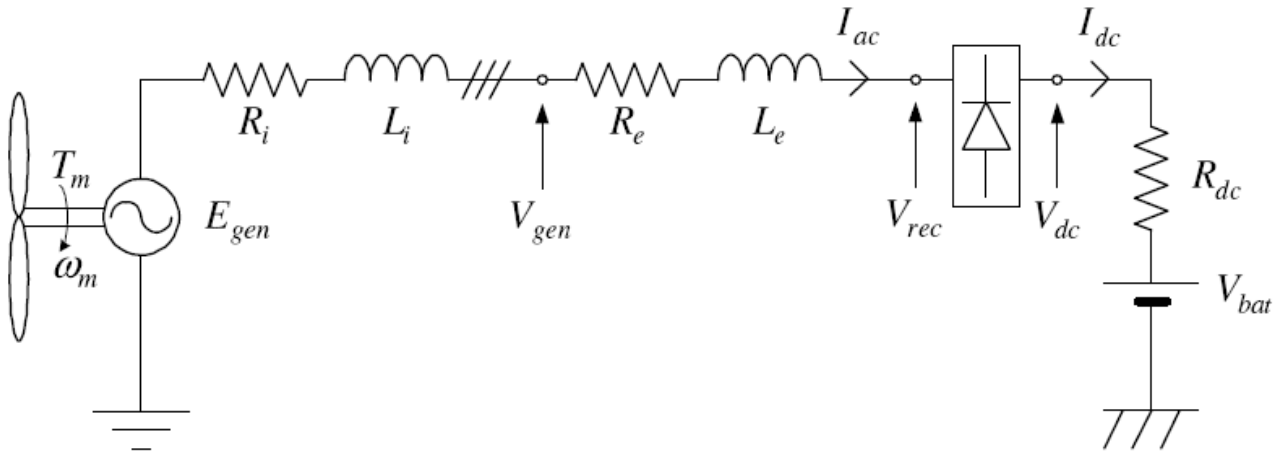
Η έξοδος της γεννήτριας ανορθώνεται με βοήθεια ενός τριφασικού ανορθωτή γέφυρας. Επομένως πλέον η γεννήτρια μπορεί να συνδεθεί στις μπαταρίες. Ένας διπολικός διακόπτης παρεμβάλλεται μεταξύ γεννήτριας και ανορθωτή και στόχο έχει τη βραχυκύκλωση της γεννήτριας ώστε αυτή να μη περιστρέφεται σε περιπτώσεις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

Η σύνδεση απευθείας σε συσσωρευτές έχει το χαρακτηριστικό ότι η τάση της γεννήτριας παραμένει σταθερή και ίση περίπου με αυτή των συσσωρευτών. Επομένως δε μπορεί να ρυθμιστεί διαρκώς με σκοπό να έχουμε τη μέγιστη παραγόμενη ισχύ. Κατ' αυτόν τον τρόπο λοιπόν δικαιολογείται και η έλλειψη συστήματος MPPT. Για να επιλυθεί το παραπάνω πρόβλημα αξιοποείται 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 Cp και λ. Μία τέτοια υλοποίηση φαίνεται παρακάτω :



Σχήμα 2.5 Σύστημα ανεμογεννήτριας και φωτοβολταϊκού σε DC σύνδεση με δυνατότητα MPPT

2.2.2.1 Μοντέλο AC ανάλυσης – Σύστημα συνδεδεμένο απευθείας σε μπαταρίες



Σχήμα 2.6 Ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας σε απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα σε αυτό το μοντέλο ανάλυσης η ανεμογεννήτρια συνδέεται μέσω καλωδίου στον ανορθωτή ο οποίος τροφοδοτεί τις μπαταρίες, οι οποίες μπορούν να παρασταθούν απο μία DC τάση και την εσωτερική τους αντίσταση [8].

Για την παραπάνω διάταξη ισχύουν τα εξής:

R_i - η εσωτερική αντίσταση μία φάσης της γεννήτριας, ισχύει επομένως $R_i = q R_c$.
L_i - η αυτεπαγωγή μίας φάσης του τυλίγματος.
R_{cc} και L_{cc} - η αντίσταση και η αυτεπαγωγή του καλωδίου μέσω του οποίου συνδέεται η γεννήτρια με τον ανορθωτή.
R_{bat} και V_{bat} - η εσωτερική αντίσταση και η τάση των συσσωρευτών.

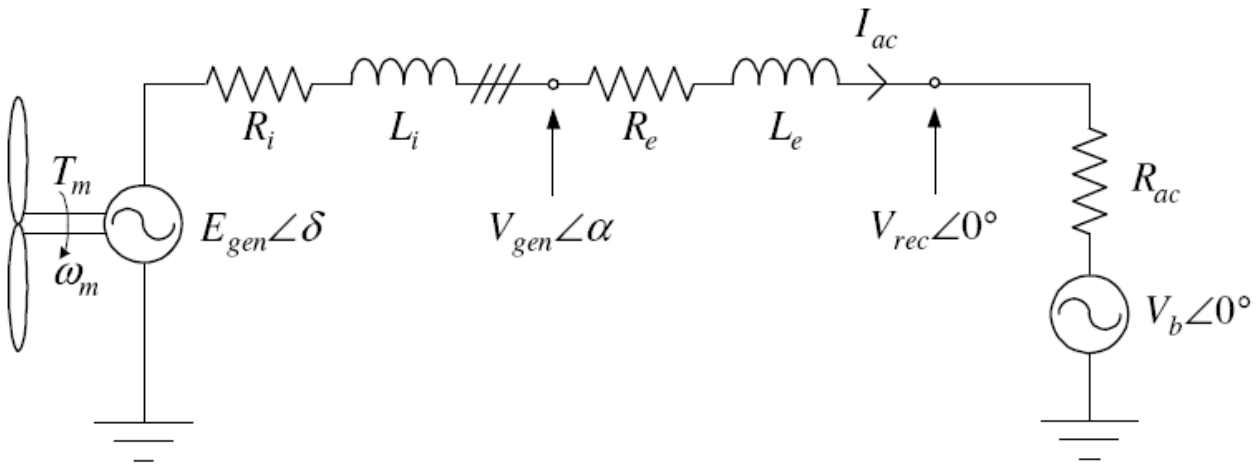
Για να συμπεριλάβουμε την πτώση τάσης στις διόδους του ανορθωτή,αντικαθιστούμε το σύστημα μπαταρία – ανορθωτής απο μία ισοδύναμη πηγή V_b και μία αντίσταση R_{ac} για τα οποία ισχύει :

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

$$R_{ac} = \frac{(6R_{bat})}{\Pi}$$

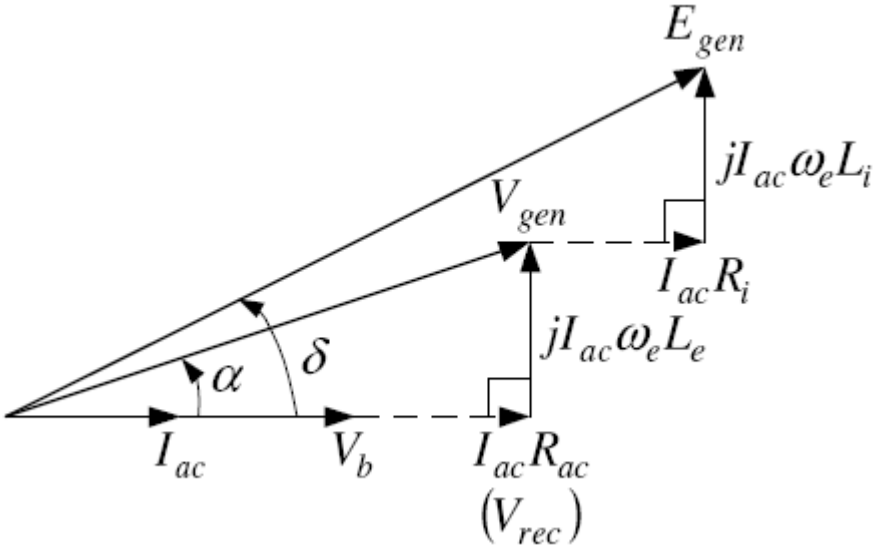
Ο συντελεστής ισχύος στην είσοδο του ανορθωτή είναι μοναδιαίος και επομένως και η τάση που

βλέπει το σύστημα μπαταρία – ανορθωτής έχει γωνία 0^0 . Το σύστημα θεωρείται ωμικό πέραν των στοιχείων αυτεπαγωγής στα καλώδια και στο τύλιγμα της γεννήτριας. Συνεπώς στην τερματική τόσο στην τερματική τάση V_{gen} αλλά και στην ΗΕΔ της γεννήτριας θα έχουμε καθυστέρηση με γωνίες α και δ αντίστοιχα. Το παρακάτω ισοδύναμο AC κύκλωμα απεικονίζεται παρακάτω :



Σχήμα 2.7 Ισοδύναμο AC κύλωμα για απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές

Το διανυσματικό διάγραμμα που προκύπτει απο την παραπάνω ανάλυση είναι το παρακάτω :



Σχήμα 2.8 Διανυσματικό διάγραμμα του παραπάνω συστήματος

Η ανάλυση του παραπάνω συστήματος θα γίνει ως εξής : Οι στροφές της γεννήτριας μεταβάλλονται μέχρι τις ονομαστικές. Σε κάθε βήμα υπολογίζουμε τη συχνότητα, τη γωνιακή ταχύτητα και την ΗΕΔ της γεννήτριας. Προφανώς η ισχύς αρχίζει να ρέει στο σύστημα μόνο όταν η ΗΕΔ ξεπεράσει την ισοδύναμη ταση μπαταρίας – ανορθωτή V_b . Μέχρι εκείνη τη στιγμή ουσιαστικά λειτουργεί ανοιχτοκυκλωμένη και βλέπει το σύστημα στην είσοδο του μόνο την ΗΕΔ της γεννήτριας. Οι στροφές στις οποίες η ΗΕΔ ξεπερνάει την V_b ονομάζονται n_{cutin} . Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η τάση της μπαταρίας παίζει καθοριστικό ρόλο στις στροφές στις οποίες μπαίνει στο σύστημα η γεννήτρια. Σε προηγούμενες καταστάσεις απλά δε ρέει ρεύμα και επομένως δεν αποδίδεται και ισχύς.

Μετά την είσοδο της γεννήτριας στο σύστημα και μετά απο κυκλωματική ανάλυση προκύπτει ότι το το ρεύμα που ρέει είναι συμφασικό με την τάση στα άκρα του συστήματος μπαταρία – ανορθωτής. Οι R_s και L_s περιλαμβάνουν τα στοιχεία εκείνα που μπορεί να συνδεθούν σε σειρά απο τη γεννήτρια μέχρι τον ανορθωτή. Επομένως θα έχουμε :

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

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

Επομένως με λύση του τριωνύμου θα έχουμε :

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

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

Και απο το διανυσματικό διάγραμμα μπορούμε να υπολογίσουμε πλέον και τη γωνία δ :

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

Η τάση καθώς και η ισχύς που βλέπει το σύστημα ανορθωτής – μπαταρία στην είσοδο του θα είναι :

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

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

Ενώ σε DC μεγέθη, το DC ρεύμα του συστήματος, η τάση και η ισχύς θα είναι :

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

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

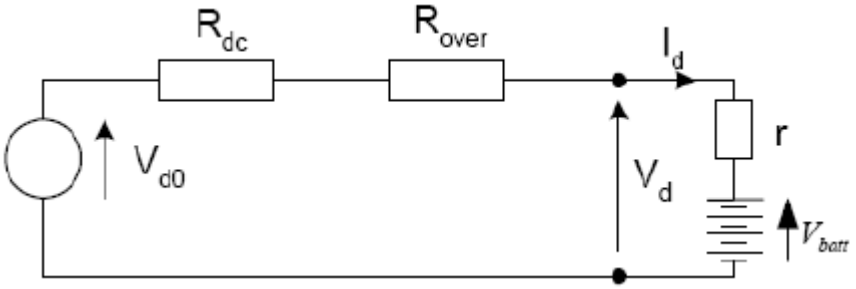
$$P_{dc} = V_{dc}I_{dc}$$

Τέλος, μπορούν να υπολογιστούν και οι απώλειες στον αντιστροφέα απο τη σχέση :

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

2.2.2.2 Μοντέλο DC ανάλυσης – Σύνδεση απευθείας σε μπαταρίες

Η DC ανάλυση [9] αν και αρκετά πιό απλή, δε λαμβάνει υπ'όψιν την πτώση τάσης στις διόδους, κάτι το οποίο αλλοιώνει το τελικό αποτέλεσμα. Βέβαια όσο μεγαλώνει η τάση των μπαταριών η επίδραση αυτής της πτώσης μειώνεται με αποτέλεσμα η ανάλυση να γίνεται και πιό έγκυρη. Για συστήματα 48V η επίδραση αυτή είναι αισθητή. Το παρακάτω σχήμα περιγράφει το μοντέλο της DC ανάλυσης.



Σχήμα 2.9 Απλοποιημένο ισοδύναμο DC γεννήτριας – ανορθωτή - συσσωρευτών

Σύμφωνα με τα παραπάνω έχουμε :

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

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

Και η ανορθωμενη ΗΕΔ της γεννήτριας είναι :

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

Ενώ το DC ρεύμα και η τάση ακροδεκτών της μπαταρίας υπολογίζονται ώς εξής :

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

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

Λόγω του γεγονότος ότι ο ανορθωτής δε μπορεί να μοντελοποιηθεί με το εν λόγω μοντέλο, δεν επιλέγεται στη συνέχεια σε αντίθεση με το AC μοντέλο.

Κεφάλαιο 3 : Ενεργειακή απόδοση ανεμογεννήτριας

3.1 Υπολογισμός της ενεργειακής απόδοσης

Η ενεργειακή απόδοση 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 απο τα ονομαστικά μεγέθη της.

Συνδέεται άμεσα βέβαια με τα ονομαστικά της μεγέθη καθώς και την απόδοσης της, αλλά επιπλέον σχετίζεται και με την κατανομή του ανέμου στην περιοχή που θα τοποθετηθεί. Η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας περιγράφει αυτή ακριβώς τη μεταβολή της ισχύος εξόδου της ανεμογεννήτριας σε σχέση με την ταχύτητα ανέμου και σε σχέση με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά χαρακτηριστικά της αλλά και τον τρόπο σύνδεσης της. Επομένως η εν λόγω καμπύλη θα είναι διαφορετική για απευθείας σύνδεση σε μπαταρίες και διαφορετική για σύνδεση με λειτουργία MPPT κλπ. Συνεπώς αναλόγως θα αλλάζει και η ενεργειακή της απόδοση.

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει τόσο την απόδοσης της ανεμογεννήτριας αλλά και το κόστος κατασκευής της είναι το εύρος ανέμου στην περιοχή όπου τοποθετείται. Σε γενικές γραμμές σε περιοχές όπου οι μέσες τιμές ανέμου είναι χαμηλές, πρέπει η γεννήτρια να έχει πολύ καλή συμπεριφορά γύρω απο αυτές τις τιμές. Για παράδειγμα για μέση τιμή ανέμου 5m/sec μια ανεμογεννήτρια που εργάζεται σε εύρος 3 – 10 m/sec, θα έχει καλύτερη ενεργειακή απόδοση απο μία αντίστοιχη που εργάζεται σε εύρος 4 – 11 m/sec, αν και η τελευταία θα έχει μικρότερη φτερωτή λόγω μεγαλύτερης τιμής ονομαστικού ανέμου, άρα και μικρότερο κόστος κατασκευής.

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

$$E = T \int_0^\infty h(V_w) P(V_w) dV_w$$

Στη συνέχεια του κεφαλαίου και με βάση την παραπάνω σχέση θα μελετηθεί η ενεργειακή απόδοση μιας ανεμογεννήτριας ονομαστικής ισχύος 850W για διάφορους τύπους συνδέσεων.

3.2 Η DC σύνδεση

Στην αρχή θα γίνει μία σύντομη παρουσίαση της ανεμογεννήτριας των 850W και στη συνέχεια θα γίνει μία ανάλυση των χαρακτηριστικών λειτουργίας της καθώς και υπολογισμός της ενεργειακής της απόδοσης.

3.2.1 Παρουσίαση των χαρακτηριστικών της γεννήτριας 850 W

Η γεννήτρια έχει κατασκευαστεί με στόχο τη σύνδεση της σε σύστημα με μπαταρίες 48V, ενώ συνδέεται μέσω ανορθωτή απευθείας στους συσσωρευτές. Τα ηλεκτρικά της χαρακτηριστικά είναι τα εξής :

Ονομαστική ισχύς	850W
Αριθμός πόλων	12
Αριθμός πηνίων ανά φάση	3
Αντίσταση φάσης	0,614 Ω
Αυτεπαγωγή φάσης	1,793 mH
Ακτίνα φτερωτής	1.2 m
Βέλτιστο λ	7
Μέγιστο Cp	0,35
Ονομαστικός άνεμος	10 m/sec
Τιμή cut-in	3 m/sec
Ονομαστικές στροφές	550 RPM
Cut-in στροφές	200 RPM
Cut-in ΗΕΔ	20,5 V
Bp	0,4 T
RMS τιμή της πεπελεγμένης ροής μίας φάσης	0,15Wb

Πίνακας 3.1 Κύρια χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας 850W

3.2.2 Απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές

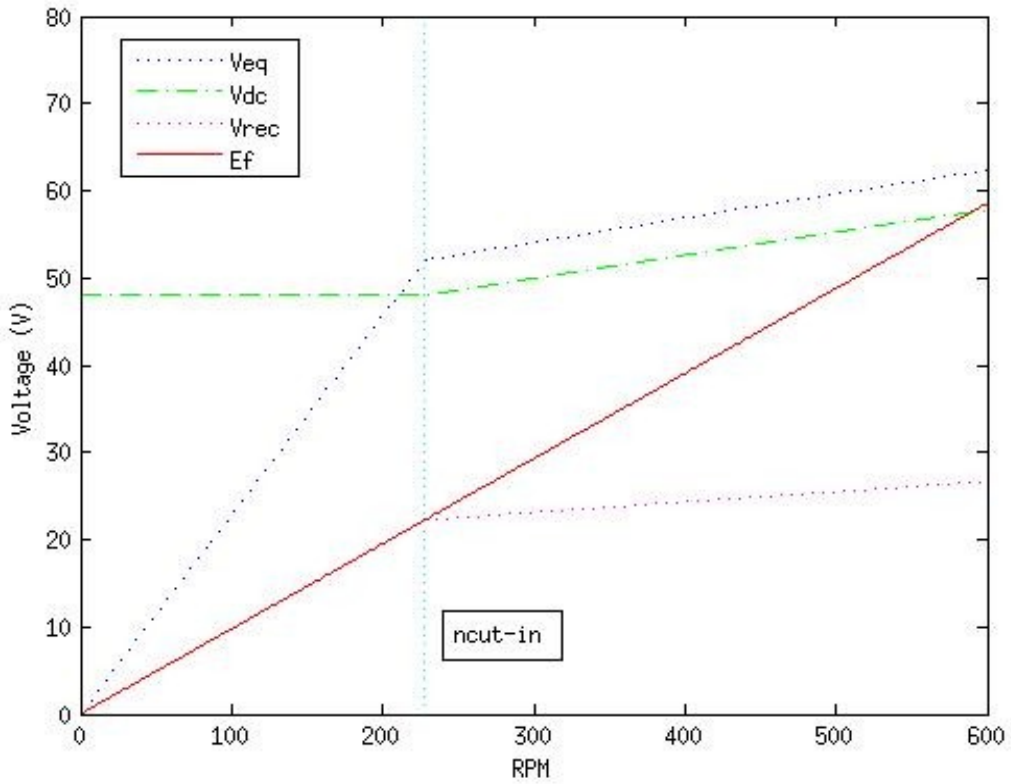
Για την ανάλυση μας θα χρησιμοποιήσουμε το AC μοντέλο που έχει αναπτυχθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Το πρόβλημα γενικότερα της απευθείας σύνδεσης σε συσσωρευτές είναι ότι κρατούν την τερματική τάση της γεννήτριας σε πολύ χαμηλά επίπεδα, καθιστώντας έτσι την διαδικασία απορρόφησης μέγιστης αεροδυναμικής ισχύος αδύνατη.Εν ολίγοις είναι δύσκολο ο συνδυασμός λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου και αεροδυναμικού συντελεστή να παραμείνει στο ιδανικό 7 – 0,35 αντίστοιχα. Επίσης σε όλη τη διαδικασία της ανάλυσης υπεισέρχεται και το θέμα της εσωτερικής αντίστασης των συσσωρευτών που ενώ κανονικά μεταβάλλεται ανάλογα με το βαθμό φόρτισης, στην παρούσα έρευνα θα κρατηθεί σταθερή και ίση με 0,4 Ω, κάτι που εμπεριέχει προφανώς σφάλματα κατά τη διαδικασία της ανάλυσης και εκτίμησης των αποτελεσμάτων.

Κατά τη διάρκεια της ανάλυσης του AC 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 το καλώδιο. Και οι δύο αυτές καταστάσεις θα αναλυθούν στην 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 πρός 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 και διαφέρουν απο αυτές που έχουν θεωρητικά υπολογιστεί καθώς το λ=7 δεν ισχύει για σύνδεση σε συσσωρευτές. Στη συνέχεια υπολογίζονται και λοιπά μεγέθη όπως ηλεκτρική, μηχανική ισχύς, απώλειες συστήματος και προκύπτουν και οι χαρακτηριστικές του συστήματος.

3.2.2.1 Απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές – Σύστημα 48V

Η πρώτη περίπτωση που εξετάζεται είναι αυτή του συστήματος 48V. Αρχικά θα αναλυθούν οι τάσεις που εμφανίζονται στο σύστημα. Έχουμε λοιπόν τα παρακάτω :



Σχήμα 3.1 Τάσεις που αναπτύσσονται στο σύστημα σε σχέση με τις στροφές

Η ΗΕΔ της γεννήτριας (E_f) όπως γνωρίζουμε εξαρτάται μόνο απο τις στροφές και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και επομένως η σχέση της είναι γραμμική σε σχέση με τις στροφές, ανεξαρτήτως έγχυσης ισχύος στο σύστημα, ανεξάρτητα δηλαδή απο το αν έχουμε ξεπεράσει τις cut-in στροφές ή όχι. Απο την άλλη η τάση V_{rec} , η τάση δηλαδή που βλέπει ο ανορθωτής είναι ίση με την ΗΕΔ κατά το κομμάτι στο οποίο βρισκόμαστε κάτω απο τις cut-in στροφές. Αυτό συμβαίνει διότι σε αυτό το κομμάτι δεν έχουμε ροή ρεύματος, άρα δεν έχουμε και πτώσεις τάσης στο τύλιγμα της γεννήτριας καθώς και στο καλώδιο. Αυτό αλλάζει πάνω απο τις cut-in στροφές καθώς πλέον η τάση σταθεροποιείται στην τάση της μπαταρίας. Οποιαδήποτε μεταβολή οφείλεται στην πτώση τάσης πάνω στην αντίσταση της μπαταρίας. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η V_{dc} , η οποία είναι η τάση ουσιαστικά στους ακροδέκτες των συσσωρευτών, και παραμένει σταθερή στα 48V μέχρι να αρχίσει να ρέει ισχύς στο σύστημα, όπου και αυξάνεται κατά την κατά της πτώση τάσης στην εσωτερική αντίσταση της γεννήτριας. Τέλος εμφανίζεται η τάση V_{eq} , η οποία ουσιαστικά είναι η ισοδύναμη τάση ανορθωτή – μπαταρίας. Η τάση αυτή ξεπερνά και τα 48V της μπαταρίας αλλά και την πτώση τάσης στον ανορθωτή. Επίσης φαίνονται και οι cut-in στροφές της γεννήτριας, οι οποίες είναι 228 RPM και που μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι οι στροφές κατά τις οποίες αρχίζουν και άγουν οι δίοδοι του ανορθωτή μιας και εξαρτώνται άμεσα από αυτό.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η παραπάνω γραφική δε περιλαμβάνει τη βελτιστοποίηση της αντίστασης του καλωδίου σύνδεσης και είναι χρήσιμη μόνο για ανάλυση κατ' εξοχήν ποιοτικών χαρακτηριστών και συμπεριφορών της ανεμογεννήτριας.

Στη συνέχεια θα γίνει προσπάθεια ανάλυσης της διαδικασίας με την οποία επιλέχθηκε η βέλτιστη τιμή αντίστασης καλωδίου, καθώς και το ποιοί παράγοντες και μεγέθη υπεισέρχονται στη μελέτη αυτή. Η διαδικασία αυτή έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον γιατί όπως θα φανεί στη συνέχεια η επιλογή τις τιμής της αντίστασης παίζει καθοριστικό ρόλο τόσο στα ποιοτικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας, αλλά και ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην ενεργειακή απόδοση της, κάτι που όπως έχει ήδη διευκρινιστεί μας ενδιαφέρει πιο πολύ κατά τη μελέτη μας.

3.2.2.1.1 Θεωρητική προσέγγιση και επεξήγηση της διαδικασίας

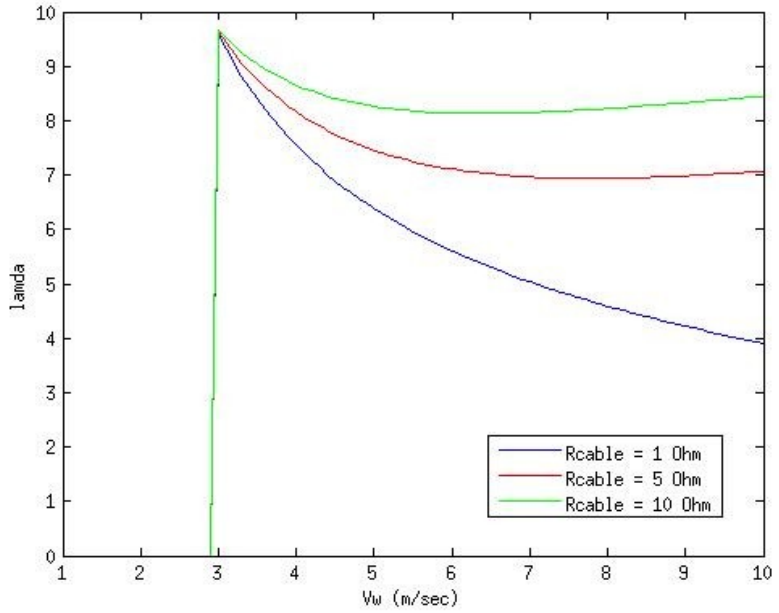
Γνωρίζουμε ότι η αντίσταση ενός καλωδίου χαλκού δίνεται απο τη σχέση: $R_{cable} = p\frac{l}{S}$, όπου R η αντίσταση του καλωδίου, p η ειδική αντίσταση του χαλκού, l το μήκος του και S η διατομή του. Επομένως παρατηρούμε ότι ουσιαστικά αυτό που επηρεάζει την αντίσταση του καλωδίου είναι τόσο το μήκος του, όσο και η διατομή του. Στο πρόγραμμα που έχει γραφτεί σε λογισμικό Matlab, αρχικά υπολογίστηκε η βέλτιση 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 Rcable, αυξάνουμε τις στροφές της γεννήτριας και εξάγουμε στοιχεία για την ισχύ, μηχανική και ηλεκτρική, τον αεροδυναμικό συντελεστή Cp, το λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου, το ρεύμα Iac που ρέει στο κύκλωμα, καθώς και για την ενεργειακή απόδοση Ε.

Το κριτήριο με βάση το οποίο επιλέχθηκε η βέλτιστη τιμή της αντίστασης ήταν αφ' ενός η βέλτιστη ενεργειακή απόδοση σε διάστημα ενός χρόνου και αφ' ετέρου το λ να μη ξεπεράσει την τιμή 8 που έχει τεθεί ως άνω όριο, καθώς πάνω απο αυτή την τιμή, επιβαρύνεται εξαιρετικά απο μηχανικής απόψεως η φτερωτή και ενισχύονται σημαντικά τα επίπεδα θορύβου κατά τη λειτουργία της. Δευτερεύων ρόλο στην επιλογή παίζουν οι στροφές που αναπτύσσει η ανεμογεννήτρια κατά τη βέλτιστη λειτουργία της απο ενεργειακή σκοπιά, καθώς και το ρεύμα που αναπτύσσεται στο τύλιγμα της, που δεν πρέπει να ξεπερνάει τα όρια ασφαλούς λειτουργίας της.

Για να γίνει σαφής η επίδραση του καλωδίου σύνδεσης κατά τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας, παρακάτω παρατίθονται γραφικές που αποτυπώνουν χαρακτηριστικά μεγέθη της όπως ρεύμα, αεροδυναμικό συντελεστή, λ, μηχανική ισχύς, απώλειες κλπ.

Πρώτη γραφική που μας δίνει αρκετά καλή εικόνα για την επίδραση της τιμής της αντίστασης καλωδίου είναι το γράφημα που σχετίζει την τιμή του λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου με την ταχύτητα του ανέμου :

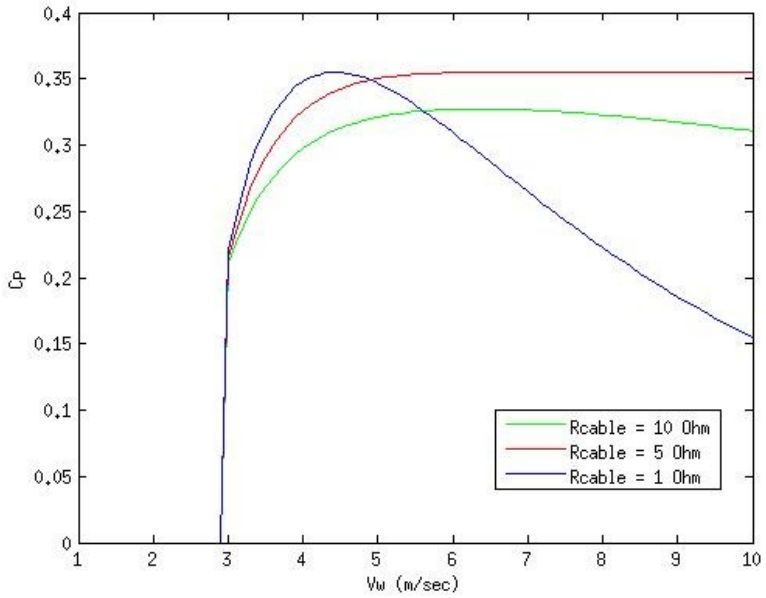


Σχήμα 3.2 Γραφική παράσταση ταχύτητας ανέμου – λ για διάφορες τιμές της αντίστασης καλωδίου

Στο πρώτο κεφάλαιο έχει αναφερθεί ότι στην πραγματικότητα το λ υπολογίζεται μέσω του αεροδυναμικού συντελεστή C_p, ο οποίος για κάθε τιμή του ανέμου δεν είναι σταθερός και

απαιτούνται αρκετά πολύπλοκοι υπολογισμοί για να βρεθεί η τιμή του. Το γεγονός που μας δείχνει η παραπάνω γραφική είναι ότι για διαφορετικές τιμές της αντίστασης πετυχαίνουμε τα επιθυμητά λ σε διαφορετικές τιμές ανέμου. Χαρακτηριστικά παρατηρούμε ότι για V_w = 10 m/sec , τιμή στην οποία θα θέλαμε η τιμή του λ να είναι κοντά στο 8, βλέπουμε ότι κάτι τέτοιο δεν ισχύει παρά μόνο στη δεύτερη περίπτωση όπου R_{cable} = 5Ω. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις είτε είναι αρκετά μεγαλύτερος είτε εμφανώς μικρότερος.

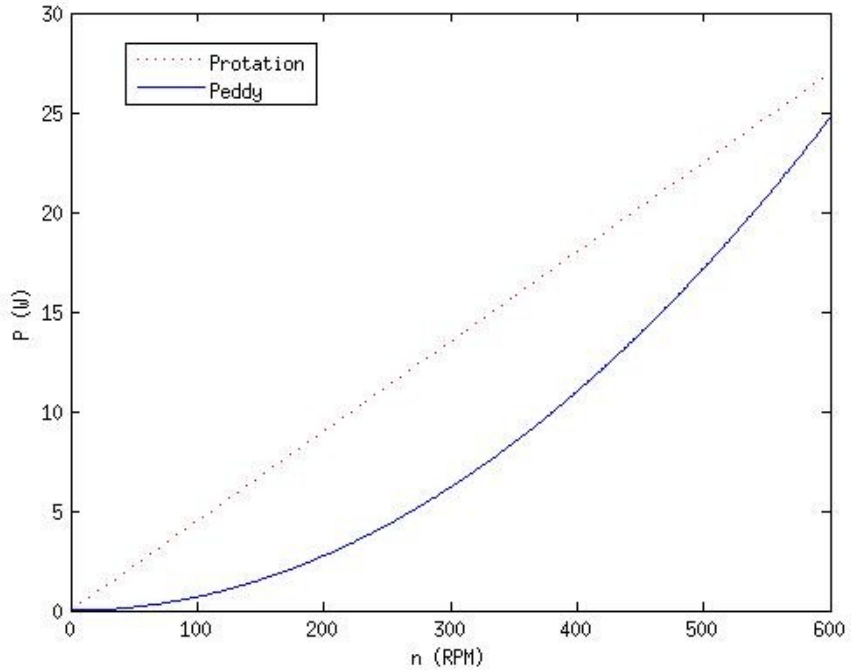
Αντίστοιχο ενδιαφέρον έχει και το γράφημα που παρουσιάζει τη μεταβολή του C_p σε συνάρτηση με τον άνεμο :



Σχήμα 3.3 Ο αεροδυναμικός συντελεστής συναρτήσει του ανέμου για διάφορες τιμές του R_{cable}

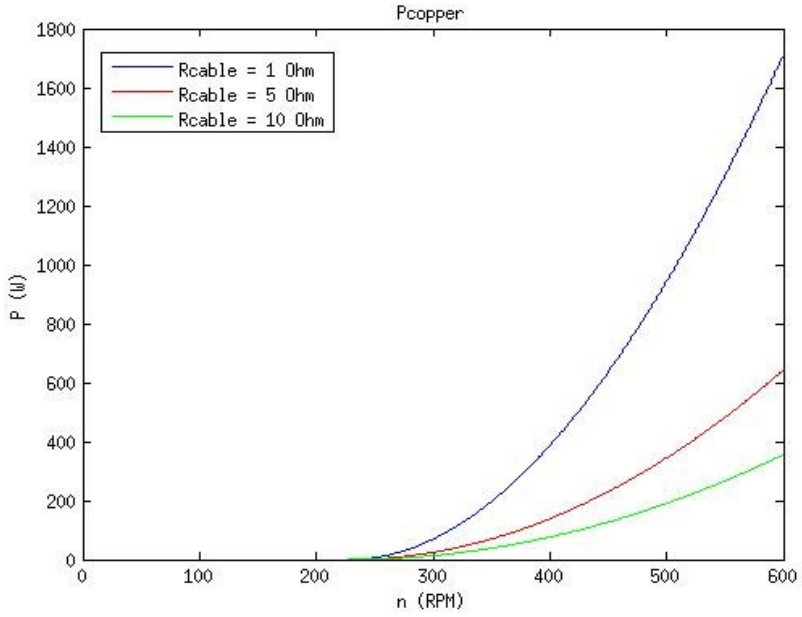
Παρατηρούμε και εδώ λοιπόν ότι ενώ για όλες τις τιμές της αντίστασης, ο αεροδυναμικός συντελεστής δε ξεφεύγει πάνω απο το 0,35, οι τιμές του έχουν μεγάλη απόκλιση στο εύρος των τιμών του ανέμου που εξετάζουμε.

Όσον αφορά στις απώλειες γενικά στο σύστημα μας έχουμε τα παρακάτω:



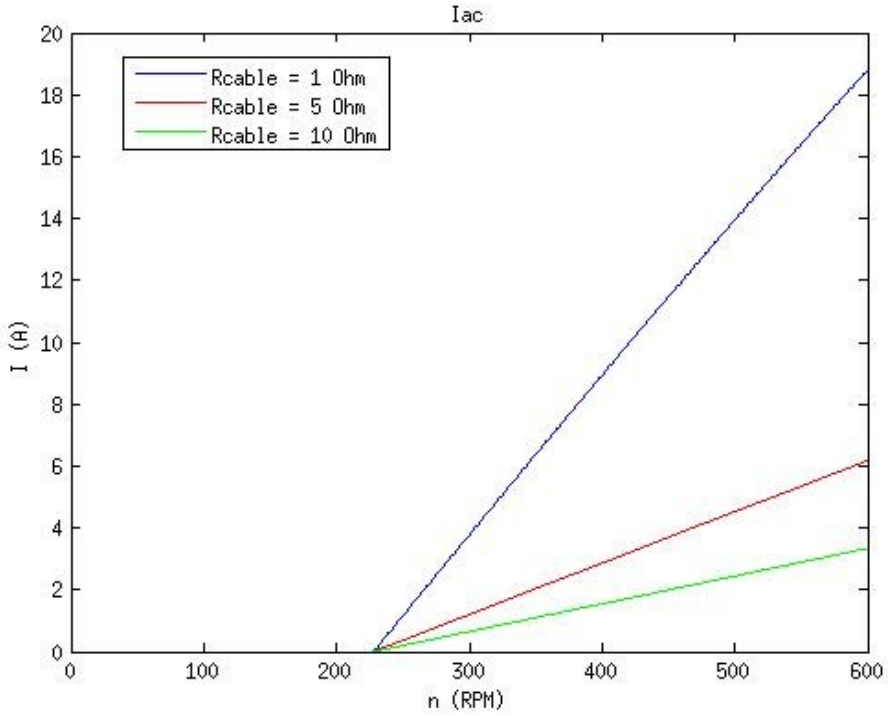
Σχήμα 3.4 Οι απώλειες περιστροφής και δινορευμάτων σε σχέση με τις στροφές

Τόσο οι απώλειες δινορευμάτων όσο και οι απώλειες περιστροφής δεν εξαρτώνται απο την αντίσταση του καλωδίου και επομένως δεν επηρεάζονται κατά την αλλαγή της τιμής του.



Σχήμα 3.5 Οι απώλειες χαλκού σε σχέση με τις στροφές για διάφορες τιμές της αντίστασης καλωδίου

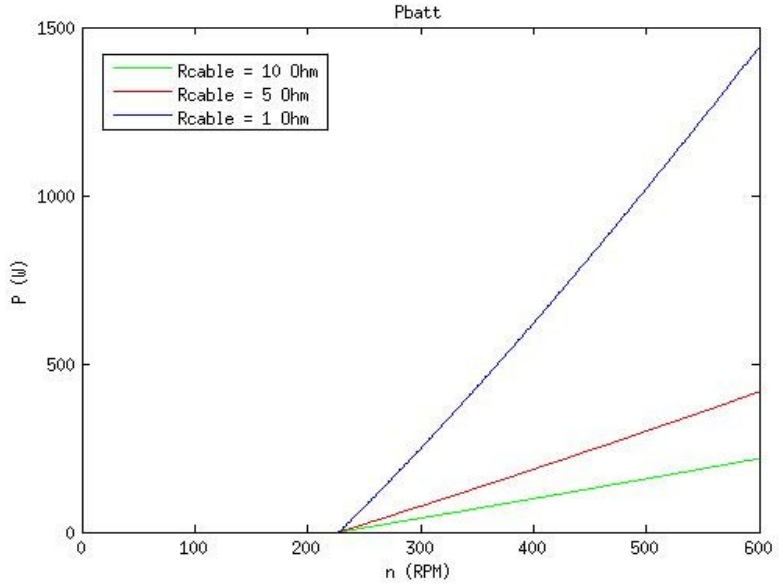
Οι απώλειες χαλκού συμπεριλαμβάνουν τις απώλειες στο τύλιγμα της γεννήτριας και τις απώλειες στο καλώδιο επομένως είναι εύκολο να αντιληφθούμε ότι επηρεάζεται άμεσα το μέγεθος αυτό απο την τιμή της αντίστασης του καλωδίου. Για να αναλύσουμε τη συμπεριφορά αυτή που φαίνεται στις γραφικές καλό θα είναι πρώτα να παρατεθεί και η γραφική στροφών – ρεύματος I_{ac} . Έτσι έχουμε :



Σχήμα 3.6 Iac σε συνάρτηση με τις στροφές για διάφορες τιμές της αντίστασης καλωδίου

Παρατηρούμε λοιπόν ότι ενώ είναι φυσικό για σταθερή τιμή αντίστασης καλωδίου, το ρεύμα I_{ac} να αυξάνεται με την αύξηση των στροφών και επομένως και οι απώλειες χαλκού να ακολουθούν την ίδια τάση, όσο αυξάνουμε την αντίσταση του καλωδίου το ρεύμα για τις ίδιες στροφές μειώνεται και επομένως αναλόγως μειώνονται και οι απώλειες χαλκού σύμφωνα με τη σχέση $P_{copper} = 3 I_{ac}^2 (R_{cable} + R_{phase})$, όπου R_{phase} η αντίσταση του τυλίγματος της γεννήτριας ανά φάση.

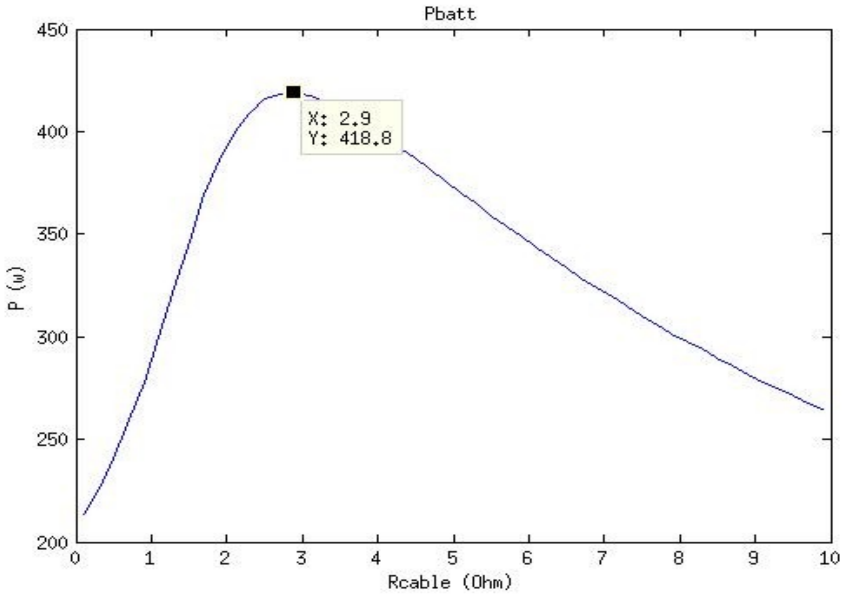
Στη συνέχεια παρατίθεται το διάγραμμα που δείχνει την απορροφούμενη ισχύ των μπαταριών που προκύπτει αν απο την ισοδύναμη ισχύ του συστήματος ανορθωτή – μπαταρίας αφαιρεθούν οι απώλειες στην πλευρά του ανορθωτή .



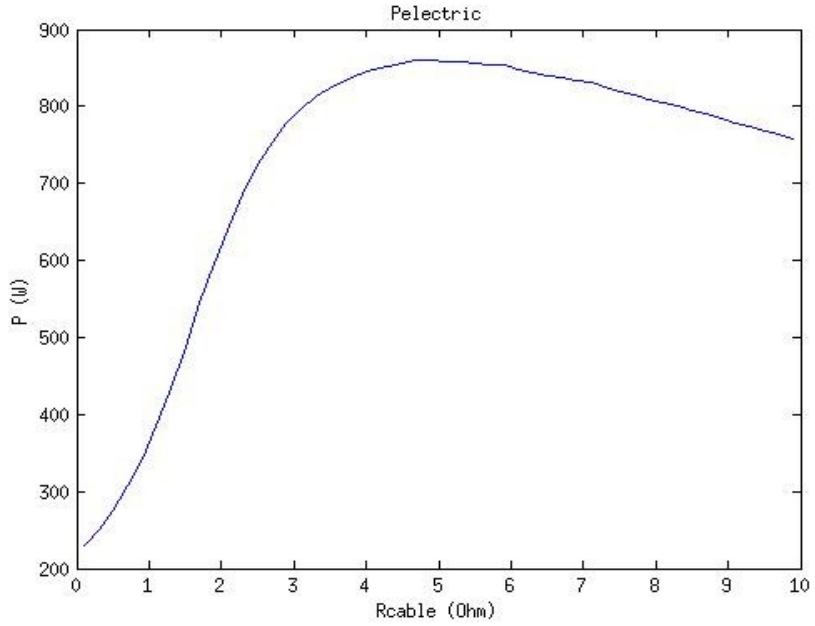
Σχήμα 3.7 Απορροφούμενη ισχύς μπαταριών για διάφορες τιμές της αντίστασης καλωδίου

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι καμπύλες που συσχετίζουν την ενεργειακή απόδοση, την ισχύ των μπαταριών καθώς και την ηλεκτρική ισχύ του συστήματος με την αντίσταση του καλωδίου σύνδεσης γεννήτριας - ανορθωτή.

Τα γραφήματα που αφορούν την ηλεκτρική και την ισχύ που απορροφούν οι μπαταρίες σχεδιάζονται για άνεμο 10 m/sec ενώ το γράφημα της ενεργειακής απόδοσης αφορά σε περίοδο ενός έτους και για εύρος ανέμου 3 – 10 m/sec. Έτσι έχουμε λοιπόν :

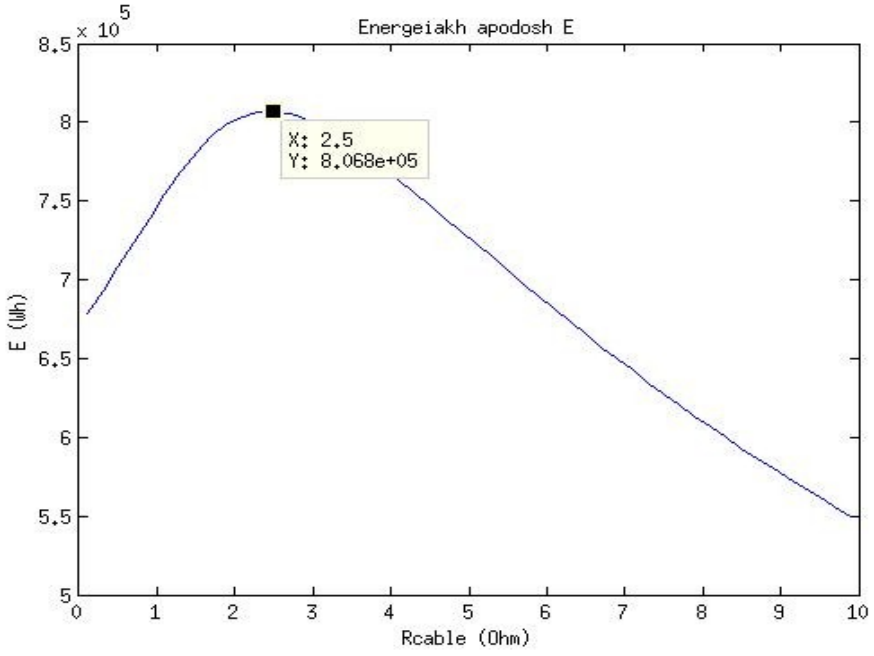


Σχήμα 3.8 Η ισχύς που απορροφούν οι συσσωρευτές με την αύξηση της R_{cable}



Σχήμα 3.9 Η ηλεκτρική ισχύς συναρτήσει της αύξησης της τιμής της αντίστασης καλωδίου

Τέλος το γράφημα της ενεργειακής απόδοσης :



Σχήμα 3.10 Η ενεργειακή απόδοση σε σχέση με την R_{cable}

Η διαδικασία λοιπόν που μας οδήγησε στην επιλογή της βέλτιστης τιμής είναι η εξής:

Ξεκινάμε απο τιμή καλωδίου 0,2 Ohm και για φτάνουμε μέχρι τα 10 Ohm. Για κάθε τιμή της αντίστασης αυξάνουμε τις στροφές τις γεννήτριας και ελέγχουμε τα μεγέθη I_{ac} , λ, C_p , P_{batt} , $P_{electric}$ και Ε. Στόχος μας είναι να πετύχουμε τη μέγιστη ενεργειακή απόδοση και ταυτόχρονα για τη βέλτιστη τιμή της αντίστασης, για τιμή ανέμου 10m/sec να μη ξεπεράσουμε τις τιμές λ = 8 , C_p = 0,35. Όπως φαίνεται και απο τα παραπάνω διαγράμματα, όντως υπάρχει μέγιστο σημείο ενεργειακής απόδοσης της ανεμογεννήτριας και αυτό είναι οι 806,8 kWh οι οποίες και επιτυγχάνονται για R_{cable} = 2,5 Ohm. Για τη συγκεκριμένη τιμή αντίστασης έχουμε τιμή απορροφούμενης ισχύς απο πλευράς των μπαταριών P_{batt} = 415,74W και P_{mech} = 821,83W ενώ έχουμε I_{ac} = 6,16 A.

Επίσης οι στροφές της γεννήτριας μένουν σχετικά χαμηλές σε σχέση με τις ονομαστικές της καθώς έχουμε N = 440 RPM, ενώ παρατηρείται λ = 5,53 και C_p = 0,30, τιμές λογικές αν σκεφτούμε ότι η ανεμογεννήτρια λόγω επιβολής τάσης απο πλευράς των μπαταριών δεν είναι δυνατόν να αναπτύξει όλη της τη δυναμική (στροφές) και επομένως δουλεύει σε χαμηλότερες στροφές και απορροφά χαμηλότερη τιμή ισχύος απο ότι μπορεί, εξ' ού και οι τιμές του λ και του C_p που είναι αρκετά πιό χαμηλές απο τα θεωρητικά μέγιστα.

Επίσης παρατηρούμε ότι ενώ και η καμπύλη της απορροφούμενης ισχύος απο τις μπαταρίες παρουσιάζει μέγιστο, αυτό δε συμπίπτει με το σημείο μεγίστου της ενεργειακής απόδοσης αν και οι τιμές τους δε διαφέρουν πολύ. Τέλος η απόδοση του συστήματος μας που ορίζεται ώς το κλάσμα της ισχύος που απορροφούν οι μπαταρίες πρός τη μηχανική ισχύ στο δρομέα της γεννήτριας δηλαδή είναι ο λόγος $\frac{P_{batt}}{P_{mech}}$ είναι αρκετά καλός για συστήματα τέτοιου είδους και αγγίζει το 50,58% . Τό μέγεθος αυτό παίζει εξαιρετικά σημαντικό ρόλο καθώς υπεισέρχεται στον τύπο που μας δίνει την ενεργειακή απόδοση του συστήματος μας. Πιό συγκεκριμένα ο τύπος που μας καθορίζει την ενέργεια που απορροφούν οι μπαταρίες και επομένως και την ενεργειακή μας απόδοση είναι :

$P_{batt} = a C_p \frac{1}{2} \rho \pi R_{turb}^2 V_w^3$, όπου α = $\frac{P_{batt}}{P_{mech}}$ με $P_{mech} = P_{electric} + P_{copper} + P_{eddy} + P_{Rotation}$.

Στην ουσία η όλη προσπάθεια βελτιστοποίησης της ενεργειακής απόδοσης βασίζεται ακριβώς την επιλογή αυτών των μεγεθών που να μας εξασφαλίζουν μέγιστη απόδοση, μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή για τιμές ανέμου 10 m/sec.

3.2.2.1.2 Διαδικασία επιλογής καλωδίου και οικονομική μελέτη

Είδαμε λοιπόν ότι η τιμή του καλωδίου που μας εξασφαλίζει τη μέγιστη ενεργειακή απόδοση κατά τη σύνδεση της ανεμογεννήτριας των 850 W σε σύστημα με συσσωρευτές 48V είναι R_{cable} = 2,5 Ohm. Σ την παρούσα παράγραφο θα προσπαθήσουμε να διευκρινίσουμε τη διαδικασία επιλογής του κατάλληλου καλωδίου σύνδεσης μεταξύ της γεννήτριας – ανορθωτή (AC) αλλά και μεταξύ ανορθωτή – συσσωρευτών (DC) καθώς και να παρουσιάσουμε κάποια οικονομικά μεγέθη τα οποία είναι σημαντικά κατά την επιλογή εμπορικών καλωδίων.

Παραπάνω στο ίδιο κεφάλαιο αναφέρεται ότι ο τύπος που μας δίνει την τιμή της αντίστασης ενός καλωδίου είναι $R_{cable} = p\frac{l}{S}$. Είναι προφανές λοιπόν ότι τα δύο στοιχεία που μας καθορίζουν την τιμή, υπό σταθερές συνθήκες περιβάλλοντος, θερμοκρασία,υγρασία κλπ, είναι το μήκος του καλωδίου και η διατομή του.

Επομένως σε πρώτη φάση αυτό που έγινε είναι, για μήκη καλωδίου (αναφερόμαστε στο κομμάτι γεννήτρια – ανορθωτή) απο 20-150 μέτρα και με δεδομένη την βέλτιστη τιμή καλωδίου R_{cable} = 2,5 Ohm να υπολογίζουμε την θεωρητική τιμή της διατομής του καλωδίου σε mm^2 που θα ήταν απαραίτητα ώστε να επιτευχθεί το θεωρητικό βέλτιστο. Έτσι προέκυψε ο παρακάτω πίνακας που απεικονίζει αυτή ακριβώς τη διαδικασία :

Μήκος Καλωδίου (m)	Θεωρητική τιμή διατομής (mm^2)
20	0,1390
30	0,2120
40	0,2830
50	0,3520
60	0,4220
70	0,4910
80	0,5620
90	0,6360
100	0,7030
110	0,7730
120	0,8430
130	0,9160
140	0,9850
150	1,0600

Πίνακας 3.2 Θεωρητική τιμή διατομής σε σχέση με το μήκος του AC καλωδίου

Στην πραγματικότητα οι τιμές αυτές δεν αντιστοιχούν σε εμπορικές τιμές καλωδίου οι οποίες είναι 0,5, 0,75, 1,00, 1,50, 2,50, 4,00 mm^2 κ.ο.κ. Συνεπώς θα πρέπει να υπάρξει κάποιος τρόπος σύμφωνα με τον οποίο θα γίνει μια επιλογή εμπορικού καλωδίου που θα ανταποκρίνεται όσο το δυνατόν καλύτερα στα ποιοτικά και ποσοτικά κριτήρια που θα πρέπει να πληρεί το σύστημά μας.

Το πρώτο και κύριο κριτήριο που εξετάστηκε είναι η αντοχή του εκάστοτε καλωδίου στις τιμές ρεύματος που διέρχονται απο μέσα του. Εν προκειμένω το καλώδιο μας θα πρέπει όχι μόνο να αντέχει 6,16 Α αλλά θα πρέπει να μπορεί σε ριπές ανέμου και μέχρι το σύστημα Furling να προλάβει να ενεργοποιηθεί να αντέξει μέχρι και τριπλάσιες τιμές ρεύματος δηλαδή περίπου 18Α για λίγα δευτερόλεπτα. Σύμφωνα με το [11] έχουμε τα παρακάτω:

Η διατομή με κριτήριο της εξασφάλιση επαρκούς μηχανικής αντοχής προκύπτει με την επιλογή τιμών ίσων ή μεγαλύτερων απο συγκεκριμένες ελάχιστες επιτρεπόμενες διατομές που αναγράφονται σε κανονισμούς. Για δεδομένη διατομή αγωγού, έχουμε μια μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση συνεχούς ροής ρεύματος και αντίστοιχα σε 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 ως εξής. Οι κανονισμοί αφορούν μονωμένους αγωγούς και καλώδια χαμηλής τάσης με μόνωση PVC ή κοινό πλαστικό με μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία 60^0 . 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 60^0 καθορίζεται κατά βάση απο τις τιμές που αναγράφονται στον πίνακα 3.4 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 30^0 και οριακή ανύψωση της θερμοκρασίας του αγωγού υπό συνεχή ροή, ίση με 30^0 , άρα συνολική μέγιστη θερμοκρασία της μόνωσης του αγωγού 60^0 . Για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 30^0 , η μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση περιορίζεται κατά τα ποσοστά που αναγράφονται στον πίνακα 3.4.

'Ετσι έχουμε τα παρακάτω:

Ονομαστική διατομή (mm^2)	Επιτρεπόμενη ένταση (Α)		
	Ομάδα Ι	Ομάδα ΙΙ	Ομάδα ΙΙΙ
0.75	9.00	15.0	7.0
1.00	11.0	18.0	9.0
1.50	14.0	22.0	10
2.50	20.0	31.0	15
4.00	25.0	41.0	20
6.00	33.0	54.0	26
10.0	43.0	70.0	35
16.0	60.0	96.0	48
25.0	83.0	128	65
35.0	100	153	78
50.0	127	197	100
70.0	147	234	-
95.0	181	287	-
120	208	336	-
150	238	383	-
185	266	435	-
240	310	515	-
300	355	596	-
400	-	710	-
500	-	810	-

Πίνακας 3.3 Μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση συνεχούς ροής για χάλκινους αγωγούς με μόνωση απο PVC ή πλαστικό

Θερμοκρασία περιβάλλοντος (°C)	Ποσοστό εντάσεως του πίνακα 4.3 (%)
30	100
35	91
40	82
45	71
50	58
55	41

Πίνακας 3.4 Συντελεστές διορθώσεως του πίνακα 3.3 για θερμοκρασίες περιβάλλοντος άνω των 30^0

Ο ομάδες που αναφέρονται παραπάνω έχουνε ως εξής:

- Ομάδα Ι : Τρείς το πολύ ενεργοί αγωγοί στον ίδιο σωλήνα η καλώδιο σε ορατή ή χωνευτή εγκατάσταση

- Ομάδα ΙΙ : Μονοπολικά καλώδια ή μονοπολικοί αγωγοί σε ορατές εγκαταστάσεις, εφ' όσον το μεταξύ τους διάστημα δεν είναι μικρότερο απο την εξωτερική τους διάμετρο

- Ομάδα ΙΙΙ : Σειρίδες των τριών το πολύ ενεργών αγωγών σε ορατή εγκατάσταση και γραμμές προσαγωγής σε κινητές ή φορητές συσκευές.

Επομένως και σύμφωνα με την πρώτη μας συνθήκη ότι δηλαδή θέλουμε το καλώδιο μας να αντέχει ρεύμα περίπου ίσο με 18Α, λαμβάνοντας υπ' όψιν μας τους παραπάνω πίνακες, καταλήγουμε ότι η βέλτιστη διατομή καλωδίου είναι τα 2.5 mm^2 .

Στη συνέχεια έχοντας κάνει την επιλογή του καλωδίου και έχοντας πλέον τόσο τη διατομή όσο και το μήκος δεδομένα, ξαναυπολογίζουμε την πραγματική αντίσταση που θα έχει το καλώδιο μας, έχοντας πλέον διατομή τυποποιημένη και ίση με 2.5 mm^2 και μεταβλητό μήκος καλωδίου.

Μήκος Καλωδίου (m)	Θεωρητική τιμή διατομής (mm^2)	Αντίστοιχη εμπορική (mm^2)	Μέγιστο ρεύμα καλωδίου (A)	Αντίσταση για εμπορική τιμή (Ohm)
20	0,1390	2,50	18,9	0,141
30	0,2120	2,50	18,9	0,211
40	0,2830	2,50	18,9	0,281
50	0,3520	2,50	18,9	0,351
60	0,4220	2,50	18,9	0,422
70	0,4910	2,50	18,9	0,492
80	0,5620	2,50	18,9	0,562
90	0,6360	2,50	18,9	0,632
100	0,7030	2,50	18,9	0,703
110	0,7730	2,50	18,9	0,773
120	0,8430	2,50	18,9	0,840
130	0,9160	2,50	18,9	0,913
140	0,9850	2,50	18,9	0,984
150	1,0600	2,50	18,9	1,050

Πίνακας 3.5 Υπολογισμός τιμής αντίστασης τυποποιημένης διατομής σε σχέση με το μήκος του καλωδίου

Χρησιμοποιώντας τώρα τα ήδη υπάρχοντα εργαλείας μας, δηλαδή τους κώδικες που έχουν γραφτεί στο λογισμικό Matlab ξαναυπολογίζουμε την ενεργειακή απόδοση με βάση όχι πλέον τη θεωρητική βέλτιστη τιμή αντίστασης DC καλωδίου αλλά τις εκάστοτε τιμές που έχουν υπολογιστεί στον παραπάνω πίνακα.

Κατ' αυτόν τον τρόπο προκύπτει ο παρακάτω πίνακας :

Μήκος Καλωδίου (m)	Αντίσταση για εμπορική τιμή (Ohm)	Ε για αντίστοιχη εμπορική (kWh)	Στροφές στα 10 m/sec (RPM)
20	0,141	681,22	261
30	0,211	686,37	264
40	0,281	691,97	268
50	0,351	696,89	271
60	0,422	702,34	274
70	0,492	707,61	278
80	0,562	713,44	282
90	0,632	718,40	286
100	0,703	723,56	290
110	0,773	728,88	295
120	0,840	734,26	300
130	0,913	739,93	304
140	0,984	745,95	310
150	1,050	750,81	315

Πίνακας 3.6 Ενεργειακή απόδοση για τιμές αντίστασης που προκύπτουν απο την επιλογή εμπορικής (τυποποιημένης) τιμής για τη διατομή άρα και την αντίσταση του DC καλωδίου. Επίσης φαίνονται και οι στροφές που πιάνει η γεννήτρια στα 10 m/sec.

Όπως παρατηρούμε η ενεργειακή απόδοση είναι αρκετά χαμηλότερη απο αυτή που είχαμε με την αντίσταση που προέκυπτε απο τις θεωρητικές μας προσεγγίσεις και μετρήσεις, ενώ φαίνεται και κάτι που είναι προφανές ότι όσο η τιμή της αντίστασης πλησιάζει τη θεωρητική τιμή που είναι τα 2.5 Ohm τόσο βελτιώνεται η ενεργειακή απόδοση. Σε αυτό συνηγορεί και η τελευταία στήλη η οποία δείχνει τη μεταβολή των στροφών της ανεμογεννήτριας για άνεμο 10 m/sec. Θα θέλαμε η ανεμογεννήτρια μας να δουλεύει στα ονομαστικά της μεγέθη, δηλαδή στις 550 RPM. Κάτι τέτοιο με απευθείας σύνδεση στις μπαταρίες δεν είναι εφικτό χωρίς να εφαρμόσουμε επιπλέον μηχανική και ηλεκτρική – θερμική καταπόνηση στη γεννήτρια καθώς αν θελήσουμε να δουλέψουμε κοντά σε ονομαστικές στροφές θα πρέπει να ξεπεράσουμε το όριο που έχουμε θέσει για το λ πού είναι η τιμή 8 και σε πολλές περιπτώσεις θα πρέπει να ξεφύγουμε πολύ απο τα όρια που εχουν τεθεί κατασκευαστικά για το Iac .

Ο επόμενος πίνακας παρουσιάζει συγκεντρωτικά τα ποσοστά της μέγιστης ενεργειακής απόδοσης, δηλαδή 806,8 kWh, που επιτυγχάνονται κάθε φορά :

Μήκος Καλωδίου (m)	Ε για αντίστοιχη εμπορική (kWh)	Ποσοστό % επί της Emax
20	681,22	84,44
30	686,37	85,08
40	691,97	85,77
50	696,89	86,38
60	702,34	87,06
70	707,61	87,71
80	713,44	88,43
90	718,40	89,05
100	723,56	89,69
110	728,88	90,35
120	734,26	91,01
130	739,93	91,72
140	745,95	92,46
150	750,81	93,06

Πίνακας 3.7 Η προκύπτουσα ενεργειακή απόδοση ως ποσοστό της μέγιστης θεωρητικής E_{max}

Βλέπουμε ότι ειδικά στα μικρά μήκη η διαφορά με τη θεωρητική μέγιστη ενεργειακή απόδοση είναι αρκετά εμφανής και φτάνει μέχρι και το 15% ενω αυτή η διαφορά εξομαλύνεται όσο πλησιάζουμε σε πιο μεγάλα μήκη, μιας και αυξάνεται η αντίσταση και προσεγγίζει τη θεωρητική τιμή των 2,5 Ohm.

Στη συνέχεια προσθέτουμε και το DC κομμάτι που αφορά το κομμάτι της σύνδεσης απο τον ανορθωτή μέχρι τους συσσωρευτές. Λόγω της αύξησης της τιμής του μέγιστου ρεύματος λόγω ανόρθωσης κατά ένα παράγοντα 1,35 το καλώδιο θα πρέπει να αντέχει περίπου 25 Α. Συνεπώς θα επιλέξουμε καλώδιο με διατομή 4 mm^2 , σύμφωνα με τον πίνακα 3.3, με μήκος 2 m. Η αντίσταση που προκύπτει είναι

R_{dc} = 0,0176 Ohm (μετράμε δύο φορές το μήκος λόγω DC επομένως βρίσκουμε αντίσταση για 4 m καλώδιο), τιμή εξαιρετικά μικρή που δεν επηρεάζει σημαντικά την ανάλυσή μας και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η ισχύς που φτάνει στις μπαταρίες καθώς ξεκαθαρίζει το γεγονός ότι ναι μεν οι διαφορές της ενεργειακής απόδοσης με τη θεωρητική δεν είναι τεράστιες αλλά όσον αφορά στην ισχύ οι διαφορές με τη θεωρητική μέγιστη είναι μεγάλες, ενώ αρκετά μεγαλύτερες είναι σε σχέση με την ισχύ που προκύπτει με τη σύνδεση αυτεπαγωγής, κάτι που θα αναλυθεί στη συνέχεια.

Μήκος Καλωδίου (m)	Ισχύς Μπαταριών (W)
20	217,35
30	221,11
40	224,41
50	227,33
60	234,90
70	241,87
80	243,51
90	249,44
100	258,93
110	263,72
120	272,53
130	279,71
140	286,65
150	293,90

Πίνακας 3.9 Ισχύς μπαταριών ανάλογα το μήκος του καλωδίου σύνδεσης

Για τη βέλτιστη τιμή αντίστασης όπου επιτυγχάνουμε και μέγιστη ενεργειακή απόδοση έχουμε ισχύ μπαταριών ίση με 416,20 W. Παρατηρούμε λοιπόν ότι ενώ με την ενεργειακή απόδοση, η οποία σχετίζεται άμεσα με την κατανομή του ανέμου σε διάστημα ενός χρόνου, οι διαφορές μεταξύ της βέλτιστης αντίστασης και αυτής που προκύπτει απο την επιλογή εμπορικής τιμής άρα και καλωδίου είναι μικρή, στην περίπτωση της ισχύος των μπαταριών είναι ξεκάθαρη η αρνητική επίδραση που έχει η επιλογή καλωδίου με αρκετά χαμηλότερη αντίστασης απο τη θεωρητική βέλτιστη. Ειδικά σε μήκη κάτω των 100 μέτρων οι συσσωρευτές απορροφούν σχεδόν μόνο το 50% της μέγιστης. Αυτό θα μπορούσε να έχει αρκετές συνέπειες στην περίπτωση που θα θέλαμε να τροφοδητήσουμε αρκετά απαιτητικά απο πλευράς ισχύος φορτία στη πλευρά των μπαταριών. Επομένως θα θέλαμε να μπορούμε να διορθώσουμε και αυτόν τον παράγοντα έχοντας υπ' όψιν μας όπως και στα προηγούμενα την ευκολία κατασκευής ,το χαμηλό κόστος, τις απαιτήσεις σε υλικά και φυσικά το λόγο εργατοωρών και αποτελέσματος.

Τέλος σε αυτό το κομμάτι θα παρουσιαστούν κάποια οικονομικά μεγέθη που θα μας βοηθήσουν να κατανοήσουμε το ύψος του κόστους μιας τέτοιας προσθήκης, μετατροπής ή και κατασκευής της διάταξης ανεμογεννήτριας – ανορθωτή – συσσωρευτών .

Στην ελληνική αγορά το μήνα Μάιο του 2012 η τιμή ανά μέτρο για το καλώδιο 2,5 mm^2 ήταν 31 λεπτά του ευρώ. Επομένως με βάση αυτή την τιμή ο παρακάτω πίνακας δίνει το κόστος ανά κιλοβατώρα για όλα τα μήκη που εξετάζονται.

Μήκος Καλωδίου (m)	Κόστος (Ευρώ/Kwh)
20	0,0091
30	0,0135
40	0,0179
50	0,0222
60	0,0264
70	0,0306
80	0,0347
90	0,0387
100	0,0427
110	0,0466
120	0,0505
130	0,0543
140	0,0580
150	0,0618

Πίνακας 3.10 Κόστος ανά κιλοβατώρα για συνολικό μήκος καλωδίου AC κομματιού

Βλέπουμε και εδώ λοιπόν ότι το κόστος ανά κιλοβατώρα δεν είναι απαγορευτικό και επίσης φαίνεται ότι η αύξηση του δεν είναι γραμμική ,υπό την έννοια ότι η αύξηση της τιμής/kWh για καλώδιο 20m και της τιμής/kWh για καλώδιο 150 μέτρων είναι σχετικά μικρή αν αναλογιστούμε τη διαφορά στο κόστος των μέτρων του επιπλέον καλωδίου.

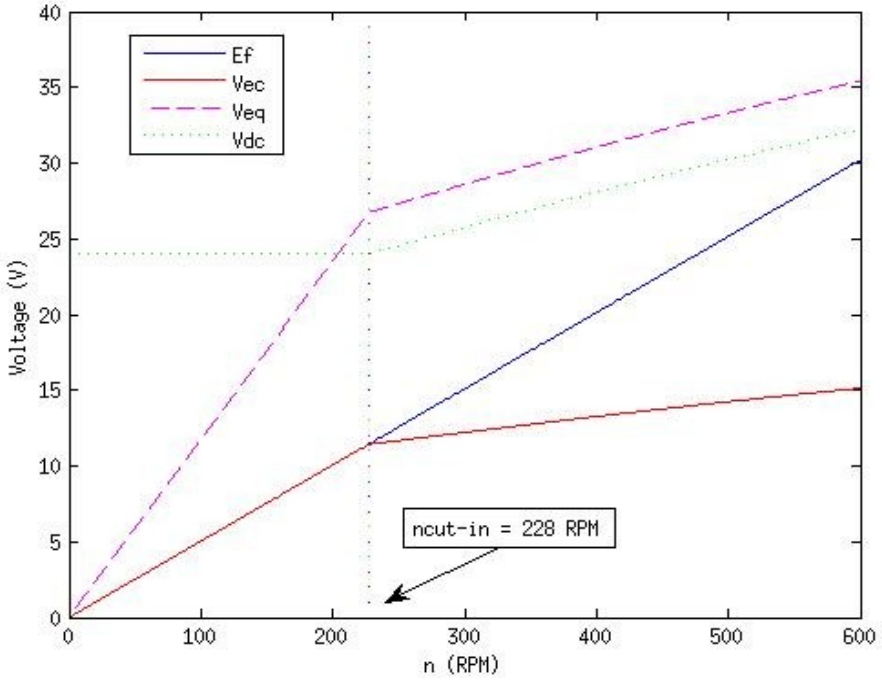
3.2.2.2 Απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές – Σύστημα 24V

Στη συνέχεια της έρευνας μας, προχωρήσαμε στην διαδικασία προσομοίωσης της σύνδεσης της ίδιας ανεμογεννήτριας των 850W αυτή τη φορά σε σύστημα συσσωρευτών 24V. Είναι ήδη προφανές απο την παραπάνω ανάλυση ότι με την αλλαγή του συστήματος συσσωρευτών, αναγκαστικά θα πρέπει να υπάρξει και διαφορετική διαστασιολόγηση στη γεννήτρια για να μπορεί να αποδόσει τα ίδια ονομαστικά μεγέθη στις ίδιες συνθήκες περιβάλλοντος, δηλαδή να πιάνει τα ονομαστικά της μεγέθη στα 10 m/sec στις 550 RPM αποδίδοντας 850 W.

Έτσι για τις ανάγκες της προσομοίωσης του μοντέλου μας, διορθώσαμε κάποιες απο τις μεταβλητές των προγραμμάτων μας έτσι ώστε να ταιριάζουν με τη διαστασιολόγηση που οφείλει να γίνει κατά τη μελέτη της σύνδεσης σε σύστημα 24V. Οί αλλαγές αυτές είναι η πεπλεγμένη ροή του κάθε πηνίου η οποία για σύστημα 24V προκύπτει ότι είναι 0,0267 Wb απο 0,05 Wb που ήταν για το σύστημα 48V

καθώς επίσης και η τιμή της αντίστασης της μίας φάσης της γεννήτριας που μεταβάλλεται σε 0,17 Ohm/φάση σε αντίθεση με τα 0,614 Ohm/φάση πού ήταν στο 48V σύστημα. Τέλος μεταβάλλεται η σχέση που δίνει τη ΗΕΔ της γεννήτριας σε σχέση με τις στροφές της. Όλα τα παραπάνω έχουν προκύψει μετά απο σχετική προσομοίωση σε λογισμικό FEMM και φυσικά τη σχετική ανάλυση στο Matlab.

Έχοντας ήδη αναλύσει τη διαδικασία που ακολουθούμε για τη βελτιστοποίηση του συστήματος μας με κριτήριο πάντα τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης προχωρούμε στην παρουσίαση των μεγεθών που παρουσιάζουν εξαιρετικό ενδιαφέρον :



Σχήμα 3.11 Οι τάσεις που παρουσιάζονται στο σύστημα με συσσωρευτές 24V

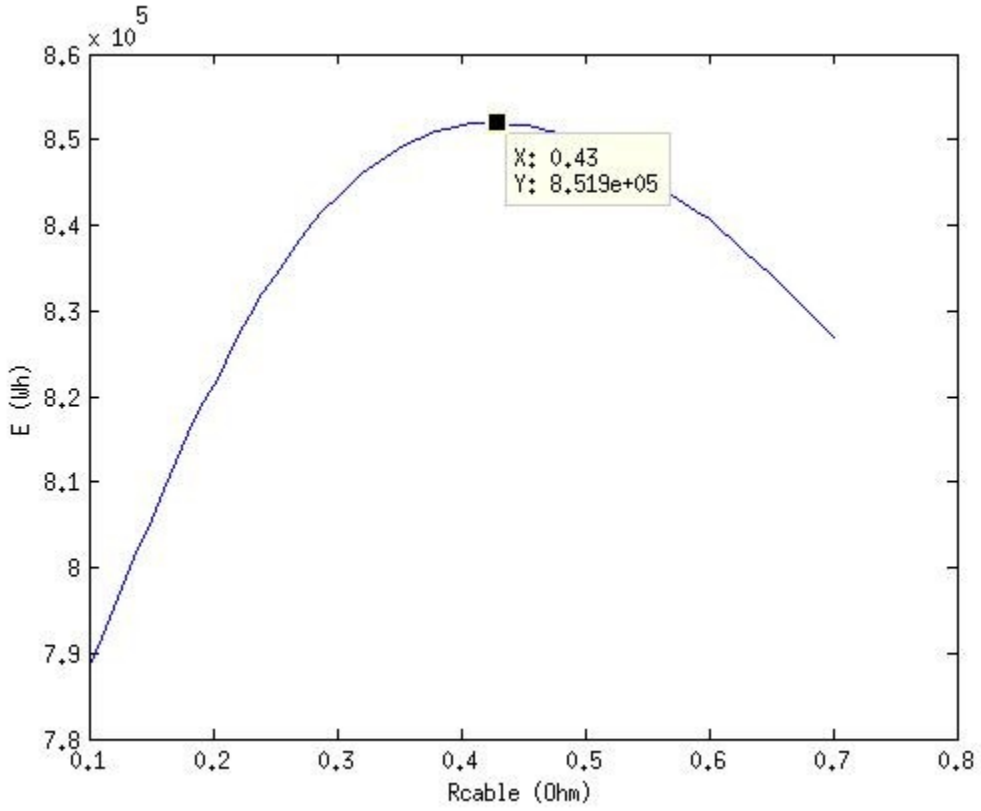
Όπως και στο σύστημα 48V παρατηρούμε ότι η ΗΕΔ της γεννήτριας είναι ανάλογη των στροφών της και επίσης ότι η τάση του ανορθωτή είναι ίση με αυτή της ΗΕΔ μέχρι τις cut-in στροφές οι οποίες και σε αυτή την περίπτωση παραμένουν ίσες με 228 RPM. Η ισοδύναμη τάσης ανορθωτή – μπαταρίας V_{eq} είναι μεγαλύτερη απο απο τη τάση των συσσωρευτών και την πτώση τάσης στην εσωτερική αντίσταση της γεννήτριας, ενώ και εδώ η V_{dc} είναι σταθερή και ίση με 24V μέχρι να αρχίσει να ρέει ισχύς στο κύκλωμα ενώ στη συνέχεια αυξάνεται κατά της πτώση τάσης στην εσωτερική αντίσταση της γεννήτριας.

3.2.2.2.1 Μεγιστοποίηση ενεργειακής απόδοσης και επιλογή βέλτιστου καλωδίου σύνδεσης

Η διαδικασία που ακολουθείται με σκοπό τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης καθώς και το θεωρητικό υπόβαθρο αυτής έχει ήδη αναλυθεί κατά την ανάλυση του συστήματος 48V.

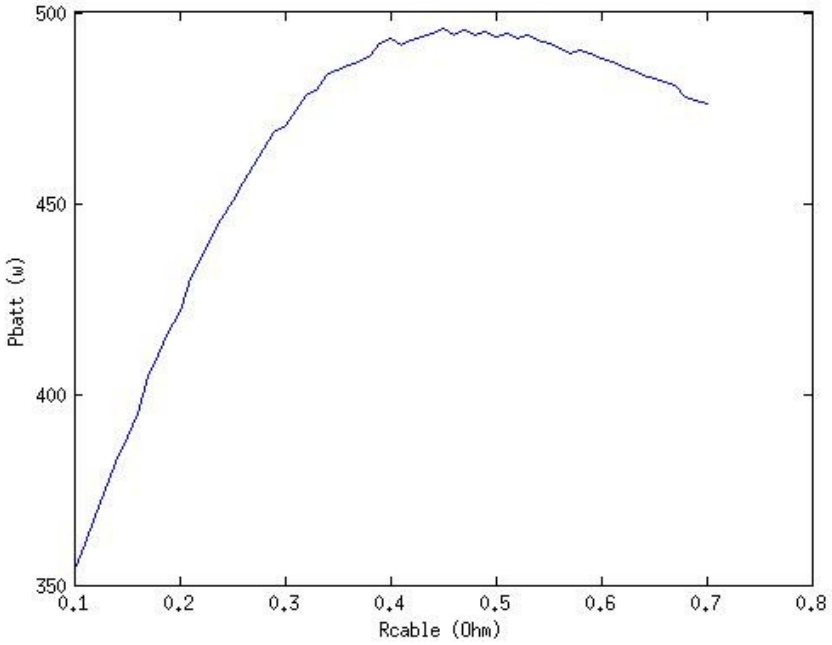
Στην περίπτωση της σύνδεσης σε συσσωρευτές 24V θέλουμε μικρότερη πτώση τάσης πάνω στην ισοδύναμη αντίσταση φάσης της γεννήτριας και καλωδίου σύνδεσης μιας και η τάση που απαιτείται για τη λειτουργία σε ονομαστικά μεγέθη και ονομαστικό άνεμο είναι η μισή απο τα 48V. Έχοντας μεταβάλλει ήδη την αντίσταση φάσης της γεννήτριας αναμένουμε αρκετά μικρότερη τιμή απο τα 2,5 Ohm που βρήκαμε στα 48V.

Όντως μετά το πέρας των προσομοιώσεων βέλτιστη τιμή αντίστασης καλωδίου βρέθηκε η R_{cable} = 0,43 Ohm. Αυτό φαίνεται και εποπτικά στην παρακάτω γραφική παράσταση :



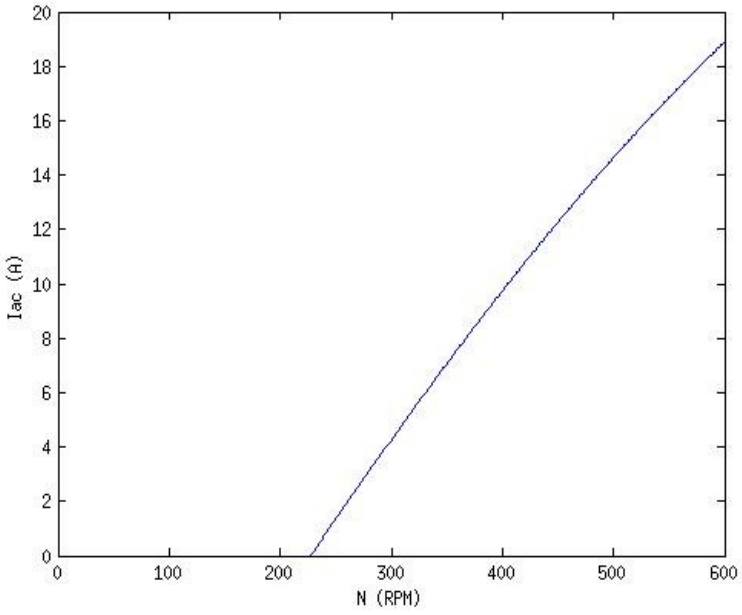
Σχήμα 3.12 Η ενεργειακή απόδοση σε σχέση με τη μεταβολή του καλωδίου σύνδεσης

Η γεννήτρια με αυτή την αντίσταση καλωδίου (αφορά προφανώς το AC κομμάτι της σύνδεσης) αποδίδει 851,85 Kwh και σε ονομαστικές τιμές ανέμου περιστρέφεται με 454 RPM, τιμή χαμηλότερη του ονομαστικού κάτι που είναι λογικό αν δούμε και τις τιμές του αεροδυναμικού συντελεστή Cp καθώς και του λ. Έχουμε Cp = 0,31 και λ = 5,7 ενώ στο κύκλωμα ρέει ρεύμα I_{ac} = 12,46 A. Για την ισχύ που απορροφούν οι συσσωρευτές έχουμε ότι P_{batt} = 493,66 W τιμή αρκετά ικανοποιητική για το μοντέλο που χρησιμοποιούμε.

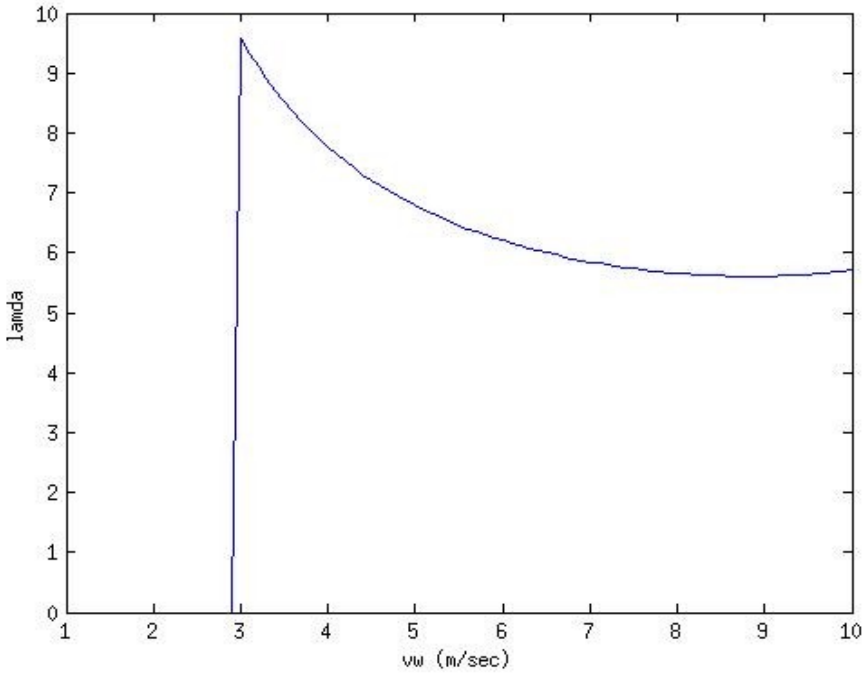


Σχήμα 3.13 Η ισχύς που απορροφούν οι συσσωρευτές σε σχέση με την αντίσταση του καλωδίου σύνδεσης

Έχοντας επιλέξει ήδη την κατάλληλη αντίσταση καλωδίου σύνδεσης παρουσιάζουμε για αυτή την τιμή μεγέθη της γεννήτριας όπως το ρεύμα αλλά και τη σχέση αεροδυναμικού συντελεστή και λ με τις στροφές και την ταχύτητα ανέμου. Επίσης παρουσιάζονται γραφικές που δείχνουν τη σχέση απωλειών με τις στροφές κατά τη βέλτιστη λειτουργία της ανεμογεννήτριας.

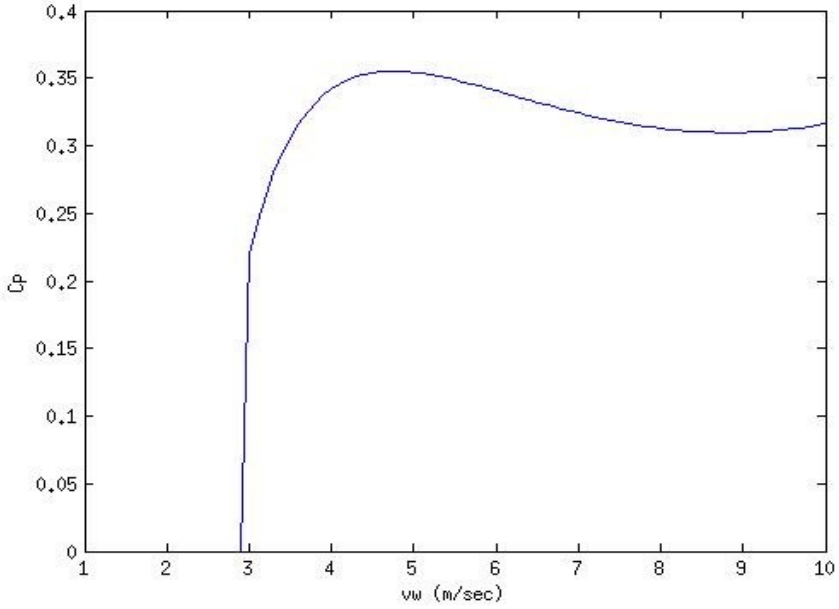


Σχήμα 3.14 Το Iac σε σχέση με τις στροφές της γεννήτριας

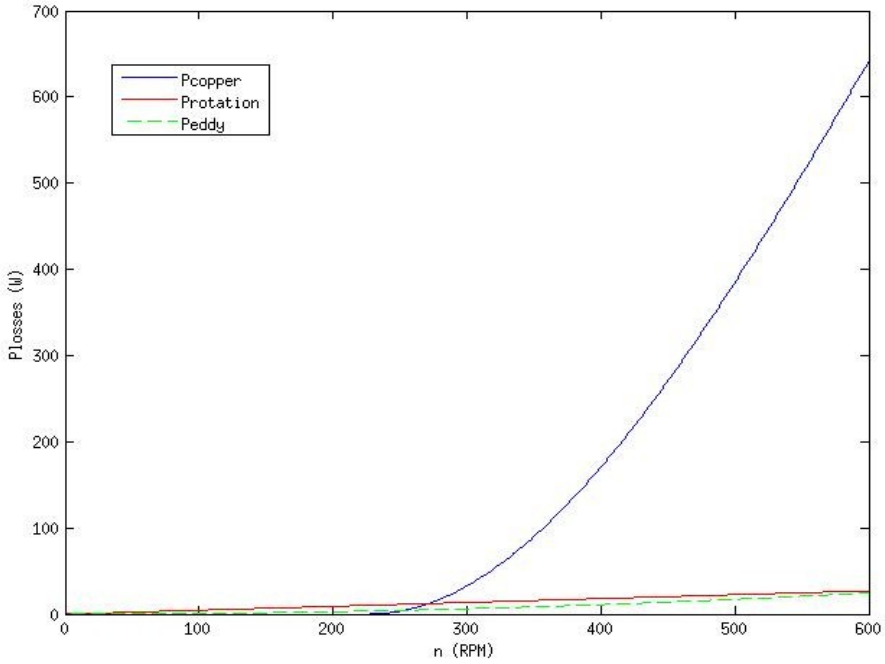


Σχήμα 3.15 Το λ συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου για βέλτιστη τιμή αντίστασης καλωδίου

Βλέπουμε λοιπόν ότι το λ στην cut-in ταχύτητα ανέμου που είναι τα 3 m/sec ξεκινά με τιμή αρκετά ψηλή και αξιοποιώντας τη βέλτιστη τιμή αντίστασης στα 10 m/sec πιάνει τη τιμή 5,7 που είναι και η καλύτερη δυνατή για το τρόπο σύνδεσης που εξετάζουμε.

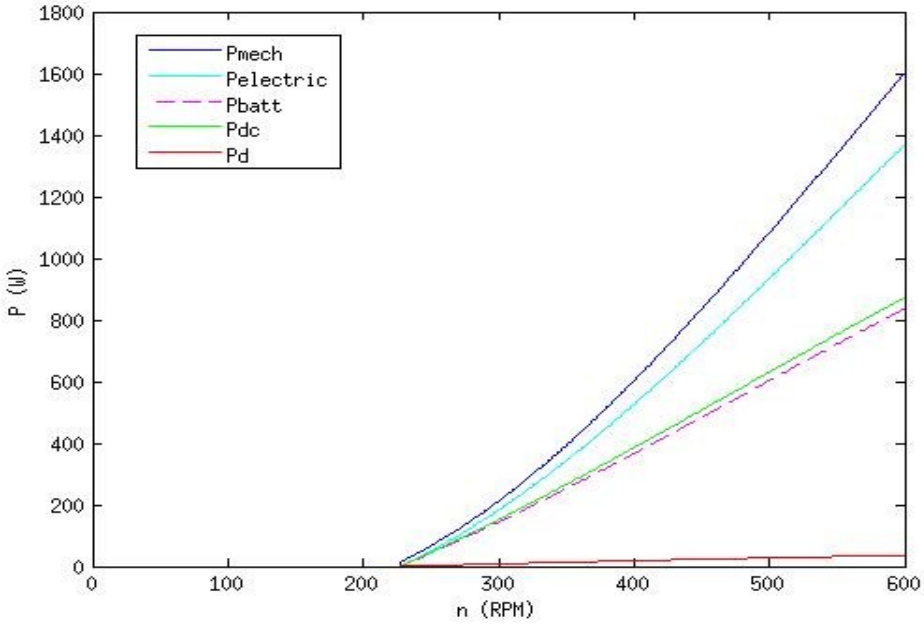


Σχήμα 3.16 Το Cp συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου



Σχήμα 3.17 Οι απώλειες του συστήματος σε σχέση με τις στροφές της γεννήτριας

Είναι προφανές ότι και στο σύστημα 24V οι μεγαλύτερες απώλειες θα είναι αυτές των απωλειών χαλκού ενώ οι απώλειες περιστροφής αλλά και δινορευμάτων μένουν σχεδόν σταθερές με τη μεταβολή των στροφών αλλά και σε πολύ χαμηλά επίπεδα σε σχέση με τις απώλειες χαλκού του συστήματος.



Σχήμα 3.18 Οι ισχείς που παρουσιάζονται στα διάφορα κομμάτια του κυκλώματος

Το παραπάνω σχήμα παρουσιάζει με απλό και εποπτικό τρόπο ,τη διαδικασία έγχυσης ισχύος στο σύστημα. Η P_{mech} είναι η μηχανική ισχύς του συστήματος που προκύπτει μετά τη μετατροπή της αεροδυναμικής ισχύος "μέσω" του αεροδυναμικού συντελεστή Cp. Στη συνέχεια μετά τις απώλειες χαλκού στο τύλιγμα της γεννήτριας αλλά και τις απώλειες περιστροφής και δινορευμάτων έχουμε την ηλεκτρική ισχύ $P_{electric}$, ενώ μετά τις απώλειες χαλκού στο καλώδιο έχουμε την ισχύ που βλέπει το ισοδύναμο κύκλωμα ανορθωτής – μπαταρία P_{dc} .

Τέλος μετά την αφαίρεση των απωλειών του ανορθωτή P_{d} προκύπτει η ισχύς που φτάνει στους συσσωρευτές P_{batt} . Έτσι προκύπτει και η απόδοση α = $\frac{P_{batt}}{P_{mech}}$ που προκύπτει σχεδόν 58% τιμή βελτιωμένη σε σχέση με το σύστημα 48V και αρκετά καλή για σύνδεση απευθείας σε συσσωρευτές.

Όσον αφορά στη διαδικασία επιλογής καλωδίου θα ακολουθήσουμε διαδικασία όμοια με αυτή του συστήματος 48V. Για μεταβλητό μήκος καλωδίου (20-150 m) θα υπολογίσουμε με βάση τον τύπο $R_{cable} = p\frac{l}{S}$ τη θεωρητική διατομή καλωδίου που απαιτείται για να έχουμε κάθε φορά αντίσταση καλωδίου ίση με 0,43 Ohm. Έτσι έχουμε :

Μήκος Καλωδίου (m)	Θεωρητική τιμή διατομής (mm^2)
20	0,817
30	1,230
40	1,630
50	2,040
60	2,450
70	2,860
80	3,270
90	3,680
100	4,090
110	4,490
120	4,900
130	5,310
140	5,720
150	6,130

Πίνακας 3.11 Η θεωρητική τιμή της διατομής του καλωδίου που θα θέλαμε για να επιτύχουμε στα εκάστοτε μήκη βέλτιστη τιμή αντίστασης R_{cable} = 0,43 Ohm

Το μέγιστο ρεύμα που ρέει στο σύστημά μας είναι 12,46 Α. Επομένως για να υπολογίσουμε το εμπορικό καλώδιο που θα επιλέξουμε για τη σύνδεση του συστήματος μας θα πρέπει να έχουμε υπ'

όψιν τις ριπές του ανέμου που μέχρι να μπεί το σύστημα furling και να περιορίσει της ισχύ της ανεμογεννήτριας μπορεί να τριπλασιάσουν την τιμή του μέγιστου ρεύματος για λίγα δευτερόλεπτα. Επομένως θα πρέπει να βρούμε καλώδιο που να αντέχει μέγιστο ρεύμα περίπου 37 Α. Σύμφωνα με τον πίνακα 3.3 θα επιλέξουμε καλώδιο με διατομή 6 mm^2 , το οποίο αντέχει 33 Α, θεωρώντας ότι το χρονικό διάστημα που θα πιάσει τα 37 Α θα είναι τόσο μικρό που δε θα προλάβει να κάνει ζημιά είτε στη μόνωση του καλωδίου είτε στον αγωγό.

Συνεπώς για το εκάστοτε μήκος καλωδίου με γνωστή διατομή βρίσκουμε την αντίσταση του καλωδίου σύνδεσης :

Μήκος Καλωδίου (m)	Αντίσταση για εμπορική τιμή (Ohm)
20	0,059
30	0,089
40	0,117
50	0,146
60	0,176
70	0,205
80	0,234
90	0,264
100	0,293
110	0,322
120	0,352
130	0,381
140	0,410
150	0,439

Πίνακας 3.12 Αντίσταση καλωδίου διατομής 6 mm^2 για το εκάστοτε μήκος

Στη συνέχεια υπολογίζουμε για τις παραπάνω αντιστάσεις, επομένως και για τα αντίστοιχα μήκη τις ενεργειακές αποδόσεις που παρουσιάζει το σύστημά μας καθώς και την ισχύ που φτάνει στους συσσωρευτές για κάθε τιμή μήκους, άρα και αντίστασης.

Μήκος Καλωδίου (m)	Αντίσταση για εμπορική τιμή (Ohm)	Ε για αντίστοιχη εμπορική (kWh)
20	0,059	772,70
30	0,089	783,95
40	0,117	794,09
50	0,146	804,44
60	0,176	817,37
70	0,205	822,78
80	0,234	830,38
90	0,264	837,21
100	0,293	842,29
110	0,322	846,22
120	0,352	849,22
130	0,381	850,97
140	0,410	851,83
150	0,439	851,69

Πίνακας 3.13 Η ενεργειακή απόδοση για τα μήκη καλωδίου και τις αντιστάσεις του πίνακα 3.12

Μήκος Καλωδίου (m)	Ε για αντίστοιχη εμπορική (kWh)	Ποσοστό % επί της Emax
20	772,70	90,71
30	783,95	92,03
40	794,09	93,22
50	804,44	94,43
60	817,37	95,95
70	822,78	96,59
80	830,38	97,48
90	837,21	98,28
100	842,29	98,88
110	846,22	99,34
120	849,22	99,69
130	850,97	99,90
140	851,83	100,00
150	851,69	99,98

Πίνακας 3.14 Ποσοστό επί της μέγιστης τιμής απόδοσης E_{max} = 851,85 kWh

Ήδη παρατηρούμε τις αρκετά υψηλές τιμές απόδοσης που επιτυγχάνουμε με τη σύνδεση του καλωδίου διατομής 6 mm^2 για όλες τις τιμές μήκους και μάλιστα στα 140 m πετυχαίνουμε το 100% της μέγιστης ενεργειακής απόδοσης. Αυτό δηλώνει ότι το σύστημά μας αν συνδεθεί σε σύστημα 24V και φυσικά με κατάλληλη διαστασιολόγηση της γεννήτριας, θα λειτουργεί εξαιρετικά σε όλα τα μήκη απο 20 εώς 150 m.

Μήκος Καλωδίου (m)	Ισχύς Μπαταριών (W)
20	325,31
30	346,37
40	366,75
50	384,63
60	406,77
70	427,73
80	444,00
90	458,33
100	469,46
110	477,11
120	486,17
130	490,24
140	491,61
150	495,26

Πίνακας 3.15 Η ισχύς των μπαταριών σε σχέση με το μήκος καλωδίου σύνδεσης (AC κομμάτι)

Μήκος Καλωδίου (m)	Αντίσταση για εμπορική τιμή (Ohm)	Ε για αντίστοιχη εμπορική (kWh)	Στροφές στα 10 m/sec (RPM)
20	0,059	772,70	316
30	0,089	783,95	326
40	0,117	794,09	337
50	0,146	804,44	349
60	0,176	817,37	362
70	0,205	822,78	374
80	0,234	830,38	386
90	0,264	837,21	398
100	0,293	842,29	409
110	0,322	846,22	420
120	0,352	849,22	430
130	0,381	850,97	439
140	0,410	851,83	448
150	0,439	851,69	456

Πίνακας 3.16 Συγκεντρωτικός πίνακας με τις στροφές του συστήματος στα 10 m/sec

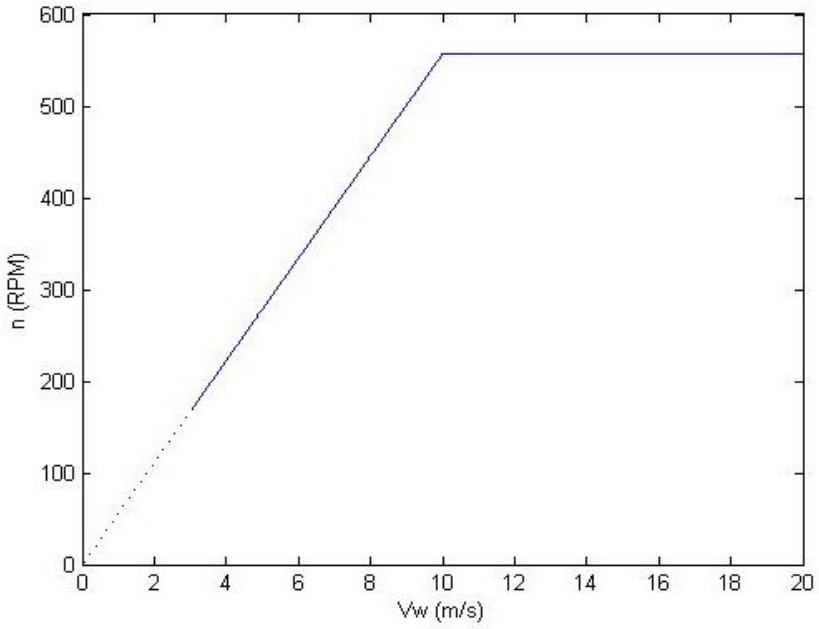
Τέλος θα προσθέσουμε και το DC κομμάτι στην ανάλυσή μας. Με βάση τον τύπο $I_{dc} = \frac{(3\sqrt{2})}{\pi} I_{ac}$, μετά την ανόρθωση θα έχουμε ρεύμα περίπου 1,35 φορές μεγαλύτερο. Οπότε το καλώδιο σύνδεσης θα πρέπει να προσαρμοστεί ανάλογα. Επομένως το καλώδιο μας θα πρέπει να αντέχει μέχρι περίπου 50 A (37 *1,35). Όπως και προηγουμένως θεωρώντας ότι τα 50 A θα τα πιάσουμε για ελάχιστο χρονικό διάστημα μέχρι να φρενάρει το furling τη γεννήτρια επιλέγουμε καλώδιο διατομής 10 mm^2 το οποίο αντέχει με ασφάλεια περίπου 45 A. Έτσι προκύπτει ότι η αντίσταση του καλωδίου σύνδεσης για το DC κομμάτι για μήκος έστω 2 m είναι R_{dc} = 0,00703 Ohm, τιμή αρκετά χαμηλή η οποία δεν επηρεάζει σημαντικά τα προηγούμενα αποτελέσματα και επομένως δε προκύπτει η ανάγκη υπολογισμού εξ' αρχής των αποτελεσμάτων τόσο για την ενεργειακή απόδοση όσο και για την ισχύ των συσσωρευτών.

3.2.2.3 Σύνδεση με σύστημα μεγιστοποίησης ισχύος (MPPT)

Στην περίπτωση της DC σύνδεσης είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν αντιστροφείς οι οποίοι αξιοποιούνται για το σύστημα μεγιστοποίησης ισχύος. Οι αντιστροφείς αυτοί είναι σχετικά περιορισμένοι στην αγορά και επί τω πλείστω χρησιμοποιούνται για την περίπτωση της AC σύνδεσης. Παρ'όλα αυτά η διαδικασία για την DC σύνδεση είναι όμοια με των παραπάνω κεφαλαίων, αλλάζοντας φυσικά τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας.

Επιδιώκουμε λοιπόν να κρατήσουμε σταθερό το λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου για κάθε ταχύτητα ανέμου και ίσο με 7 και αναλόγως θέλουμε ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p να έχει σταθερή τιμή και ίση με 0,35.

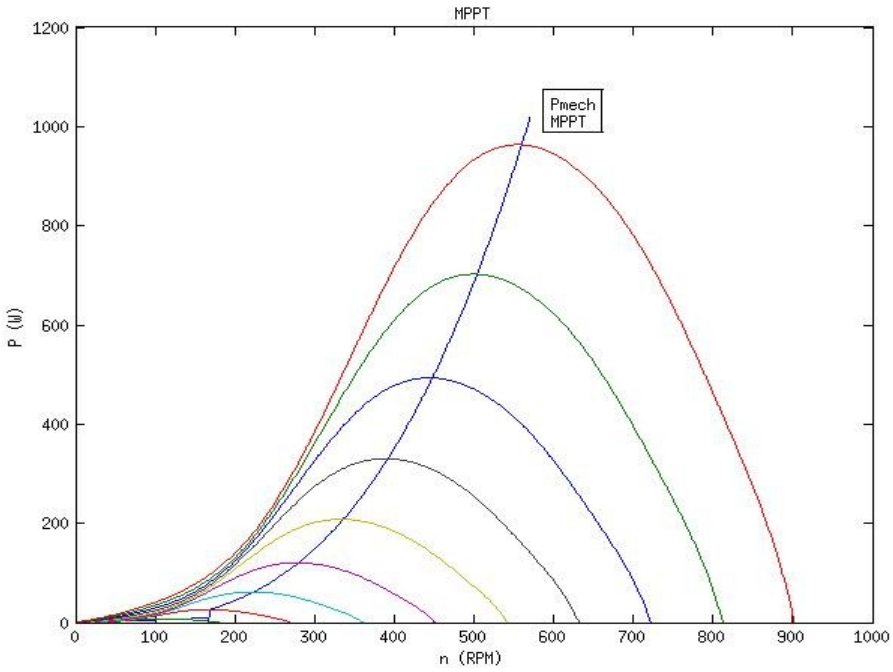
Αρχικά παρουσιάζεται η σχέση των στροφών της γεννήτριας και του ανέμου :



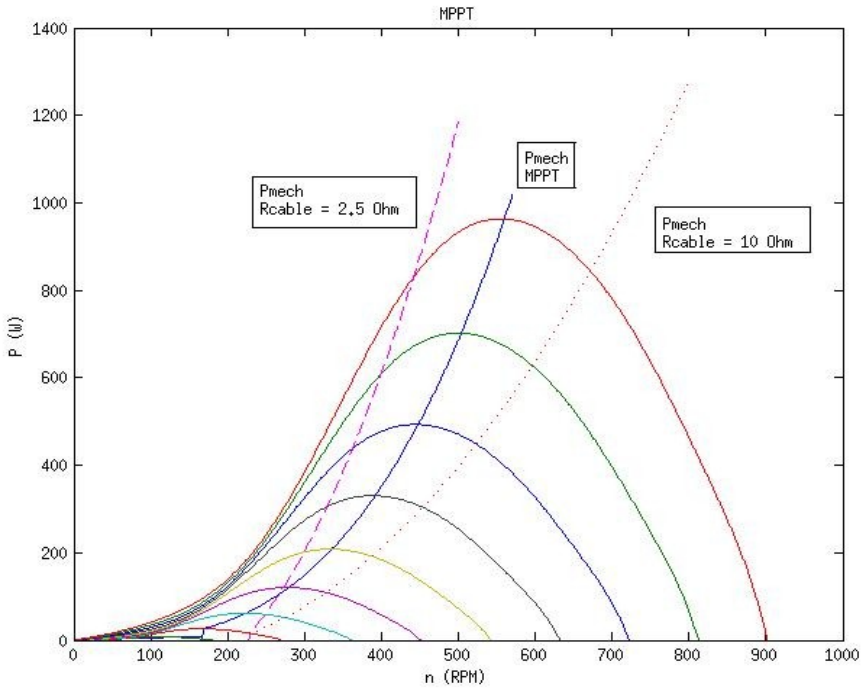
Σχήμα 3.19 Η μεταβολή των στροφών σε σχέση με τον άνεμο για σύνδεση σε σύστημα MPPT

Μετά τα 10 m/sec το σύστημα furling σταθεροποιεί τις στροφές στις ονομαστικές που είναι οι 557, ενώ μέχρι εκείνη την ταχύτητα η σχέση μεταξύ στροφών και ταχύτητας ανέμου είναι γραμμική κάτι που ήταν προφανές και απ την ανάλυση των προηγουμένων κεφαλαίων.

Σε λειτουργία MPPT η ανεμογεννήτρια απορροφά τη μέγιστη αεροδυναμική ισχύ. Επομένως για κάθε τιμή ανέμου και η μηχανική ισχύς στην είσοδο της ανεμογεννήτριας θα είναι μέγιστη. Στην επόμενη γραφική παράσταση φαίνονται οι αεροδυναμικές καμπύλες όπως επίσης και η μηχανική ισχύς στην είσοδο της ανεμογεννήτριας, ενώ στη συνέχεια για σύγκριση παρουσιάζεται η ίδια γραφική με επιπλέον καμπύλες την μηχανική ισχύ στην είσοδο για απευθείας σύνδεση σε μπαταρίες, για διάφορες τιμές της αντίστασης καλωδίου.



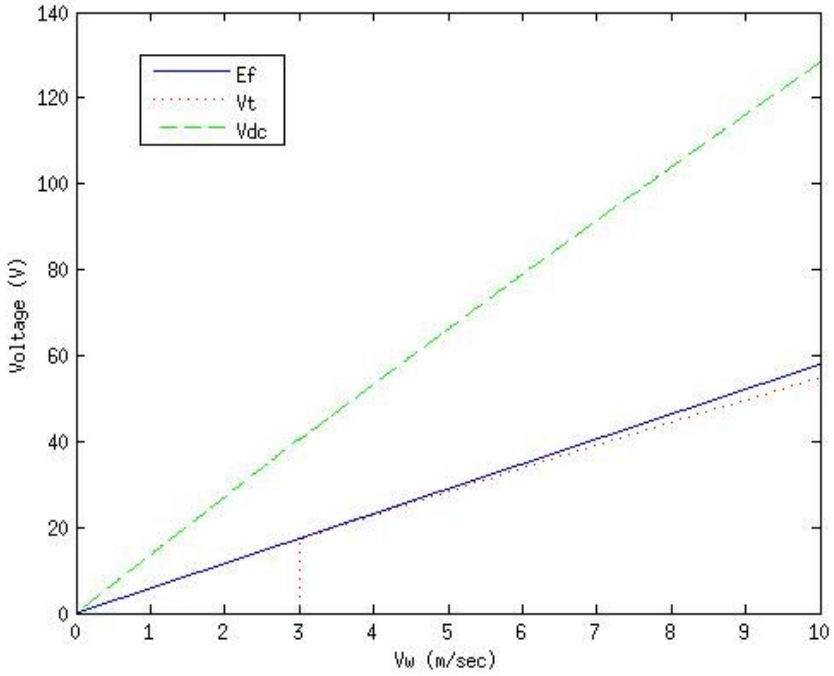
Σχήμα 3.20 Οι αεροδυναμικές καμπύλες και η καμπύλη MPPT, που αποτελεί και χαρακτηριστική ελέγχου



Σχήμα 3.21 Συγκριτική απεικόνιση της καμπύλης MPPT και καμπυλών για απευθείας σύνδεση σε μπαταρίες

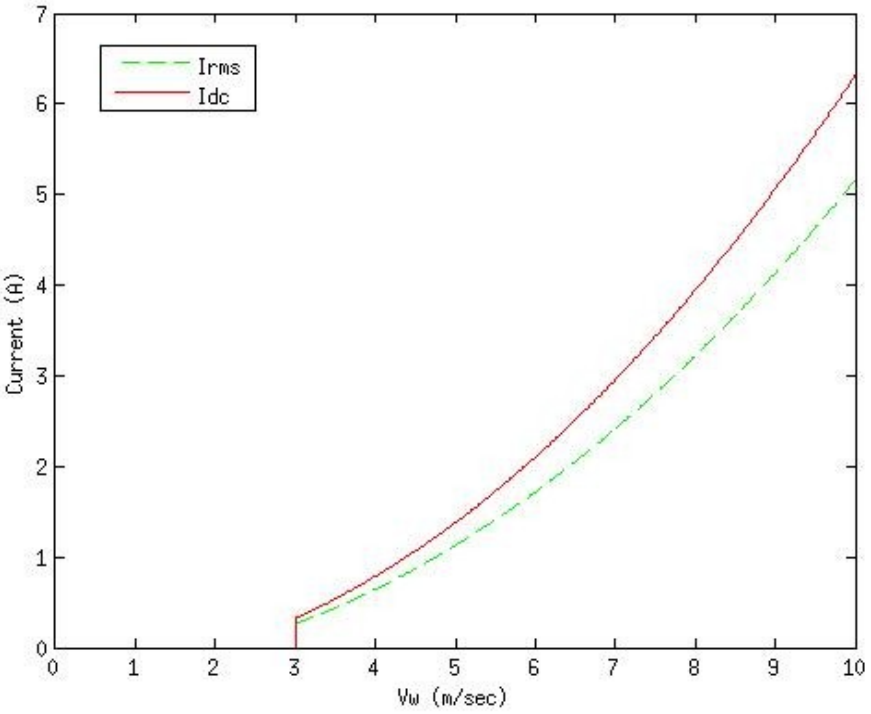
Στις παραπάνω απεικονίσεις φαίνεται ξεκάθαρα η διαφορά μεταξύ ενός συστήματος που λειτουργεί σε απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές (μπαταρίες) και σε λειτουργία MPPT. Η καμπύλη MPPT φαίνεται να περνά απο τα μέγιστα των αεροδυναμικών καμπυλών, ενώ οι άλλες δύο καμπύλες, εκ των οποίων η μία αναφέρεται στην βέλτιστη αντίσταση καλωδίου που υπολογίστηκε στην προηγούμενη παράγραφο, δηλαδή τα 2,5Ohm και η οποία εξασφάλιζε τη μέγιστη ενεργειακή απόδοση καθώς επίσης και ισχύ μπαταριών κοντά στο μέγιστο, φαίνεται να τέμνουν τις καμπύλες του ανέμου σε σημεία που δεν είναι μέγιστα, ή ακόμα πιό σωστά δεν είναι όλα μέγιστα. Η εμπειρική – οπτική απεικόνιση της σημασίας της σύνδεσης σε MPPT των παραπάνω διαγραμμάτων φαίνεται και ποσοτικά καθώς σε σύνδεση MPPT η μέγιστη ενεργειακή απόδοση που επιτυγχάνουμε είναι 1150kWh σε αντίθεση με τη σύνδεση σε μπαταρίες που το μέγιστο που μπορούμε να επιτύχουμε για να είμαστε μέσα στα όρια που έχουν τεθεί είναι 807kWh. Στην ουσία η σύνδεση αυτή επιφέρει μια βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης της τάξης του 42,5% ποσοστό διόλου αμελητέο.

Στη συνέχεια σχεδιάζονται οι καμπύλες των ρευμάτων I_{AC} και I_{DC} καθώς και αυτές των τάσεων και της γωνίας ισχύος :

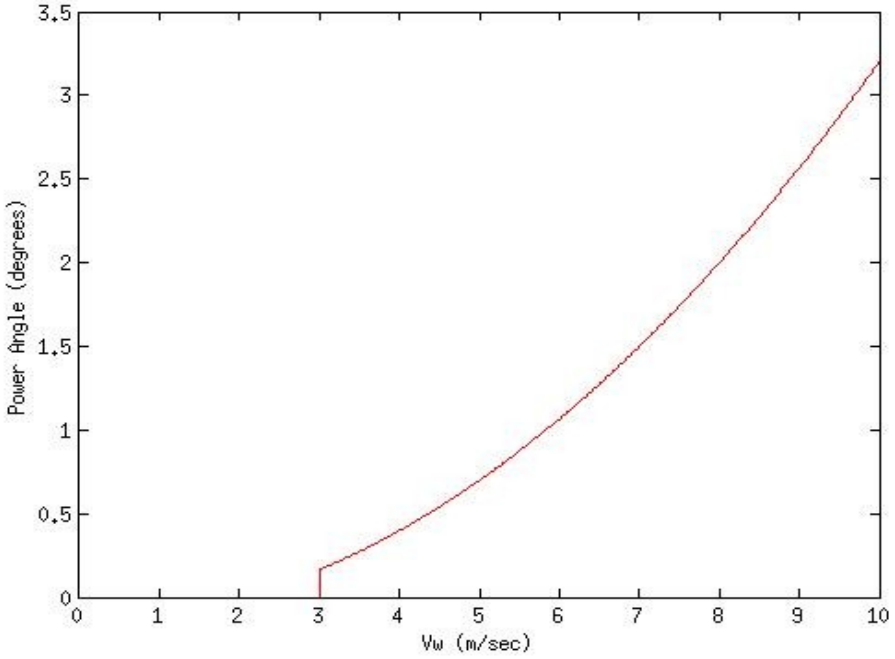


Σχήμα 3.22 Μεταβολές των τάσεων E_f , V_t και V_{dc} σε συνάρτηση με τον άνεμο

Παρατηρούμε εδώ ότι η τερματική τάση V_t είναι λίγο μικρότερη απο την ΗΕΔ , E_f ,καθώς έχουμε πτώση τάσης πάνω στο τύλιγμα της γεννήτριας. Η ονομαστική τερματική τάση για ταχύτητα ανέμου ίση με 10m/sec είναι 54,88V.

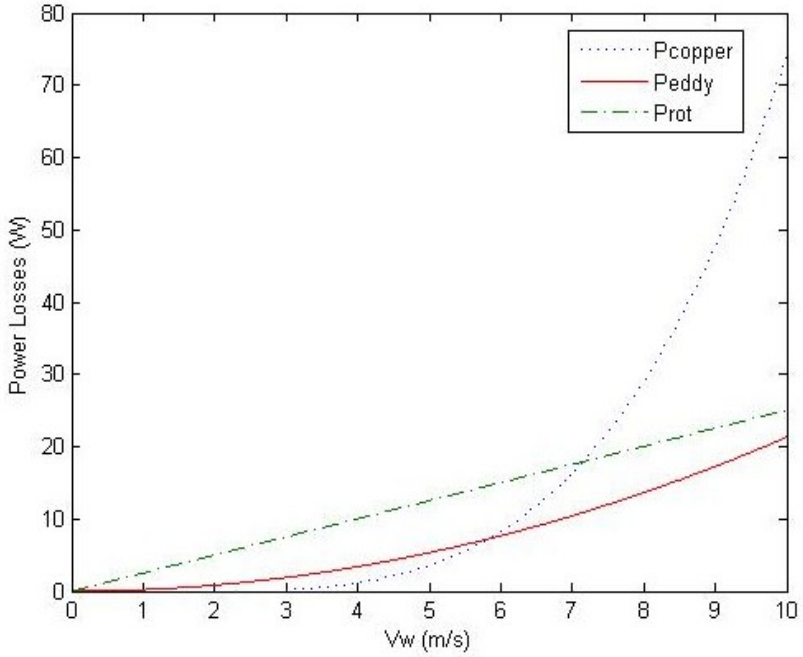


Σχήμα 3.23 Μεταβολές των ρευμάτων σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου για σύνδεση MPPT

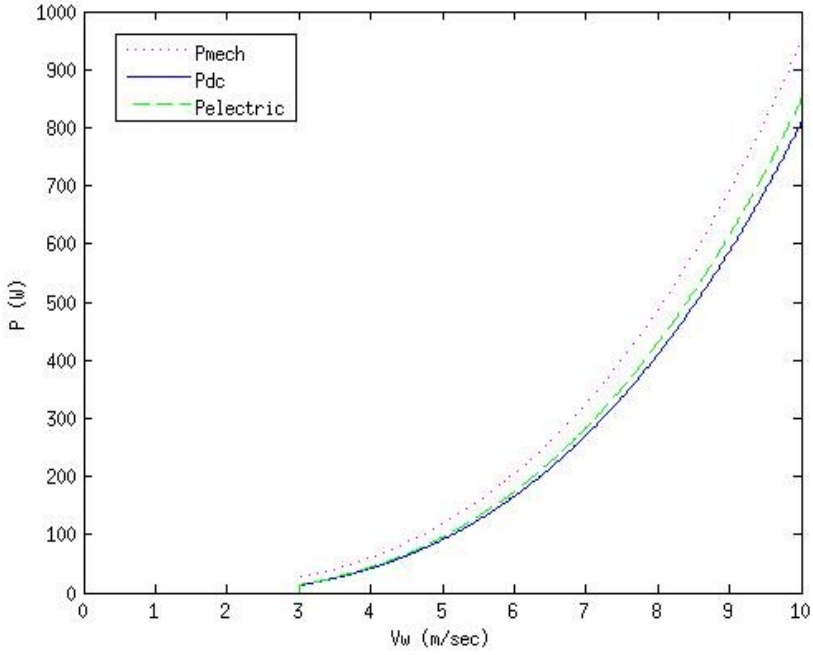


Σχήμα 3.24 Μεταβολή της γωνίας ισχύος σε σχέση με τον άνεμο για σύνδεση σε σύστημα MPPT

Οι μικρές τιμές που παρατηρούνται στο τελευταίο διάγραμμα που απεικονίζει τη μεαβολή της γωνίας ισχύος της γεννήτριας σε σχέση με την ταχύτητα ανέμου για σύνδεση σε σύστημα MPPT είναι αποτέλεσμα των μικρών τιμών της αυτεπαγωγής του τυλίγματος της γεννήτριας. Επίσης θα παρουσιαστούν και οι καμπύλες που μας δίνουν τη σχέση των απωλειών σε σε συνάρτηση με την ταχύτητα ανέμου :



Σχήμα 3.25 Η μεταβολή των απωλειών του συστήματος σε σχέση με την ταχύτητα ανέμου



Σχήμα 3.26 Η μεταβολή της ισχύος του συστήματος για σύνδεση σε MPPT

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι πλέον η απορρόφηση ισχύος της μπαταρίας είναι 810W σε αντίθεση με την απορρόφηση ισχύος στην απευθείας σύνδεση σε μπαταρίες η οποία ήταν 416W, δηλαδή έχουμε αύξηση της τάξης του 94,7% ποσοστό αρκετά εντυπωσιακό που δείχνει την επίδραση του συστήματος MPPT στη σύνδεση της ανεμογεννήτριας μας σε συσσωρευτές. Μία αξιόλογη προσπάθεια στη συνέχεια με σκοπό να προσεγγίσουμε αυτή τη συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας, είναι η σύνδεση αυτεπαγωγής σε σειρά, διαδικασία που θα αναλυθεί διεξοδικά στην επόμενη παράγραφο.

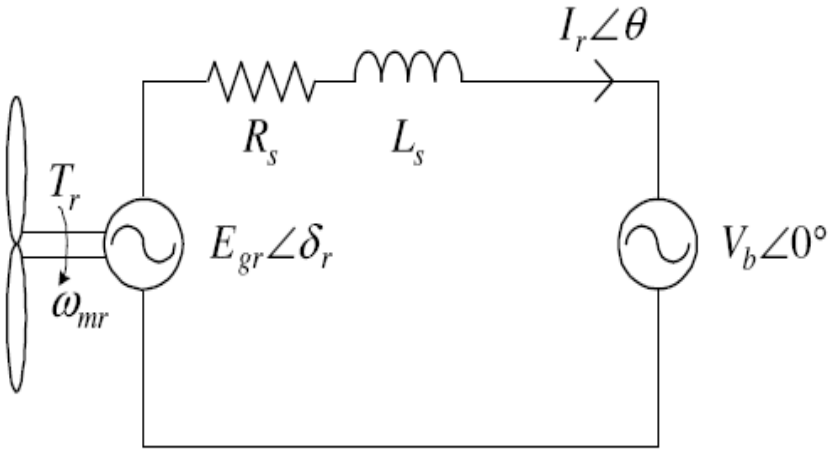
3.2.2.4 Βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης – Σύνδεση αυτεπαγωγής

Στην προηγούμενη παράγραφο έγινε μια συγκριτική μελέτη μεταξύ της σύνδεσης απευθείας σε συσσωρευτές και της σύνδεσης σε σύστημα μεγιστοποίησης ισχύος MPPT. Φάνηκε ξεκάθαρα ότι στη δεύτερη περίπτωση οι δυνατότητες της γεννήτριας αξιοποιούνται σε πολύ καλύτερο και μεγαλύτερο βαθμό. Το μειονέκτημα ειδικά στη περίπτωση αυτόνομης εγκατάστασης, πχ οικίας του συστήματος MPPT είναι κυρίως το κόστος του το οποίο το κάνει σχεδόν απαγορευτικό στην υλοποίησή του. Συνεπώς θα πρέπει να βρεθεί ένας άλλος τρόπος για να βελτιωθεί η ενεργειακή απόδοση ο οποίος να είναι πιο οικονομικός.

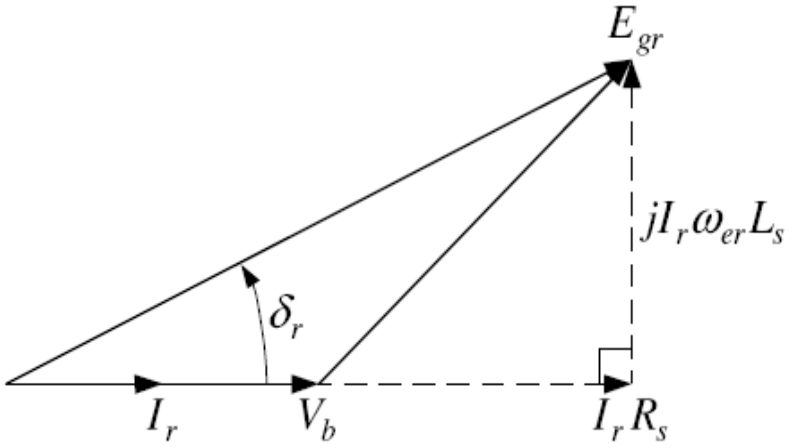
Θα θέλαμε να βρούμε ένα τρόπο στον οποίο η καμπύλη ισχύος του συστήματος να προσεγγίζει αυτή του MPPT. Κάτι τέτοιο είναι δυνατό να συμβεί με την σύνδεση σε σειρά και πρίν τον ανορθωτή μιας αυτεπαγωγής [8]. Στόχος μας είναι να διέρχεται η καμπύλη ισχύος απο το σημείο ονομαστικού ανέμου – ονομαστικών στροφών – μέγιστης ισχύος. Γνωρίζοντας πλέον το σημείο αυτό αλλά και το σημείο cut-in γίνεται η ανάλυση για την εύρεση της κατάλληλης αυτεπαγωγής. Στο σημείο αυτό δε θα πρέπει να ξεχνάμε και τη σημασία του καλωδίου σύνδεσης κατά τη μελέτη μας. Επομένως θα έχουμε να συνυπολογίσουμε δύο παράγοντες οι οποίοι επιδρούν στο σύστημα μας και καθορίζουν εν γένει την ενεργειακή απόδοσης του συστήματος μας. Επίσης θα καταστεί προφανές ότι η τιμή της R_{cable} που θα προκύψει σε αυτό το κομμάτι της έρευνας θα είναι αρκετά διαφορετική απο αυτή της απευθείας σύνδεσης σε συσσωρευτές και αυτό οφείλεται εν πολλοίς στη σύνδεση εν σειρά της αυτεπαγωγής. Επίσης όπως και στην περίπτωση της απεθείας σύνδεσης θα γίνει και οικονομική μελέτη για το σύστημα που θα προκύψει.

3.2.2.4.1 Θεωρητική ανάλυση και προσέγγιση του μοντέλου

Το μοντέλο που θα χρησιμοποιήσουμε στην παρούσα αναλυση θα είναι ίδιο με αυτό της προηγούμενης παραγράφου και η μόνη διαφορά θα είναι η σύνδεση εν σειρά της αυτεπαγωγής μεταξύ της γεννήτριας και του ανορθωτή. Ο υπολογισμός της τιμής της αυτεπαγωγής θα βασιστεί σε δύο σημεία. Το ένα απο τα δύο έχει να κάνει με το σημείο στο οποίο το σύστημα ξεκινά να τροφοδοτεί τους συσσωρευτές. Το άλλο μπορεί να είναι το σημείο ονομαστικής λειτουργίας, για άνεμο 10m/sec ή οποιοδήποτε άλλο σημείο στο οποίο μπορεί να λειτουργήσει η γεννήτρια. Επομένως η ανάλυση στη συνέχεια θα γίνει με χρήση του ισοδύναμου κυκλώματος και του διανυσματικού διαγράμματος όπως αυτά παρουσιάζονται στη συνέχεια :



Σχήμα 3.27 Το ισοδύναμο κύκλωμα του συστήματος



Σχήμα 3.28 Το διανυσματικό διάγραμμα για το παραπάνω μοντέλο

όπου :

$$R_s = R_i + R_{cc} + R_e + R_{ac} \quad (3.1)$$

- R_s - Η συνολική ισοδύναμη αντίσταση του κυκλώματος

- R_i - Η αντίσταση του τυλίγματος της γεννήτριας
- R_{cc} - Η αντίσταση του καλωδίου με το οποίο συνδέεται η γεννήτρια στον ανορθωτή
- R_e - Η αντίσταση της αυτεπαγωγής που θα συνδεθεί
- R_{ac} - Η ισοδύναμη αντίσταση του συστήματος ανορθωτή – μπαταρίας

ενώ θα έχουμε επίσης :

$$L_s = L_i + L_{cc} + L_e \quad (3.2)$$

όπου

- L_s - Η ισοδύναμη αυτεπαγωγή του συστήματος
- L_i - Η αυτεπαγωγή του τυλίγματος της γεννήτριας
- L_{cc} - Η αυτεπαγωγή του καλωδίου με το οποίο συνδέεται η γεννήτρια στον ανορθωτή
- L_e - Η αυτεπαγωγή που θα συνδεθεί

Για να ξεκινήσει το σύστημα μας να δίνει ισχύ στους συσσωρευτές μας θα πρέπει η ΗΕΔ της γεννήτριας (E_f) να ξεπεράσει την ισοδύναμη τάση ανορθωτή – μπαταρίας (V_b).Η τάση αυτή είναι σταθερή και επομένως οι στροφές cut-in δε θα επηρεαστούν απο τη σύνδεση αυτεπαγωγής και θα παραμείνουν σταθερές στις 227RPM. Θεωρώντας στη συνέχεια το δεύτερο σημείο αυτό των ονομαστικών θα έχουμε :

$$\frac{E_{fcutin}}{E_{fnom}} = \frac{n_{cutin}}{n_{nom}} \rightarrow E_{fnom} = V_b \frac{n_{nom}}{n_{cutin}} \quad (3.3)$$

Ενώ αν θεωρήσουμε μηδενικές απώλειες αερισμού υπολογίζουμε την αεροδυναμική ισχύ :

$$P_{air} = 3 E_f I_{rms} \cos\delta \quad (3.4)$$

και απο το διανυσματικό διάγραμμα έχουμε :

$$\cos\delta = \frac{(V_b + I_{rms} R_s)}{E_f} \quad (3.5)$$

$$sin\delta = \frac{(I \ \omega L)}{\frac{rms \ e \ s}{E}} \quad (3.6)$$
$$f$$

όπου

$$\omega = \frac{(2\pi n)}{60} \frac{poles}{2} \quad (3.7)$$
$$e$$

Επομένως αντικαθιστώντας την (3.5) στην (3.4) και λύνοντας το τριώνυμο θα έχουμε :

$$I = \frac{(\sqrt{V^2 + \frac{4}{3} R P} - V)}{(2R)} \quad (3.8)$$
$$rms \quad b \quad s \ air \quad b \quad s$$

Με δεδομένη την ισχύ και την ισοδύναμη αντίσταση,το ρεύμα είναι πλέον γνωστό. Με αντικατάστση λοιπόν των σχεσεων (3.3) , (3.6) και (3.7) στην (3.4) θα έχουμε τελικά

$$L = \frac{(60V)}{(poles \pi \ n)} \frac{sin\delta}{I} - L - L \quad (3.9)$$
$$e \quad b \quad cutin \quad rms \quad cc \quad i$$

όπου πλέον η γωνία δ υπολογίζεται απο τις παραπάνω σχέσεις και η ΗΕΔ και το ρεύμα είναι επίσης γνωστά.

3.2.2.4.2 Προσομοίωση μοντέλου συνδεδεμένου σε συσσωρευτές 48V

Έχοντας προσεγγίσει απο θεωρητική σκοπιά το μοντέλο μας, προχωρήσαμε στην συγγραφή προγραμμάτων στο Matlab που να προσομοιώνουν αυτή ακριβώς τη συμπεριφορά κατά τη σύνδεση αυτεπαγωγής σε σειρά. Ήδη στην αρχή της ενότητας αυτής θίχτηκε και το θέμα της αντίστασης του καλωδίου σύνδεσης μεταξύ της γεννήτριας και του ανορθωτή (AC κομμάτι) αλλά και του καλωδίου μεταξύ του ανορθωτή και των συσσωρευτών (DC κομμάτι). Είναι προφανές και με βάση την προηγούμενη ενότητα ότι το κομμάτι που αφορά στα καλώδια σύνδεσης είναι καταλυτικό για την

ενεργειακή και όχι μόνο συμπεριφορά της γεννήτριας και επομένως δε μπορεί σε καμία περίπτωση να μην εξετάζεται, ανεξαρτήτως τρόπου σύνδεσης και λοιπών χαρακτηριστικών του κυκλώματος.

Η πορεία που θα ακολουθήσουμε στη συνέχεια θα είναι ίδια με αυτή της ενότητας της απευθείας σύνδεσης σε συσσωρευτές με τη μόνη διαφορά ότι πλέον δε θα αλλάζει μόνο η τιμή της αντίστασης του καλωδίου σύνδεσης αλλά και η τιμή της αυτεπαγωγής. Επομένως για κάθε τιμή της αντίστασης καλωδιου, σαρώνουμε ταυτόχρονα και μια περιοχή τιμών για την αυτεπαγωγή και υπολογίζουμε αρκετά μεγέθη της γεννήτριας όπως ρεύμα, ισχύ, στροφές σε ονομαστικές τιμές ανέμου (10 m/sec), ηλεκτρική και μηχανική ισχύ καθώς και την ισχύ που απορροφούν οι μπαταρίες. Τέλος υπολογίζεται και η αντίστοιχη ενεργειακή απόδοση του συστήματος καθώς και η απόδοση εν γένει.

Το κριτήριο σύμφωνα με το οποίο επιλέγεται η βέλτιστη τιμή αυτεπαγωγής και καλωδίου είναι προφανώς η μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης έχοντας ως όριο για το λ την τιμή 8 [10], καθώς και για το Cp την τιμή 0,35. Ουσιαστικά λοιπόν κοιτάμε να μεγιστοποιήσουμε την ενεργειακή μας απόδοσης δίχως να ξεπεράσουμε ταυτόχρονα τα όρια που έχουν τεθεί για το λ κυρίως, το Cp αλλά και τις στροφές της γεννήτριας, αν και στην ουσία αυτό συνδέεται άμεσα με τις τιμές του λ και του Cp.

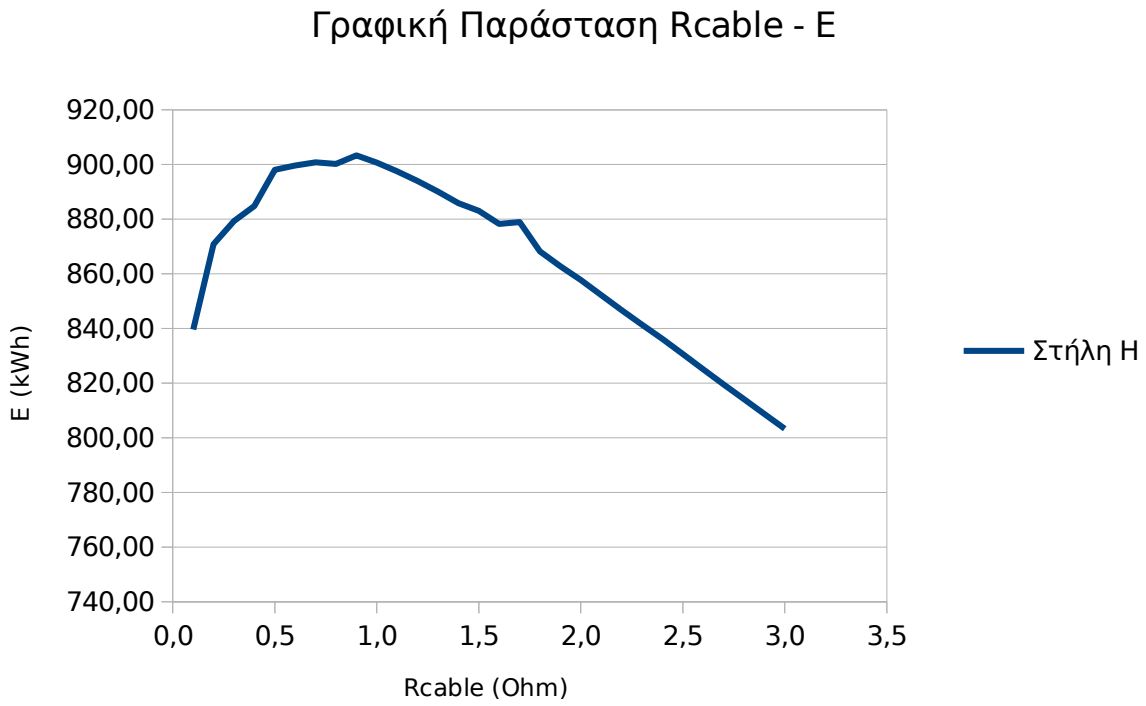
Πιο συγκεκριμένα και με βάση τα παραπάνω προκύπτει ο παρακάτω πίνακας ο οποίος διαβάζεται ως εξής :

Σαρώνουμε τις τιμές της αντίστασης καλωδίου απο 0,1 Ohm– 3,0 Ohm και για κάθε τιμή της αντίστασης σαρώνουμε τις τιμές της αυτεπαγωγής απο 1 mH – 16 mH. Για να πετύχουμε τη μέγιστη ενεργειακή απόδοση όπως αυτή φαίνεται στη στήλη 8, μένοντας εντός ορίων όσον αφορά στο λ και το Cp, τότε θα πρέπει να έχουμε αντίσταση καλωδίου σύνδεσης με τιμή αυτή της πρώτης στήλης, τιμή αυτεπαγωγής αυτή της δεύτερης και με δεδομένα αυτά τα δύο μεγέθη, η τιμή του λ και του Cp θα είναι αυτές των στηλών 5 και 6. Επίσης υπολογίζουμε τις τιμές του ρεύματος και της ισχύος που απορροφούν οι μπαταρίες.

Rcable (Ohm)	Le (mH)	N (RPM)	Iac (A)	Cp	λ	Pbatt (W)	E (kWh)
0,1	13,0	621	8,82	0,3403	7,8134	612,56	839,64
0,2	13,5	632	8,54	0,3353	7,9477	590,88	870,82
0,3	13,5	627	8,43	0,3377	7,8838	582,92	879,29
0,4	13,5	622	8,33	0,3398	7,8260	575,15	884,84
0,5	14,0	633	8,08	0,3347	7,9610	556,81	898,11
0,6	14,0	629	7,99	0,3366	7,9149	549,53	899,69
0,7	14,0	626	7,89	0,3381	7,8738	542,53	900,82
0,8	14,0	623	7,80	0,3394	7,8376	535,43	900,21
0,9	14,5	634	7,59	0,3344	7,9702	519,75	903,34
1,0	14,5	631	7,50	0,3355	7,9410	513,57	900,70
1,1	14,5	629	7,42	0,3365	7,9155	507,34	897,54
1,2	14,5	628	7,33	0,3374	7,8938	501,06	893,98
1,3	14,5	626	7,25	0,3380	7,8754	495,23	890,12
1,4	14,5	625	7,17	0,3386	7,8603	489,39	885,89
1,5	15,0	635	7,00	0,3338	7,9851	476,69	883,10
1,6	15,0	634	6,93	0,3343	7,9726	471,30	878,29
1,7	15,0	633	6,86	0,3347	7,9626	466,38	879,01
1,8	15,0	633	6,79	0,3335	7,9549	461,01	868,18
1,9	15,0	632	6,72	0,3352	7,9492	456,14	862,75
2,0	15,0	632	6,65	0,3354	7,9455	450,81	857,80
2,1	15,0	632	6,58	0,3354	7,9436	445,99	852,24
2,2	15,0	632	6,51	0,3354	7,9434	441,22	846,80
2,3	15,0	632	6,45	0,3354	7,9446	436,48	841,41
2,4	15,0	632	6,38	0,3353	7,9472	431,78	836,20
2,5	15,0	632	6,33	0,3351	7,9511	427,65	830,66
2,6	15,0	633	6,26	0,3349	7,956	423,04	825,13
2,7	15,0	633	6,21	0,3347	7,9621	419,01	819,57
2,8	15,0	634	6,14	0,3344	7,969	414,50	814,15
2,9	15,0	634	6,09	0,3341	7,9768	410,57	808,72
3,0	15,0	635	6,03	0,3338	7,9854	406,16	803,35

Πίνακας 3.17 Συγκεντρωτικός πίνακας βέλτιστων τιμών αντίστασης και αυτεπαγωγής για την επίτευξη μέγιστης ενεργειακής απόδοσης

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και το επόμενο διάγραμμα που δείχνει τη σχέση μεταξύ της μεταβολής της αντίστασης του καλωδίου και της βέλτιστης ενεργειακής απόδοσης όπως αυτή προκύπτει απο το συνδυασμό τόσο της αντίστασης όσο και της αυτεπαγωγής. Είναι προφανές ότι η καμπύλη μας παρουσιάζει ένα μέγιστο στη τιμή 0,84 Ohm και στη συνέχεια η γενική της τάση είναι φθίνουσα. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος που ο πίνακας 3.17 σταματά την ανάλυση για τιμή αντίστασης καλωδίου R_{cable} = 3 Ohm .



Σχήμα 3.29 Καμπύλη που δείχνει τη μέγιστη ενεργειακή απόδοση σε συνάρτηση με την αντίσταση καλωδίου

Ήδη φαίνεται λοιπόν ότι οι βέλτιστες τιμές μας θα βρίσκονται όσον αφορά στην R_{cable} στην περιοχή 0,8 Ohm – 0,9 Ohm και για την αυτεπαγωγή στην περιοχή 14 mH – 14,5 mH. Πράγματι με μια πιο προσεκτική ανάλυση των παραπάνω περιοχών καταλήγουμε ότι βέλτιστη θεωρητική τιμή αυτεπαγωγής είναι η τιμή :

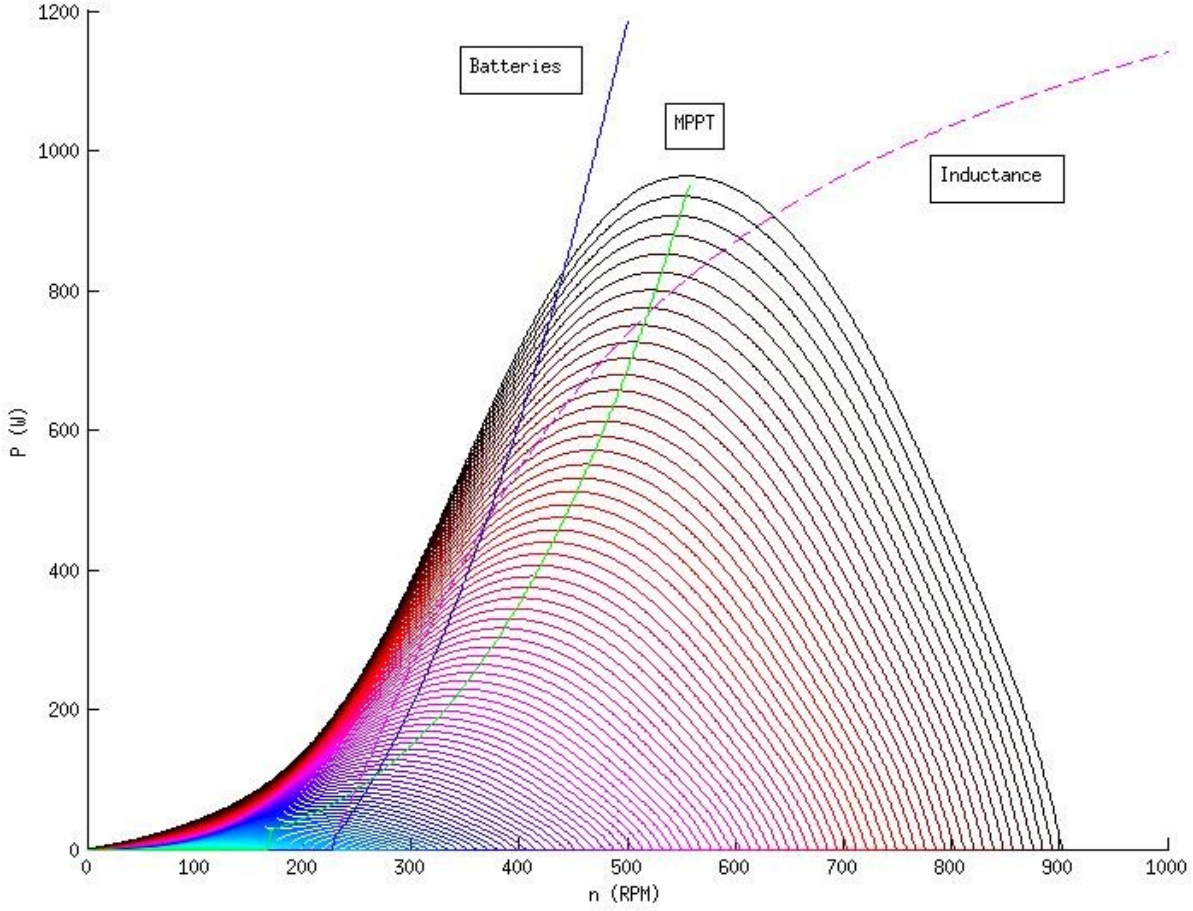
L_e = 14,5 mH (3.10)

ενώ αυτό συμβαίνει για βέλτιστη θεωρητική τιμή αντίστασης καλωδίου σύνδεσης :

R_{cable} = 0,84 Ohm (3.11)

Έτσι λοιπόν με δεδομένες τις παραπάνω τιμές καταλήγουμε σε μία βέλτιστη ενεργειακή απόδοση E_{max} = 904,58 kWh, πετυχαίνοντας αεροδυναμικό συντελεστή Cp = 0,33 και λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου λ = 7,98. Ακόμα έχουμε I_{ac} = 7,64 A και P_{batt} = 523,76 W .

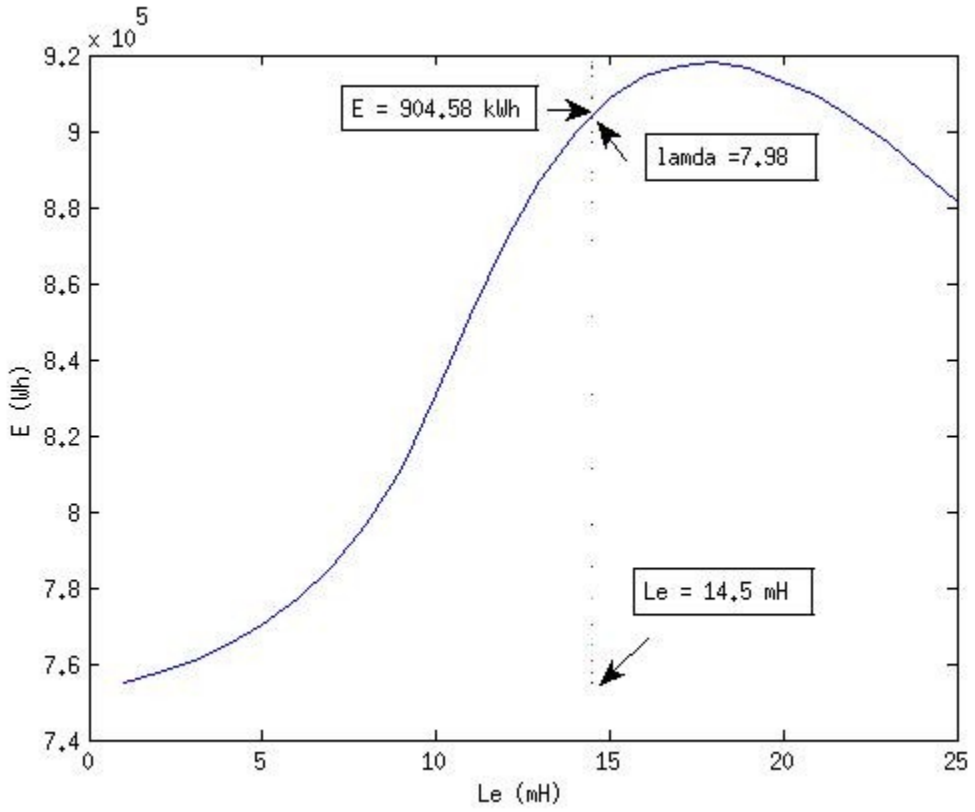
Στο επόμενο γράφημα φαίνονται οι καμπύλες του ανέμου, η καμπύλη ισχύος MPPT, η καμπύλη για βέλτιστη σύνδεση απευθείας σε μπαταρίες και τέλος η καμπύλη ισχύος για σύνδεση με αυτεπαγωγή θεωρώντας τις βέλτιστες τιμές τους.



Σχήμα 3.30 Οι αεροδυναμικές καμπύλες και οι καμπύλες ισχύος για σύνδεση απευθείας σε μπαταρίες, σύνδεση μέσω συστήματος MPPT και τέλος για σύνδεση με αυτεπαγωγή

Ήδη μπορούμε να δούμε ότι με την προσθήκη της αυτεπαγωγής, δουλεύουμε σε στροφές πιο κοντά στις ονομαστικές, ειδικότερα για ταχύτητες μεγαλύτερες απο τη μέση τιμή που έχουμε θεωρήσει, δηλαδή τα 5m/sec. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα και τη μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση αλλά και τη βελτίωση της ισχύος που απορροφούν οι συσσωρευτές αλλά και γενικότερα καλύτερη λειτουργία της ανεμογεννήτριας.

Στο επόμενο διάγραμμα φαίνεται η επίδραση της αλλαγής της αυτεπαγωγής στην ενεργειακή απόδοση, κρατώντας σταθερή της τιμή της αντίστασης του καλωδίου. Εν προκειμένω θα θέσουμε τιμή της αντίστασης καλωδίου τη βέλτιστη δηλαδή τα 0,84 Ohm :

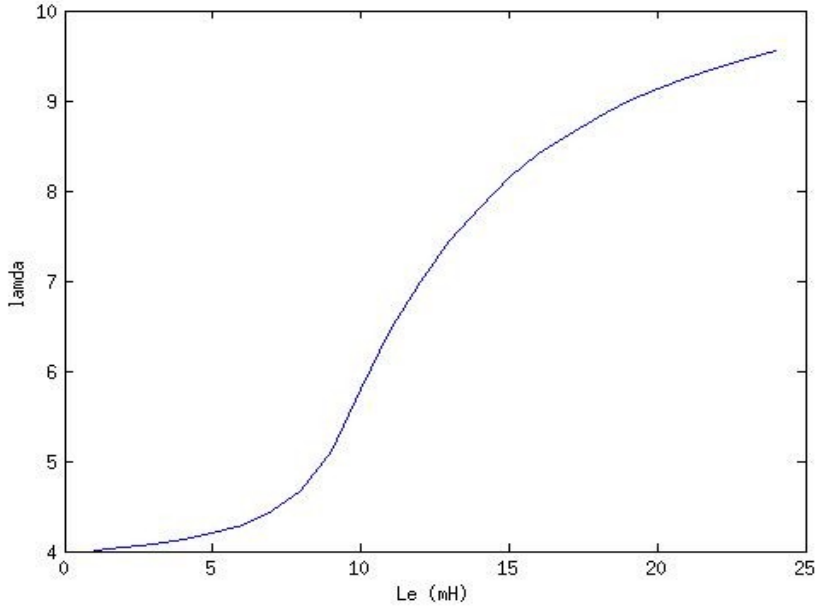


Σχήμα 3.31 Η ενεργειακή απόδοση σε συνάρτηση της τιμής αυτεπαγωγής για R_{cable} = 0,84 Ohm

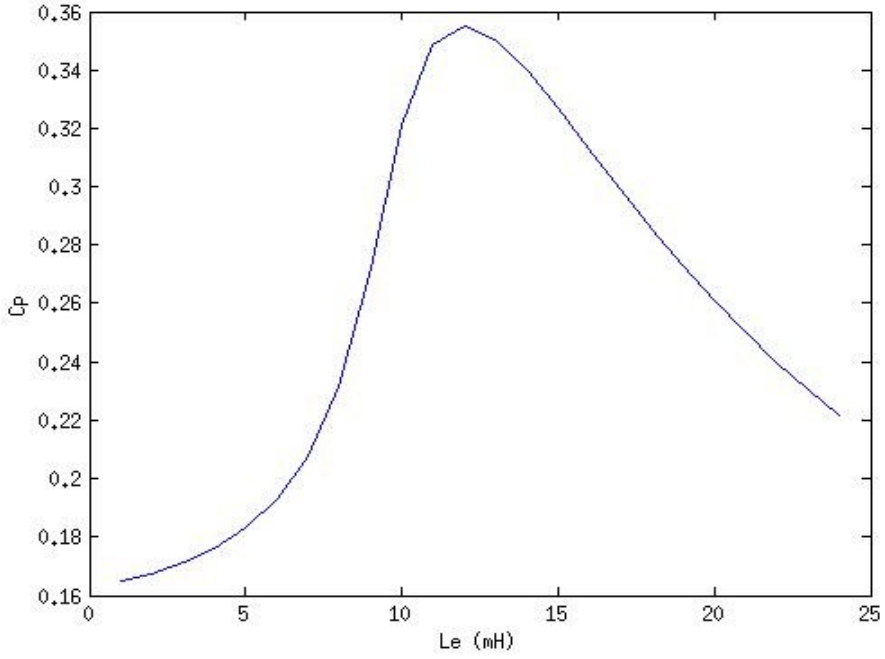
Όπως μπορούμε να δούμε η ενεργειακή απόδοση ακολουθεί αύξουσα πορεία μέχρι 18 mH και στη συνέχεια ακολουθει φθίνουσα πορεία. Το μέγιστο της ενεργειακής απόδοσης είναι κοντά στις 920 kWh. Έχουμε θέσει παρ' όλα αυτά περιορισμούς που αναγκαστικά θα μας κάνουν να επιλέξουμε χαμηλότερη τιμή των 18 mH. Βασικός περιορισμός είναι η τιμή του λ, για το οποίο έχουμ θέσει άνω όριο την τιμή 8. Συνεπώς λοιπόν θα σταματήσουμε την προσωμείωση μας στην τιμή L_e = 14,5 mH καθώς εκεί έχουμε λ =7.98. Είναι προφανές και απο το σχήμα ότι η ενεργειακή απόδοση θα είναι χαμηλότερη της μέγιστης ενώ έχουμε για τις στροφές της γεννήτριας ότι στα 14,5 mH, N = 635, τιμή που ενώ ξεφεύγει αρκετά απο την ονομαστική (N_{nom} = 550) δε μας δημιουργεί σοβαρό πρόβλημα, καθώς κατασκευαστικά η γεννήτρια μπορεί να δουλέψει χωρίς ιδιαίτερες μηχανικές καταπονήσεις στις στροφές που επιτυγχάνονται στα βέλτισα σημεία αυτεπαγωγής και αντίστασης καλωδίου.

Η επόμενη γραφική μας δείχνει την αλλαγή του λ (Tip Speed Ratio – TSR) καθώς μεταβάλλεται η τιμή της αυτεπαγωγής. Επιβεβαιώνουμε λοιπόν και εδώ το γεγονός ότι το λ αυξάνεται σταθερά σε σχέση με την αύξηση της τιμής της αυτεπαγωγής. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την ανάλογη αύξηση των

στροφών της ανεμογεννήτριας, επιβεβαιώνει την επιλογή των τιμή αυτεπαγωγής και αντίστασης που επιλέχτηκαν καθώς η αύξουσα κλίση της αυτεπαγωγής μας περιορίζει το διάστημα έρευνας σε ένα εύρος τιμών αυτεπαγωγής απο 0 – 14,5 mH.

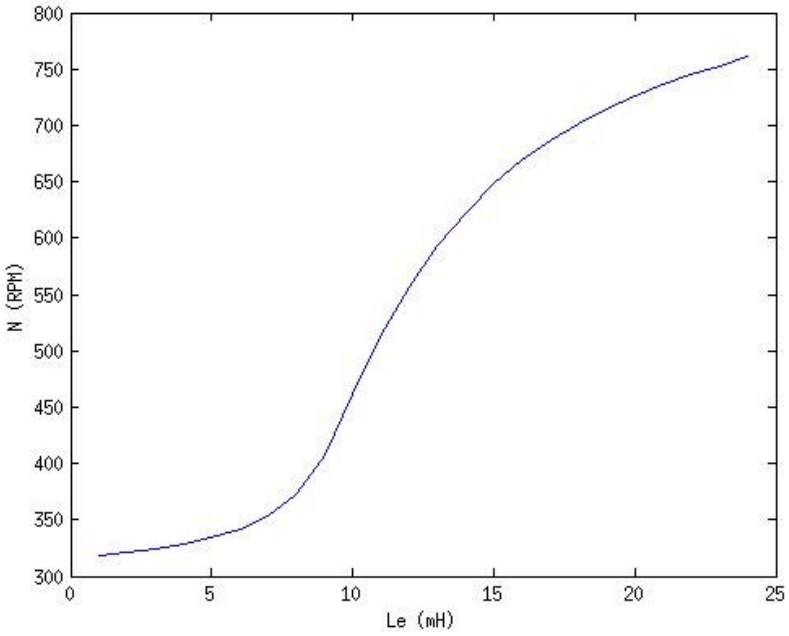


Σχήμα 3.32 Μεταβολή του λ συναρτήσει της μεταβολής της τιμής της αυτεπαγωγής



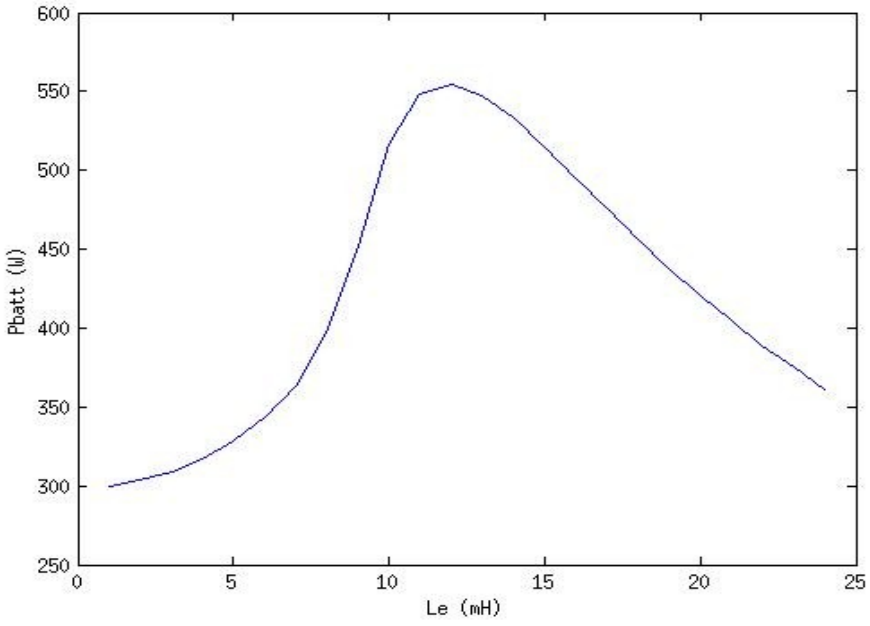
Σχήμα 3.33 Μεταβολή του Cp συναρτήσει της μεταβολής της τιμής της αυτεπαγωγής

Παρόμοια συμπεράσματα εξάγονται και απο τη γραφική παράσταση 3.33 όπου φαίνεται η αλλαγή της τιμής του Cp σε σχέση με την αλλαγή της τιμής της αυτεπαγωγής



Σχήμα 3.34 Μεταβολή των στροφών της ανεμογεννήτριας στην ονομαστική τιμή ανέμου 10m/sec, σε σχέση με τη μεταβολή της τιμής της αυτεπαγωγής

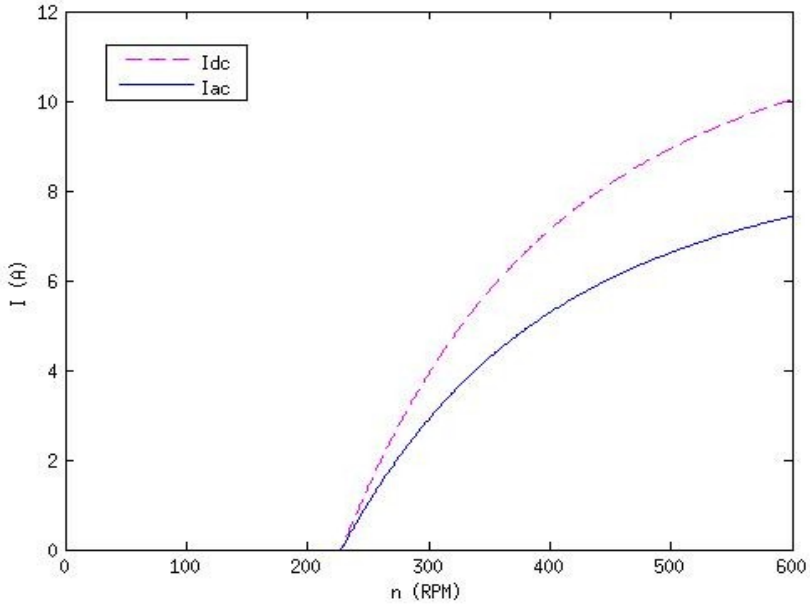
Τέλος ενδιαφέρον παρουσιάζει και η μεταβολή της ισχύος που απορροφούν οι μπαταρίες σε σχέση με τη μεταβολή της αυτεπαγωγής όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



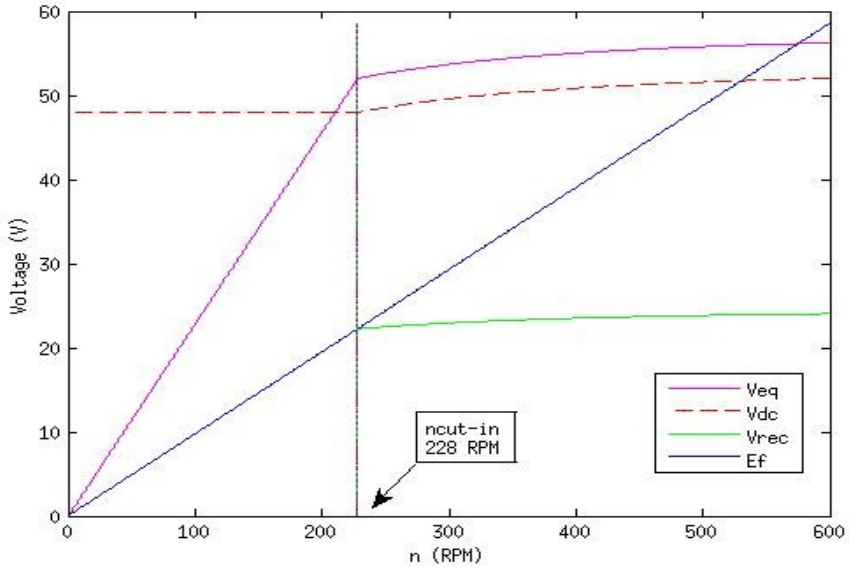
Σχήμα 3.35 Η ισχύς που απορροφούν οι μπαταρίες σε σχέση με τη μεταβολή της αυτεπαγωγής

Και εδώ βλέπουμε ανάλογη συμπεριφορά με αυτή της ενεργειακής απόδοσης, αν και εν προκειμένω είναι σαφές το μέγιστο που παρουσιάζει η καμπύλη της ισχύος. Πιο συγκεκριμένα έχουμε μέγιστη τιμή ισχύος P_{batt} = 554,7 W για τιμή αυτεπαγωγής L_e = 12 mH, ενώ για τις βέλτιστες τιμές που έχουμε επιλέξει με βάση τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης έχουμε λιγότερη ισχύ κάτι όμως που αντισταθμίζεται απο την βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης.

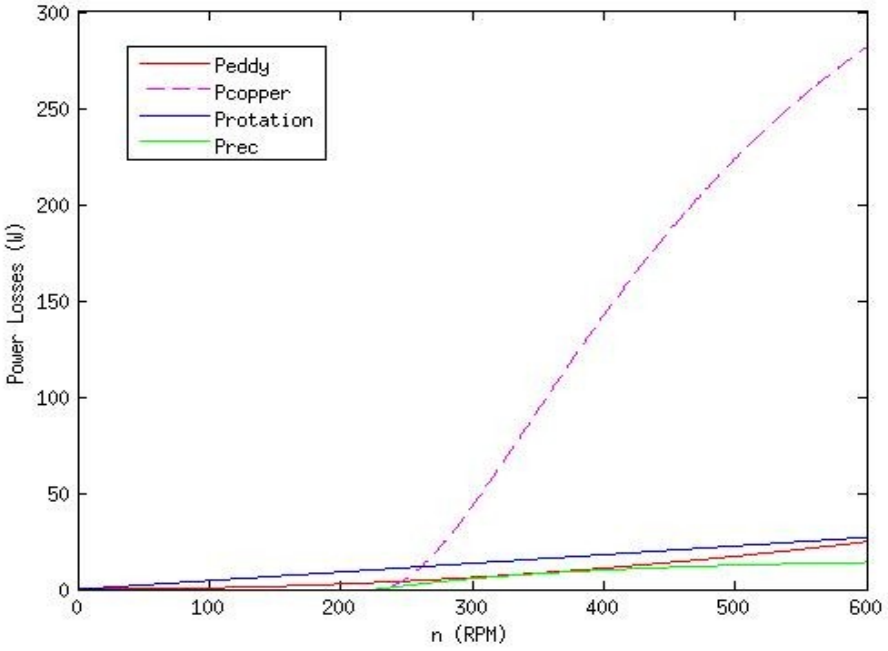
Έχοντας λοιπόν παρουσιάσει τα κριτήρια και την διαδικασία επιλογής την βέλτιστων τιμών παρουσιάζουμε στη συνέχεια τις χαρακτηριστικές ρεύματος, τάσεων καθώς και ισχύος και απωλειών :



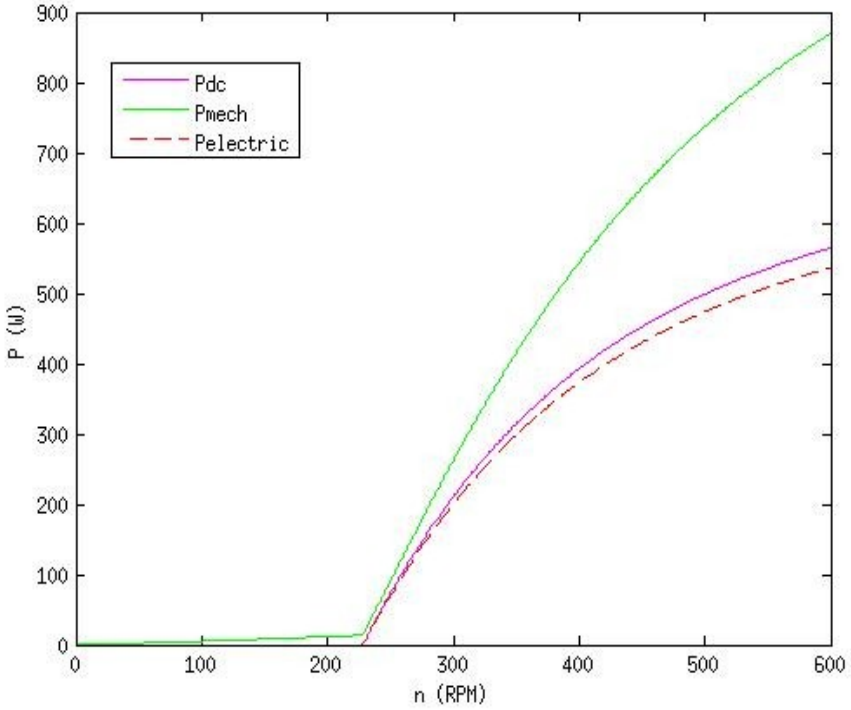
Σχήμα 3.36 Τα ρεύματα της γεννήτριας σε σχέση με τις στροφές



Σχήμα 3.37 Οι τάσεις που αναπτύσσονται στο σύστημα σε σχέση με τις στροφές της γεννήτριας



Σχήμα 3.38 Οι απώλειες του συστήματος συναρτήσει των στροφών της γεννήτριας



Σχήμα 3.39 Η DC,AC και η μηχανική ισχύς του συστήματος

3.2.2.4.3 Διαδικασία επιλογής καλωδίου και οικονομική μελέτη για σύστημα 48V

Όπως και στην περίπτωση της απευθείας σύνδεση σε συσωρευτές, έτσι και σε αυτή την ενότητα θα μελετήσουμε και θα παρουσιάσουμε τη διαδικασία επιλογής του καλωδίου σύνδεσης τόσο μεταξύ της γεννήτριας και του ανορθωτή (AC κομμάτι) αλλά και μεταξύ του ανορθωτή και της μπαταρίας (DC κομμάτι). Προσπαθώντας να επιτύχουμε μέγιστη ενεργειακή απόδοση, προχωρήσαμε στη βελτιστοποίηση τόσο της αντίστασης του καλωδίου όσο και της τιμής της αυτεπαγωγής που συνδέουμε στο σύστημα.

Ακολουθώντας την ίδια πορεία με την προηγούμενη συνδεσμολογία (απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές), μελετούμε για διάφορα μήκη καλωδίου, από 20 εώς 150 μέτρα, την επίδραση της επιλογής εμπορικών τύπων καλωδίου στα θεωρητικά μας αποτελέσματα και προχωράμε σε όποιες διορθωτικές αλλαγές με σκοπό να επιτύχουμε ενεργειακή απόδοση όσο πιο κοντά στις θεωρητικές μας τιμές δηλαδή R_{cable} = 0,84 Ohm και L_{e} = 14,5 mH.

Πρώτος πίνακας λοιπόν είναι ο παρακάτω που παρουσιάζει για τα μήκη που προαναφέρθηκαν τις αντίστοιχες θεωρητικές διατομές που θα έπρεπε να έχουν τα καλώδια μας για να επιτύχουμε αντίσταση ίση με τη θεωρητική :

Μήκος Καλωδίου (m)	Θεωρητική τιμή διατομής (mm^2)
20	0,418
30	0,628
40	0,837
50	1,050
60	1,260
70	1,470
80	1,670
90	1,890
100	2,090
110	2,300
120	2,510
130	2,720
140	2,930
150	3,130

Πίνακας 3.18 Εξεταζόμενα μήκη καλωδίου και αντίστοιχες τιμές διατομών για την επίτευξη των 0,84 Ohm

Είναι προφανές ότι στην πραγματικότητα αν επιχειρήσουμε να επιλέξουμε εμπορικά καλώδια με τυποποιημένες τιμές διατομών για τη σύνδεση, είναι αρκετά δύσκολο εώς σπάνιο να πετύχουμε τις παρακάτω θεωρητικές διατομές. Επομένως θα πρέπει να επιλέξουμε καλώδιο που απο τη μία να προσεγγίζει τις παραπάνω θεωρητικές τιμές και απο την άλλη θα πρέπει να αντέχει στα ρεύματα που ρέουν στο σύστημα μας.

Στον παρών τρόπο σύνδεσης το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να ρέει στο σύστημα μας είναι τα 7,46Α. Παρ' όλα αυτά θα πρέπει το καλώδιο μας σε ριπές ανέμου και μέχρι το σύστημα furling να προλάβει να σταθεροποιήσει την ισχύ να μπορεί για ελάχιστο χρόνο να αντέξει ρεύματα μέχρι και το τριπλάσιο απο το μέγιστο. Συνεπώς μια καλή επιλογή καλωδίου θα ήταν αυτό που να μπορεί να αντέξει τιμές ρεύματος κοντά στα 20Α. Σύμφωνα με την ανάλυση που κάναμε στην ενότητα της σύνδεσης στους συσσωρευτές μία καλή περίπτωση είναι αυτό των 2,5 mm^2 ,το οποίο αντέχει ρεύμα μέχρι 18,9Α, τιμή αποδεκτή για την ανάλυση μας.

Άμεση συνέπεια της επιλογής εμπορικής τιμής διατομής καλωδίου είναι και η απόκλιση στις τιμές της αντίστασης του καλωδίου για κάθε ένα απο τα εξεταζόμενα μήκη. Αυτό ακριβώς παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα :

Μήκος Καλωδίου (m)	Θεωρητική τιμή διατομής (mm^2)	Αντίστοιχη εμπορική (mm^2)	Αντίσταση για εμπορική τιμή (Ohm)
20	0,418	2,50	0,141
30	0,628	2,50	0,211
40	0,837	2,50	0,281
50	1,050	2,50	0,351
60	1,260	2,50	0,422
70	1,470	2,50	0,492
80	1,670	2,50	0,562
90	1,890	2,50	0,632
100	2,090	2,50	0,703
110	2,300	2,50	0,773
120	2,510	2,50	0,840
130	2,720	2,50	0,913
140	2,930	2,50	0,984
150	3,130	2,50	1,050

Πίνακας 3.19 Θεωρητικές και αντίστοιχες εμπορικές τιμές αντίστασης για διάφορα μήκη καλωδίου

Στη συνέχεια έχοντας βρεί την αντίσταση που προκύπτει απο την τυποποιημένη τιμή καλωδίου, άρα και διατομής, ακολουθούμε όμοια διαδικασία με αυτή την οποία αξιοποιήσαμε για να βρούμε τη βέλτιστη τιμή αυτεπαγωγής.

Για δεδομένη πλέον τιμή αντίστασης σαρώνουμε ένα εύρος τιμών αυτεπαγωγής με σκοπό να επιτύχουμε τη βέλτιστη τιμή ενεργειακής απόδοσης :

Μήκος Καλωδίου (m)	Αντίσταση για εμπορική τιμή (Ohm)	Βέλτιστη τιμή αυτεπαγωγής για εμπορική τιμή (mH)
20	0,141	13,5
30	0,211	13,5
40	0,281	13,5
50	0,351	13,5
60	0,422	14,0
70	0,492	14,0
80	0,562	14,0
90	0,632	14,0
100	0,703	14,0
110	0,773	14,0
120	0,840	14,5
130	0,913	14,5
140	0,984	14,5
150	1,050	14,5

Πίνακας 3.20 Εύρεση βέλτιστης τιμής αυτεπαγωγής για δεδομένη τιμή αντίστασης εμπορικού καλωδίου 2,5 mm^2

Μήκος Καλωδίου (m)	Βέλτιστη τιμή αυτεπαγωγής για εμπορική τιμή (mH)	Ε για αντίστοιχη εμπορική (kWh)	Ποσοστό % επί της Emax
20	13,5	864,82	95,6
30	13,5	871,80	96,4
40	13,5	878,13	97,1
50	13,5	882,36	97,5
60	14,0	895,98	99,0
70	14,0	897,92	99,2
80	14,0	899,30	99,4
90	14,0	900,12	99,5
100	14,0	900,80	99,6
110	14,0	900,30	99,5
120	14,5	904,58	100,0
130	14,5	903,01	99,8
140	14,5	901,09	99,6
150	14,5	899,09	99,4

Πίνακας 3.21 Βέλτιστες τιμές αυτεπαγωγής ,αντίστοιχες ενεργειακές αποδόσεις και το ποσοστό επί της εκατό σε σχέση με τη βέλτιστη θεωρητική τιμή απόδοσης που είναι 904,58 kWh

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τα αποτέσματα των δύο παραπάνω πινάκων, βλέπουμε οτι οι βέλτιστες τιμές

αυτεπαγωγές μετά την επιλογή εμπορικού καλωδίου έχουν απόκλιση απο την θεωρητική βέλτιστη τιμή αυτεπαγωγής (L_{emax} = 14,5 mH) και αυτό οφείλεται ότι στην σύνδεση με αυτεπαγωγή, οι καθοριστικοί παράγοντες για την ανάλυση μας γενικότερα αλλά και πιό συγκεκριμένα για την ενεργειακή απόδοση είναι δύο : Απο τη μία η αυτεπαγωγή L_e και απο την άλλη η αντίσταση καλωδίου R_{cable} .

Επομένως δεν μπορούμε να βγάλουμε σωστά συμπεράσματα βελτιστοποιώντας μόνο τη μία παράμετρο απο τις δύο, ούτε βέβαια και βελτιστοποιώντας τη μία και στη συνέχεια την άλλη. Για να γίνει σωστή ανάλυση θα πρέπει παράλληλα να μεταβάλλονται οι δύο παράμετροι και το βασικό κριτήριο επιλογής θα είναι όπως και στις προηγούμενες ενότητες, η μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης. Κατ' αυτόν λοιπόν τον τρόπο δικαιολογούνται οι δύο παραπάνω πίνακες και ειδικότερα ο πίνακας 3.21.

Ήδη απο αυτό το σημείο μπορούμε να παρατηρήσουμε τη σημαντική βελτίωση τόσο της μέγιστης τιμής της ενεργειακής απόδοσης σε σχέση με την απλή σύνδεση σε συσσωρευτές της τάξης του 12% και σαφώς βελτιωμένα ποσοστά ενεργειακής απόδοσης μετά τη σύνδεση του καλωδίου του AC κομματιού.

Στη συνέχεια προσθέτουμε και το κομμάτι της DC σύνδεσης μεταξύ του ανορθωτή και των συσσωρευτών. Όπως και στην απευθείας σύνδεση επιλέγουμε καλώδιο με διατομή 4 mm^2 με μήκος 2 μέτρα το οποίο παρουσιάζει αντίσταση R_{dc} = 0,0176 Ohm. Η τιμή αυτή είναι αρκετά χαμηλή και δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματά μας και γι' αυτό δε θα ληφθεί υπ' όψιν κατά τη βελτιστοποίηση.

Παράλληλα για διευκόλυνση και σε μια προσπάθεια ομαδοποίησης των αποτελεσμάτων αλλά και των πρακτικών πορισμάτων της έρευνας επιχειρούμε να καταλήξουμε σε μία και μοναδική τιμή αυτεπαγωγής για όλα τα μήκη καλωδίου. Μετά την προσομοίωση στο λογισμικό Matlab του σεναρίου που περιγράφηκε παραπάνω καταλήξαμε ότι η τιμή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώς βέλτιστη μετά και απο τη σύνδεση του DC κομματιού του καλωδίου είναι το L_e = 13,5 mH.

Συγκεντρωτικά όλα τα παραπάνω φαίνονται στους παρακάτω πίνακες :

Μήκος Καλωδίου (m)	Αντίσταση για εμπορική τιμή (Ohm)	Μοναδική τιμή αυτεπαγωγής (mH)	Ε για αντίστοιχη εμπορική (kWh)
20	0,141	13,5	864,82
30	0,211	13,5	871,80
40	0,281	13,5	878,13
50	0,351	13,5	882,36
60	0,422	13,5	885,79
70	0,492	13,5	888,62
80	0,562	13,5	890,70
90	0,632	13,5	892,36
100	0,703	13,5	893,76
110	0,773	13,5	893,99
120	0,840	13,5	893,89
130	0,913	13,5	893,31
140	0,984	13,5	892,25
150	1,050	13,5	891,15

Πίνακας 3.17 Ενεργειακή απόδοση που προκύπτει μετά απο την επιλογή τόσο της μοναδικής τιμής αυτεπαγωγής αλλά και της αντίστασης του AC κομματιού του συστήματός μας

Στη συνέχεια παρουσιάζεται και το επί τοις εκατό ποσοστό σε σχέση με τη μέγιστη τιμή ενεργειακής απόδοσης E_{max} = 904,58 kWh :

Μήκος Καλωδίου (m)	Ε για αντίστοιχη εμπορική (kWh)	Ποσοστό % επί της Emax
20	864,82	95,60
30	871,80	96,38
40	878,13	97,08
50	882,36	97,54
60	885,79	97,92
70	888,62	98,24
80	890,70	98,47
90	892,36	98,65
100	893,76	98,80
110	893,99	98,83
120	893,89	98,82
130	893,31	98,75
140	892,25	98,64
150	891,15	98,52

Πίνακας 3.18 Ποσοστό % επί της μέγιστης ενεργειακής απόδοσης

Τέλος παρουσιάζεται ο πίνακας που δείχνει το κόστος ανά κιλοβατώρα των παραπάνω συνδέσων όπως αυτός διαμορφώνεται με βάση τις τιμές στην ελληνική αγορά τον Μάϊο 2012. Έτσι με τιμή 0,31

ευρώ/μέτρο για το καλώδιο 2,5 mm^2 θα έχουμε :

Μήκος Καλωδίου (m)	Ε για αντίστοιχη εμπορική (kWh)	Κόστος (Ευρώ/Kwh)
20	864,82	0,0072
30	871,80	0,0107
40	878,13	0,0141
50	882,36	0,0176
60	885,79	0,0210
70	888,62	0,0244
80	890,70	0,0278
90	892,36	0,0313
100	893,76	0,0347
110	893,99	0,0381
120	893,89	0,0416
130	893,31	0,0451
140	892,25	0,0486
150	891,15	0,0522

Πίνακας 3.19 Ευρώ/kWh για τα διάφορα μήκη καλωδίου και τις αντίστοιχες ενεργειακές αποδόσεις

Όπως θα δούμε και στον επομενο πίνακα ενώ η βελτίωση της μέγιστης ενεργειακής απόδοσης σε σχέση με την απευθείας σύδεση σε συσσωρευτές είναι περίπου 12%, σε πραγματικές συνθήκες η βελτίωση για τα μήκη καλωδίου που εξετάζουμε είναι αρκετά σημαντική :

Μήκος Καλωδίου (m)	Επί τοις εκατό αύξηση %
20	26,95
30	27,02
40	26,90
50	26,61
60	26,12
70	25,58
80	24,85
90	24,21
100	23,52
110	22,65
120	21,74
130	20,73
140	19,61
150	18,69

Πίνακας 3.20 Βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης με τη σύνδεση της αυτεπαγωγής και τη βελτιστοποίηση του καλωδίου σύνδεσης σε σχέση με τη ήδη βελτιστοποιημένη απευθείας σύνδεση σε μπαταρίες

Ειδικά στα μεσαία μήκη καλωδίου (30 – 80 μέτρα) παρατηρούμε μία αύξηση κοντά στο 26% ενώ η διαφορά καθώς προχωρούμε πρός τα μεγάλα μήκη καλωδίου γίνονται μικρότερα με μικρότερη αύξηση αυτή στα 150 μέτρα που είναι κοντά στο 18,7%. Επομένως ο ισχυρισμός μας ότι η η σύνδεση

αυτεπαγωγής μπορεί να βελτιώσει την ενεργειακή απόδοση ενός συστήματος που συνδέεται σε μπαταρίες επαληθεύεται ακόμα και αν οι θεωρητικές μέγιστες τιμές είναι αρκετά κοντά. Στην ουσία η σύνδεση της αυτεπαγωγής βελτιώνει τη συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας καθώς της επιτρέπει να δουλεύει σε μεγέθη πολύ πιο κοντά στα ονομαστικά της, επιτυγχάνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο καλύτερη ενεργειακή συμπεριφορά.

Αυτό μπορεί να φανεί και απο τους επόμενους πίνακες όπου καταγράφονται οι στροφές στις οποίες δουλεύει η ανεμογεννήτρια για ονομαστικές ταχύτητες ανέμου, δηλαδή τα 10 m/sec καθώς και η ισχύς πλέον που απορροφούν οι μπαταρίες :

Μήκος Καλωδίου (m)	Ισχύς μπαταριών Pbatt (W)	Στροφές (RPM)
20	595,84	635
30	590,22	631
40	584,47	628
50	578,99	624
60	573,36	621
70	567,70	618
80	561,90	616
90	556,60	613
100	551,11	611
110	545,61	609
120	540,38	608
130	535,17	606
140	529,55	605
150	524,76	604

Πίνακας 3.21 Στροφές που λειτουργεί η γεννήτρια και ισχύς που απορροφούν οι μπαταρίες σε ονομαστικό άνεμο 10m/sec μετά τη βελτιστοποίηση αυτεπαγωγής και αντίστασης καλωδίου

Μήκος Καλωδίου (m)	Αύξηση % της ισχύος των μπαταριών
20	174,14
30	166,94
40	160,45
50	154,69
60	144,09
70	134,71
80	130,75
90	123,14
100	112,84
110	106,89
120	98,28
130	91,33
140	84,74
150	78,55

Πίνακας 3.22 Επί τοις εκατό αύξηση της ισχύος που απορροφούν οι μπαταρίες στη σύνδεση με αυτεπαγωγή σε σχέση με την απευθείας σύνδεση στις μπαταρίες για σύστημα 48V και για ονομαστικές τιμές ανέμου 10m/sec

Παρατηρούμε λοιπόν ότι η αύξηση της ισχύος που απορροφούν οι μπαταρίες σε σύνδεση με αυτεπαγωγή είναι αρκετά υψηλή και αποτελεί επιπλέον παράγοντα για την επιλογή αυτού του τρόπου σύνδεσης. Το γεγονός αυτό είναι προφανές σε σχέση με τη σύνδεση απευθείας σε συσσωρευτές καθώς η μείωση κατά ένα σημαντικό ποσοστό της αντίστασης καλωδίου μειώνει αναλογικά και τις απώλειες χαλκού πάνω στο καλώδιο με αποτέλεσμα την αύξηση της ισχύος που φτάνει στους συσσωρευτές. Συνεπώς η προσθήκη της αυτεπαγωγής αυξάνει την ενεργειακή απόδοση ενός συστήματος και παράλληλα αυξάνει κατά πολύ την ροής ισχύος πρός τους συσσωρευτές.

Η αύξηση αυτή είναι μεγαλύτερη στα μικρά και στα μεσαία μήκη ενώ είναι σχετικά λιγότερη στα μεγαλύτερα μήκη. Επίσης απο τον πίνακα 3.21 φαίνεται ότι το σύστημα δουλεύει σε τιμές αρκετά πιο κοντά στις ονομαστικές σε σχέση με την απευθείας σύνδεση και αυτό συμβαίνει για όλες ανεξαιρέτως τις τιμές του μήκους καλωδίου. Η συνολική αντίσταση που βλέπει το σύστημα όσο κινούμαστε πρός τα 150 μέτρα πλησιάζει προς τη βέλτιστη που έχουμε θέσει, δηλαδή τα 0,84 Ohm ενώ με τη μείωση της τιμής της αυτεπαγωγής απο τα 14,5 mH στα 13,5 mH καταφέρνουμε στα μεγάλα μήκη απο 70 – 150 μέτρα να δουλεύουμε σε στροφές πολύ κοντά στις ονομαστικές και σαφώς βελτιωμένα απο τις 635 στροφές που είναι υπολογισμένο με τις βέλτιστες τιμές αντίστασης και αυτεπαγωγής δηλαδή $R_{cableopt}$ = 0,84 Ohm και L_{eopt} = 14,5 mH.

Περιοριστικός παράγοντας στην σύνδεση με αυτεπαγωγή είναι το αρκετά υψηλό κόστος για την προμήθεια εμπορικών αυτεπαγωγών που κυμαίνεται κοντά στα 500 Ευρώ για χειροποίητη αυτεπαγωγή για το σύστημα το οποίο εξετάζουμε, μιας και δεν βρέθηκε αντίστοιχη τυποποιημένη. Παρ' όλα αυτά τόσο τα οφέλη όσον αφορά στην ενεργειακή απόδοση και ειδικότερα μετά τις βελτιώσεις και τη σύνδεση και των δύο μερών της σύνδεσης (AC + DC), αλλά και η δυνατότητα κατασκευής αυτεπαγωγής στο εργαστήριο με υλικά εμπορίου απο οποιονδήποτε θελήσει να υλοποιήσει κάποια τέτοια σύνδεση με αρκετά μικρότερο κόστος, κάνουν τον συγκεκριμένο τρόπο σύνδεσης αρκετά ελκυστικό με την προϋπόθεση ότι με κάποιο τρόπο λύνεται το θέμα του υψηλού κόστους.

Κεφάλαιο 4 : Dump Load Controllers

4.1 Γενικά για τους Dump Load Controllers

Οι Dump Load Controllers αξιοποιούνται σε συστήματα με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κατά τη σύνδεση τους σε συσσωρευτές και πρωταρχικός τους ρόλος και σκοπός είναι να προστατεύσουν τις μπαταρίας απο την υπερφόρτιση. Αυτό πρακτικά σημαίνει στην παρούσα έρευνα ότι η γεννήτρια μας ενώ λειτουργεί και φορτίζει τις μπαταρίες, δε θα πρέπει να τις φορτίζει πάνω απο ένα συγκεκριμένο επίπεδο τάσης καθώς αυτό θα έχει αρκετά δυσμενείς συνέπειες για την αποτελεσματική λειτουργία της μπαταρίας αλλά και την ανθρώπινη ασφάλεια.

Πιο συγκεκριμένα αν μία μπαταρία φορτιστεί αρκετά επάνω απο τα επιτρεπόμενα επίπεδα της, τότε το παραπάνω ρεύμα που ρέει αναγκάζει τα οξείδια στις πλάκες να "θρυμματιστούν" και να κατακαθίσουν στον πάτο του κελιού, ενώ ταυτόχρονα η μπαταρία θερμαίνεται με αποτέλεσμα να αφαιρείται νερό απο τον ηλεκτρολύτη. Μετά την αφαίρεση του το υλικό αυτό, το οποίο και αντιπροσωπεύει την χωρητικότητα, δεν είναι πλέον ενεργό. Επιπρόσθετα, η απώλεια νερού απο τον ηλεκτρολύτη μπορεί να εκθέσει μέρη των πλακών και αυτό να οδηγήσει σε οξείδωση των εν λόγω κομματιών με αποτέλεσμα να μειωθεί ακόμα περισσότερο η χωρητικότητα των μπαταριών.

Επίσης όσον αφορά στην ανθρώπινη ασφάλεια οι υπερφορτισμένες μπαταρίες είτε μπορεί πολύ απλά να σταματήσουν να λειτουργούν αν λειτουργήσουν για μεγάλα χρονικά διαστήματα, είτε η υπερφόρτιση να προκαλέσει το βρασμό του θειικού οξέος και του αποσταγμένου νερού. Στην περίπτωση αυτή το περίβλημα της μπαταρίας θα ζεσταθεί σε επίπεδα που θα είναι δύσκολο να το αγγίξει κάποιος και αν συνεχιστεί η διαδικασία θα αρχίσει να λιώνει. Έυφλεκτο υδρογόνο συσσωρεύεται στα σφραγισμένα κελιά της μπαταρίας και μπορεί να προκαλέσει παραμόρφωση του περιβλήματος και απώλεια απο μικρές διόδους εξόδου της μπαταρίας, προς την ατμόσφαιρα. Όταν αρχίσει το υδρογόνο να έρχεται σε επαφή με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας, το όλο σύστημα με μια μικρή σπίθα μπορεί να εκραγεί, θέτοντας σε κίνδυνο τόσο τις εγκαταστάσεις όσο και τους ανθρώπους που κινούνται στον εγγύς χώρο.

Απο την άλλη η υποφόρτιση της μπαταρίας, δηλαδή η φόρτιση της σε επίπεδα χαμηλότερα των προδιαγραφών της μπορεί να έχει εξίσου καταστροφικά αποτελέσματα για το χρόνο ζωής των μπαταριών, καθώς έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή θειικών αλάτων μολύβδου. Αυτό συμβαίνει όταν το θείο απο τον ηλεκτρολύτη αναμειγνύεται με το μόλυβδο στις πλάκες. Όταν η διαδικασία αυτή γίνει χρόνια ένα μέρος του θείου δεν αναμειγνύεται ξανά στον ηλεκτρολύτη με αποτέλεσμα να γίνεται στην ουσία ανενεργός και συνεπώς να μειώνει εξαιρετικά το χρόνο ζωής αλλά και την ενεργειακή απόδοση των μπαταριών.

Βλέπουμε λοιπόν ότι ενώ λειτουργεί η ανεμογεννήτρια μας θα πρέπει να ελέγχουμε συνεπώς την τάση των συσσωρευτών μας προσπαθώντας να αποφύγουμε τόσο την υπερφόρτιση όσο και την υποφόρτιση τους.

Ακριβώς αυτό το ρόλο καλούνται να παίξουν οι dump load controllers. Ελέγχουν την τάση στα άκρα των συσσωρευτών και αν αυτή η τιμή είναι μεγαλύτερη απο το μέγιστο επίπεδο φόρτισης των

μπαταριών οδηγούν την ισχύ απο τη γεννήτρια σε ένα απορριπτικό φορτίο, το οποίο μπορεί να είναι πολύ απλά μία αντίσταση, ή μπορεί να είναι και μία μονάδα συμπαραγωγής με σκοπό να θερμαίνει νερό. Εάν απο την άλλη τα επίπεδα τάσης των συσσωρευτών πέσουν κάτω απο ένα κατώτατο όριο, είτε λόγω μόνο του απορριπτικού φορτίου και της μονάδας συμπαραγωγής, είτε και λόγω των φορτίων που τροφοδοτεί το σύστημα, να βγάζει το απορριπτικό φορτίο εκτός κυκλώματος και κατ' αυτόν το τρόπο να οδηγείται όλη η ισχύς στις μπαταρίες επιτρέποντας την πλήρη φόρτιση τους απο την αρχή.

Στην ουσία όλοι οι controllers αποτελούνται απο τρία μέρη:

- **Είσοδος – Ανάγνωση δεδομένων απο τη μπαταρία :** Στο μέρος αυτό ο ελεγκτής ο οποίος στην πλειονότητα των περιπτώσεων συνδέεται παράλληλα με τη μπαταρία δέχεται δεδομένα, είτε τάση είτε και ρεύμα απο την μπαταρία. Στους περισσότερους ελεγκτές καθώς και σε αυτούς που εξετάζονται στην παρούσα έρευνα, τα δεδομένα που διαβάζονται απο τους συσσωρευτές είναι η τάση τους και με βάση αυτές τις ενδείξεις ο ελεγκτής παίρνει τις κατάλληλες αποφάσεις.

- **Επεξεργασία των ενδείξεων :** Στο κομμάτι αυτό γίνεται η επεξεργασία των δεδομένων που διαβάζονται απο τους συσσωρευτές είτε μόνο με τη βοήθεια ολοκληρωμένων ηλεκτρονικών υπεύθυνων για τη μετατροπή των δεδομένων σε τιμές που να μπορεί να διαχειριστεί ο ελεγκτής, είτε με τη βοήθεια ενός ή περισσοτέρων μικροελεγκτών οι οποίοι είναι προγραμματισμένοι να διαβάζουν τις ενδείξεις, μετά την κατάλληλη επεξεργασία τους απο το υπόλοιπο κύκλωμα, και με βάση τις αποθηκευμένες τους ρυθμίσεις να οδηγούν σε επιθυμητές και απόλυτα ορισμένες καταστάσεις το κύκλωμα.

- **Έξοδος – Οδήγηση του κυκλώματος :** Για να μπορέσει ο ελεγκτής να οδηγήσει το κύκλωμα σε επιθυμητές καταστάσεις χρειάζεται πέρα απο τα σήματα που ο ίδιος επεξεργάζεται, βοηθητικά υποκυκλώματα τα οποία αποτελούνται συνήθως είτε απο relays είτε απο mosfets τα οποία πραγματοποιούν τις αλλαγές μεταξύ της μπαταρίας και του απορριπτικού φορτίου με τρόπο που να εξασφαλίζει τόσο την προστασία του ελεγκτή απο επιπλέον ρεύματα που θα μπορούσαν να καταστρέψουν ενδεχομένως τη διάταξη του dump load controller, όσο και το υπόλοιπο κύκλωμά μας. Πιο συγκεκριμένα στην περίπτωση των ανεμογεννητριών αν μείνουν ανοιχτοκυκλωμένες έστω για λίγο και εκείνη τη περίοδο φυσάει άνεμος, τότε λόγω του γεγονότος ότι δε θα υπάρχει φορτίο παρόν, η φτερωτή της ανεμογγενήτριας θα αρχίσει να επιταχύνει αρκετά με αποτέλεσμα στη χειρότερη περίπτωση την καταστροφή της γεννήτριας.

Κάποιοι απο τους πιο διαδεδομένους εμπορικούς controllers που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές φωτοβολταϊκών ή ανεμογεννητριών είναι οι παρακάτω :

Xantrex C series Charge Controllers

Η σειρά αυτή των controllers μπορούν να λειτουργήσουν είτε σαν ελεγκτές φόρτισης είτε σαν Dump Load controllers.Λειτουργούν (ανάλογα με το μοντέλο) σε ένα εύρος συστημάτων απο 12 εώς 48Volt και μπορού να ανακατευθύνουν ρεύματα ως και 60A (μοντέλο C60). Για να επιτύχουν το σκοπό τους χρησιμοποιούν ένα μικροεπεξεργαστή που ελέγχει και συντονίζει το υπόλοιπο κύκλωμα και αξιοποιούν τις δυνατότητες που προσφέρει η τεχνική PWM (Pulse Width Modulation) προκειμένου να υλοποιήσουν τόσο τη φόρτιση της μπαταρίας σε τρία στάδια Bulk ,Absorption και Float προκειμένου να διασφαλίσουν ότι οι ενδείξεις ρεύματος και τάσης ταιριάζουν με τις πραγματικές της μπαταρίας,όσο και τη διαδικασία ανακατεύθυνσης του ρεύματος στο απορριπτικό φορτίο.

Οι ρυθμίσεις του είναι πλήρως παραμετροποιήσιμες ενά η λειτουργία τους είναι πλήρως σιωπηλή.

Η τιμή τους ξεκινάει περίπου απο τα 80 ευρώ και αυξάνεται ανάλογα με τον τύπο του μοντέλου

Morningstar Tri-Star TS series

Η αρχική χρήση των εν λόγω ελεγκτών είναι για χρήση σε σύστημα με φωτοβολταϊκά πάνελ. Παρ' όλα αυτά η χρήση του σε συστήματα με ανεμογεννήτριες είναι αρκετά διαδεδομένη και στην πραγματικότητα είναι ο controller ο οποίος επιλέγεται συχνότερα ακόμα και για αυτόνομα – οικιακά συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όταν πρόκειται για εμπορικούς ελεγκτές. Και αυτή η κατηγορία μπορεί να λειτουργήσει είτε ως ελεγκτής φόρτισης είτε ως dump load controller αλλά μπορεί να εκτελέσει μόνο μία απο τις δύο λειτουργίες κάθε φορά. Βέβαια λόγω της επεκτασιμότητας που προσφέρει μπορεί να συνδεθεί μαζί με άλλους ίδιους ελεγκτές και να επιτελεί και τις δύο λειτουργίες αν κάτι τέτοιο είναι επιθυμητό. Το εύρος του είναι απο 12 εώς 48Volt και μπορεί να ανακατευθύνει ρεύματα εώς και 60A. Όπως και στην περίπτωση που προηγούμενου ελεγκτή στο πυρήνα του βρίσκεται ένας ισχυρός επεξεργαστής ο οποίος αποτελεί τον "εγκέφαλο" που συντονίζει

την επεξεργασία και εκτέλεση των απαραίτητων λειτουργιών.

Στην περίπτωση που συνδεθεί σε ανεμογεννήτριες απαιτείται η σύνδεση απορριπτικού φορτίου όπως έχει περιγραφεί παραπάνω για την ασφαλή και αποτελεσματική λειτουργία όλου του συστήματος. Αυτό φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα το οποίο αποτελεί μέρος του εγχειριδίου του ελεγκτή :

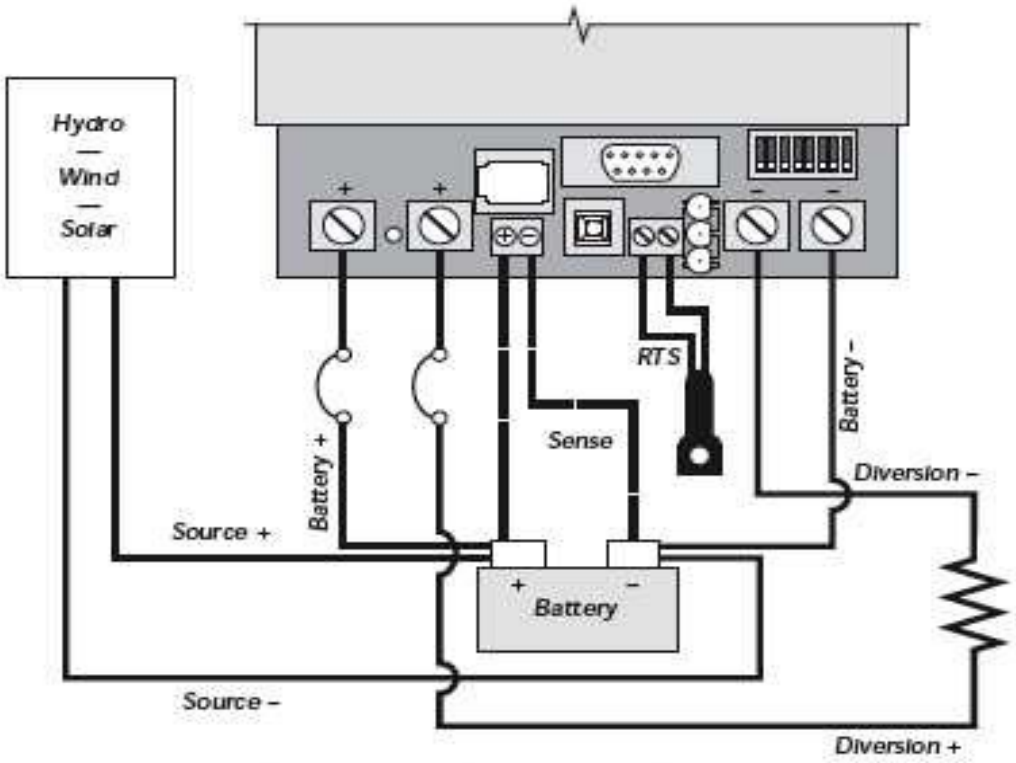


Figure 2.2c Installation Wiring for Diversion Charge Control

Σχήμα 4.1 Η τυπική διάταξη ενός controller της σειράς Tri-Star για σύνδεση σε συσσωρευτές

Όπως μπορούμε να διακρίνουμε και στο σχήμα το απορριπτικό φορτίο συνδέεται παράλληλα με τους συσσωρευτές και διοχετεύεται ρεύμα άρα και ισχύς σε αυτό μετά απο την ανάγνωση και επεξεργασία των ενδείξεων που διαβάζει ο TS απο τις μπαταρίες.

Και αυτή η διάταξη είναι πλήρως παραμετροποιήσιμη και η τιμή των μοντέλων αυτής της σειράς ξεκινά περίπου απο τα 150 ευρώ και αναλόγως το μοντέλο και τις δυνατότητες αυξάνεται.

4.2 Μή εμπορικοί ελεγκτές

Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας προτιμήσαμε να επιχειρήσουμε να προσεγγίσουμε τους μή εμπορικούς ελεγκτές, με σκοπό αρχικά να περιορίσουμε το κόστος αγοράς αλλά και συντήρησης σε περίπτωση βλάβης αλλά και κυρίως με τη λογική ότι ο καθένας ο οποίος αποφασίζει να κατασκευάσει μία διάταξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μικρής κλίμακας να έχει τη δυνατότητα με υλικά φτηνά, εύκολα προσβάσιμα και τη γνώση διαθέσιμη και δωρεάν να επιχειρήσει να φτιάξει μόνος του ένα dump load cotroller που θα εξυπηρετεί ακριβώς τις ανάγκες τους συστήματος του. Ο τελευταίος αυτός παράγοντας είναι εξέχουσας σημασίας καθώς εξασφαλίζει την απλότητα της σχεδίασης (η λειτουργία των εμπορικών αφορά ένα εύρος κατασκευών και λειτουργιών επομένως είναι αρκετά πιο πολύπλοκες). Επίσης αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους τόσο της αγοράς αλλά και της συντήρησης καθώς είναι προφανές ότι μία διάταξη που έχει κατασκευαστεί μαζικά σε εργοστάσιο είναι πολύ πιο δύσκολα επιδιορθώσιμη σε επίπεδο μικρού αυτόνομου – οικιακού δικτύου απο ότι μια διάταξη που έχει γίνει με βάση γνώση διαθέσιμη και δωρεάν και συνήθως απο του ιδιοκτήτες – διαχειριστές του δικτύου.

Στις επόμενες σελίδες λοιπόν θα παρουσιάσουμε κάποιους απο τους πιο διαδεδομένους μή εμπορικούς dump load controllers, θα καταδείξουμε τη λειτουργία τους είτε μέσω πραγματικών μετρήσεων είτε μέσω προσομοιώσεων που έγιναν με το πρόγραμμα LTSpice που είναι δωρεάν και τρέχει σε πλατφόρμες Windows και Linux (μέσω του δωρεάν λογισμικού wine) και δίνει τη δυνατότητα εικονικής δημιουργίας εκτεταμένων κυκλωμάτων και προσομοίωσης τους για διάφορα σενάρια λειτουργίας.

Τέλος θα παρουσιάσουμε τη δική μας πρόταση και υλοποίηση για dump load controller, που αφορά την γεννήτρια των 850W που βρίσκεται στο εργαστήριο και έγινε με τη βοήθεια της πρωτότυπης πλατφόρμας υλοποίησης ανοιχτού κώδικα Arduino σε συνδυασμό με ολοκληρωμένα κυκλώματα που ελέγχονται απο τον Arduino. Στη συνέχεια θα γίνει σύγκριση μεταξύ των υλοποιήσεων και θα αναλυθούν οι λόγοι για τους οποιος καταλήξαμε στην κατασκευή με βάση την πλατφόρμα Arduino ,ενώ θα κατατεθούν προτάσεις για την περαιτέρω βελτίωση της κατασκευής μας.

4.2.1 Folkecenter Dump Load Controller

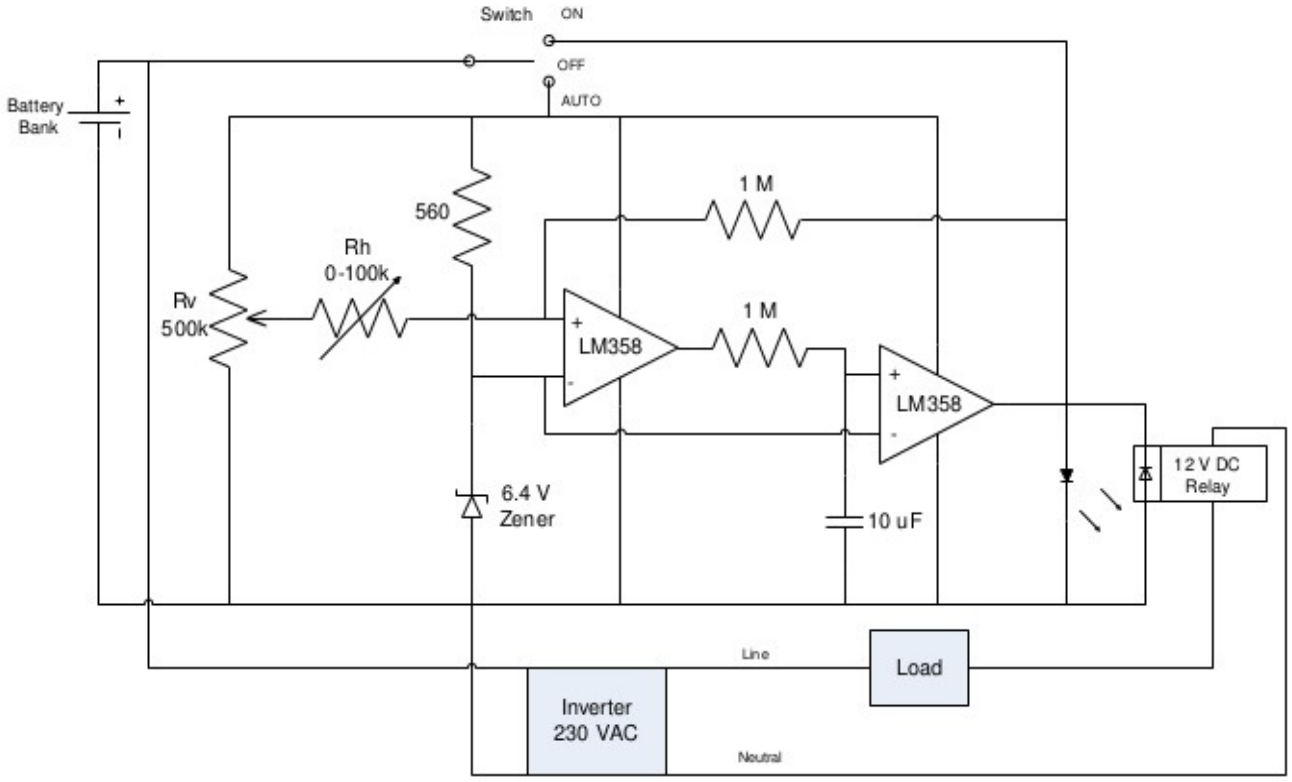
4.2.1.1 Παρουσίαση του κυκλώματος και επεξήγηση της λειτουργίας του

Ο πιό απλός απο τους ελεγκτές τους οποίους εξετάσαμε είναι αυτός που ανέπτυξαν και υλοποίησαν στο Folkecenter στη Νορβηγία, το οποίο είναι ένας ανεξάρτητος μή κυβερνητικός οργανισμός που δημιουργήθηκε το 1983 με σκοπό ακριβώς την έρευνα και την ανάπτυξη τεχνολογιών και καινοτομιών

που αφορούν σε μικρής και μεσαίας κλίμακας έργα με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η ιστοσελίδα τους ειναι η www.folkecenter.dk/en/ [12].

Ο Dump Load Controller που υλοποίησαν είναι ουσιαστικά ένα ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου με ρελέ το οποίο βασίζεται πάνω στο ολοκληρωμένο LM358 που είναι ένας τελεστικός ενισχυτής και στο εν λόγω κύκλωμα παίζει το ρόλο του "εγκεφάλου" καθώς είναι υπεύθυνο για τα σήματα ελέγχου στην είσοδο του ρελέ.

Το κύκλωμα περιλαμβάνει ένα μεταβλητής τάσης σημείο πυροδότησης, υστέρηση τάσης και ενσωματωμένη χρονοκαθυστέρηση για να αποφεύγονται οι απότομες μεταβολές. Το κύκλωμα σε αναπαράσταση φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 4.2 Η κυκλωματική διάταξη του ελεγκτή απο το Folkecenter

Ο ελεγκτής αυτός αφορά συστήματα 12V αλλά με κατάλληλη αλλαγή της Zener θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και σε συστήματα 24V. Επίσης αν θέλαμε να τον αξιοποιήσουμε σε συστοιχία συσσωρευτών 48V θα έπρεπε να χρησιμοποιήσουμε ένα ακόμα ρυθμιστή τάσης. Όπως βλέπουμε και στο σχήμα ο ελεγκτής περιλαμβάνει ένα διακόπτη ON ,OFF, AUTO. Η ένδειξη ON σημαίνει άμεση και

απευθείας σύνδεση της μπαταρίας στο κύκλωμα ,ενεργοποιώντας έτσι το ρελέ. Η ένδειξη OFF σημαίνει αποσυνδεδεμένη τάση μπαταρίας ενώ ή ένδειξη AUTO σημαίνει αυτόματο έλεγχο του ρελέ μέσω του κυκλώματος του ελεγκτή.

Επίσης η διάταξη περιλαμβάνει ένα ποτενσιόμετρο (Rv) το οποίο ελέγχει το επίπεδο της τάσης στο οποίο το ρελέ θα κάνει τις αλλαγές του, δηλαδή πότε θα ανοίξει αν είναι πάνω απο τα επιθυμητά επίπεδα και πότε θα κλείσει όταν η τάση πέσει κάτω απο ένα καθορισμένο σημείο. Η μεταβλητή αντίσταση Rh ελέγχει την υστέρηση, δηλαδή πόσο πάνω απο την τιμή της Rv πρέπει να είμαστε για να ανοίξει το ρελέ και πόσο κάτω απο το σημείο που έχει τεθεί στην Rv πρέπει να είναι η τάση της μπαταρίας για να απενεργποιηθεί το ρελέ.

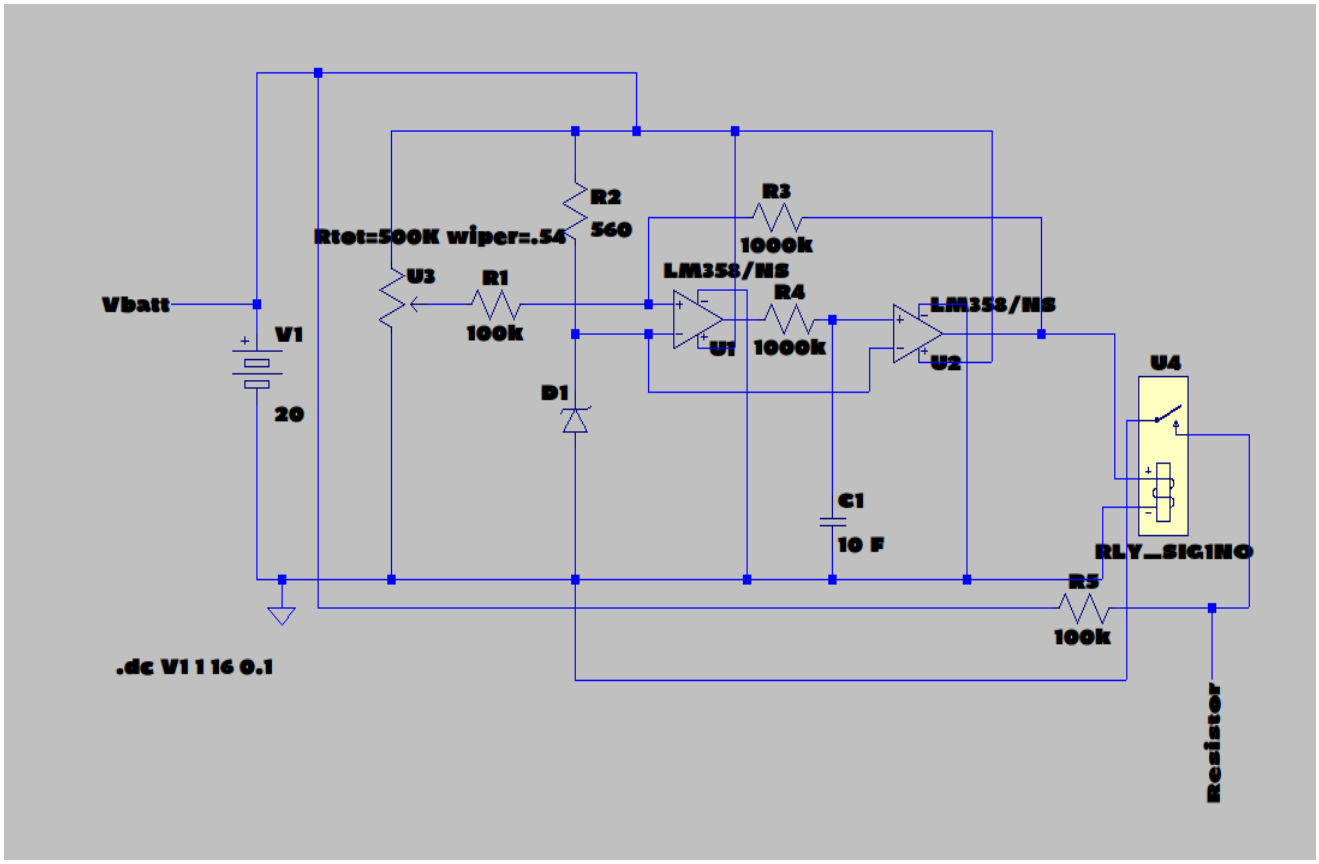
Τέλος το κύκλωμα περιλαμβάνει ένα RC κύκλωμα καθυστέρησης μεταξύ των σταδίων του τελεστικού ενισχυτή με στόχο την μείωση των παρασιτικών συχνοτήτων και τη προστασία του κυκλώματος σε έντονες αλλά μικρής διάρκειας ριπές ισχύος είτε απο φωτοβολταϊκά είτε απο ανεμογεννήτριες. Αυτό επιτυγχάνεται καθώς το κύκλωμα "περιμένει" η τάση να παραμείνει κάτω ή πάνω απο το επίπεδο που έχει τεθεί για λίγα δευτερόλεπτα πρίν στείλει σήματα στο ρελέ να αλλάξει κατάσταση.

Στο κύκλωμα που φαίνεται παραπάνω το ρελέ που χρησιμοποιείται είναι ένα μοντέλο RTE24012 ικανό να αντέξει 8 – 10 A. Για μεγαλύτερες τιμές ρεύματος χρειαζόμαστε ρελέ διαφορετικών προδιαγραφών.

4.2.1.2 Προσομοίωση στο LTSpice

Το λογισμικό LTSpice όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι ένα πρόγραμμα εικονικής αναπαράστασης και προσομοίωσης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων με αρκετά απλό και κατανοητό τρόπο λειτουργίας, σημαντικό αριθμό έτοιμων βιβλιοθηκών αλλά και αρκετά δυνατή και ενεργή κοινότητα χρηστών στο διαδίκτυο, κάτι που διευκολύνει αρκετά τη ροή εργασίας. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία καθώς ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα κατά την προσομοίωση κυκλωμάτων είναι πρώτον η έλλειψη βιβλιοθηκών για διάφορα κομμάτια της εκάστοτε εργασίας, δεύτερον η έλλειψη τεκμηρίωσης για το κάθε ένα ολοκληρωμένο και τρίτον τα προβλήματα που παρουσιάζονται στη συνεργασία των ολοκληρωμένων ή γενικότερα των επιμέρους κομματιών της εργασίας μεταξύ τους. Αυτά ήταν και τα ζητήματα που αντιμετωπίσαμε και εμείς κατά τη διάρκεια της έρευνάς μας και ενώ ξεκινήσαμε να δουλεύουμε πάνω στην πλατφόρμα gEDA , η οποία είναι ανοιχτού κώδικα και επιτελεί λειτουργίες παρόμοιες με αυτές του LTSpice η έλλειψη ενεργής κοινότητας και επομένως και βιβλιοθηκών – βοήθειας είχε ως αποτέλεσμα την επιλογή της πλατφόρμας LTSpice.

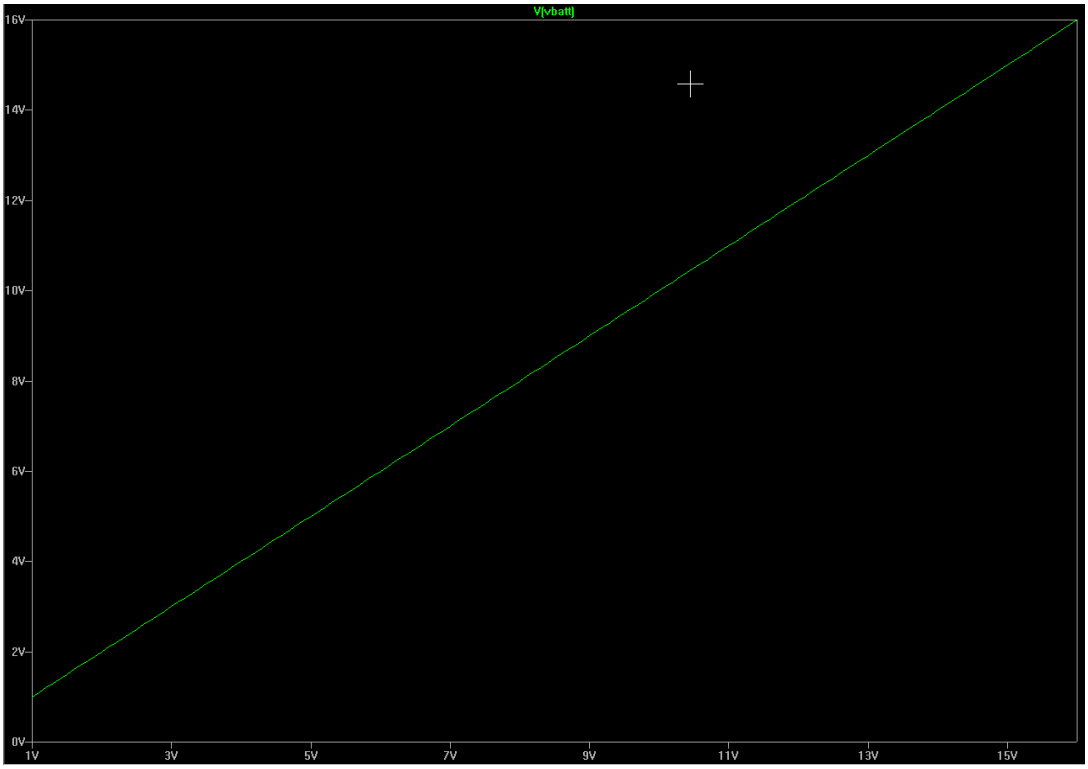
Για τον ελεγκτή απο το Folkecenter η εικονική του αναπαράσταση σε περιβάλλον LTSpice είναι η παρακάτω :



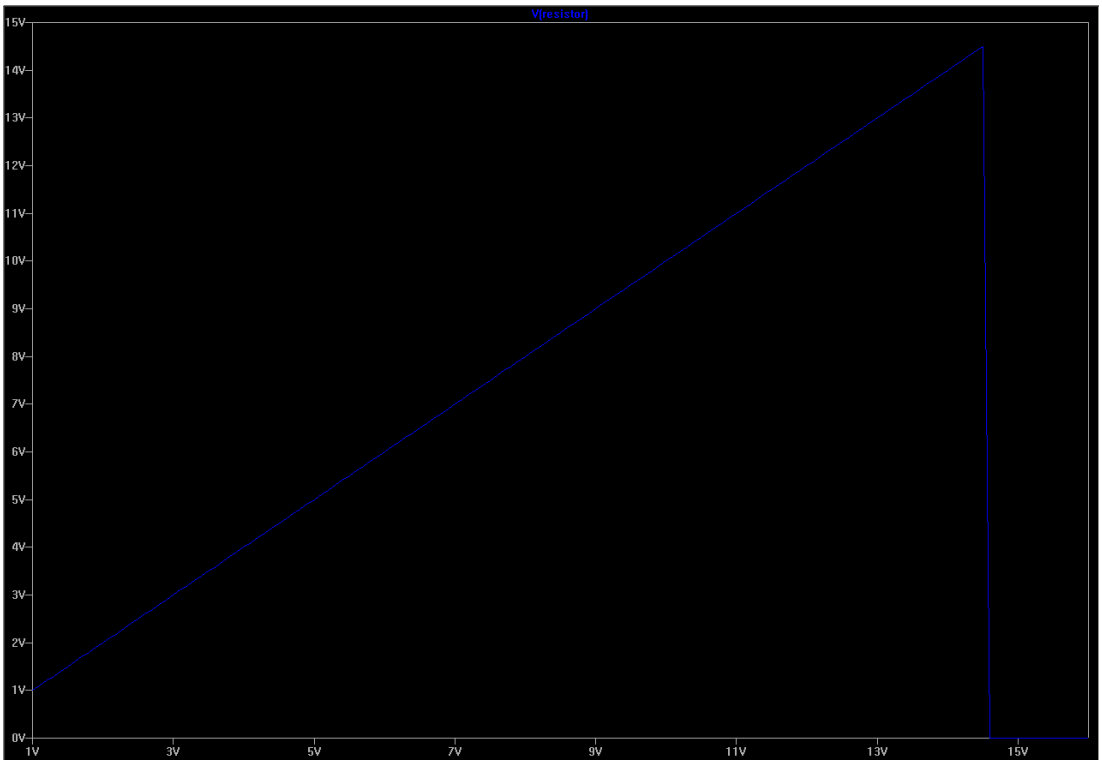
Σχήμα 4.3 Αναπαράσταση στο LTSpice του ελεγκτή Folkecenter

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.3 για τους σκοπούς της προσομοίωσης η κυκλωματική διάταξη έχει απλοποιηθεί. Για παράδειγμα λείπει ο διακόπτης ON, OFF, AUTO καθώς για να τρέξει η προσομοίωση η διάταξη είναι ήδη σε λειτουργία AUTO , το απορριπτικό φορτίο αναπαρίσταται απο μία αντίσταση με τυχαία τιμή 100 kOhm, ενώ το ρελέ είναι απο βιβλιοθήκη που μας προσφέρθηκε απο την κοινότητα του LTSpice στο διαδίκτυο. Επίσης η μεταβλητή αντίσταση Rh αντικαταστάθηκε απο μία αντίσταση της οποίας την τιμή μεταβάλλουμε εμείς λόγω προβλημάτων που μας δημιούργησε κατα τη προσομείωση.

Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται τόσο οι μεταβολές της τάσης της μπαταρίας,όσο και η τάση στα άκρα του ρελέ. Στην ουσία αυτό που θέλουμε είναι το άκρο του ρελέ που έχει την ετικέτα "Resistor" στο σχήμα 4.3 να κλείνει, δηλαδή να γειώνεται εν προκειμένω, όταν η τάση της μπαταρίας φτάσει τα επιθυμητά επίπεδα ,στην περίπτωσή μας τα 14.4V και ναι ανοίγει, δηλαδή να έχει τάση ίση με αυτή της μπαταρίας όταν πέσει η τάση της μπαταρίας κάτω απο τα 13.52V. Η πρώτη λειτουργία έχει ως αποτέλεσμα το ένα άκρο του απορριπτικού φορτίου να γειώνεται με αποτέλεσμα η ισχύς της μπαταρίας να ρέει πάνω του, ενώ η δεύτερη "εξουδετερώνει" το φορτίο μιάς και δεν υπάρχει διαφορά τάσης στα άκρα του (και στα δύο άκρα του έχει τάση ίση με αυτή της μπαταρίας) και επομένως η ισχύς δε ρέει πάνω στο απορριπτικό φορτίο αλλά στα φορτίο που τροφοδοτεί στην κανονική της λειτουργία η μπαταρία.



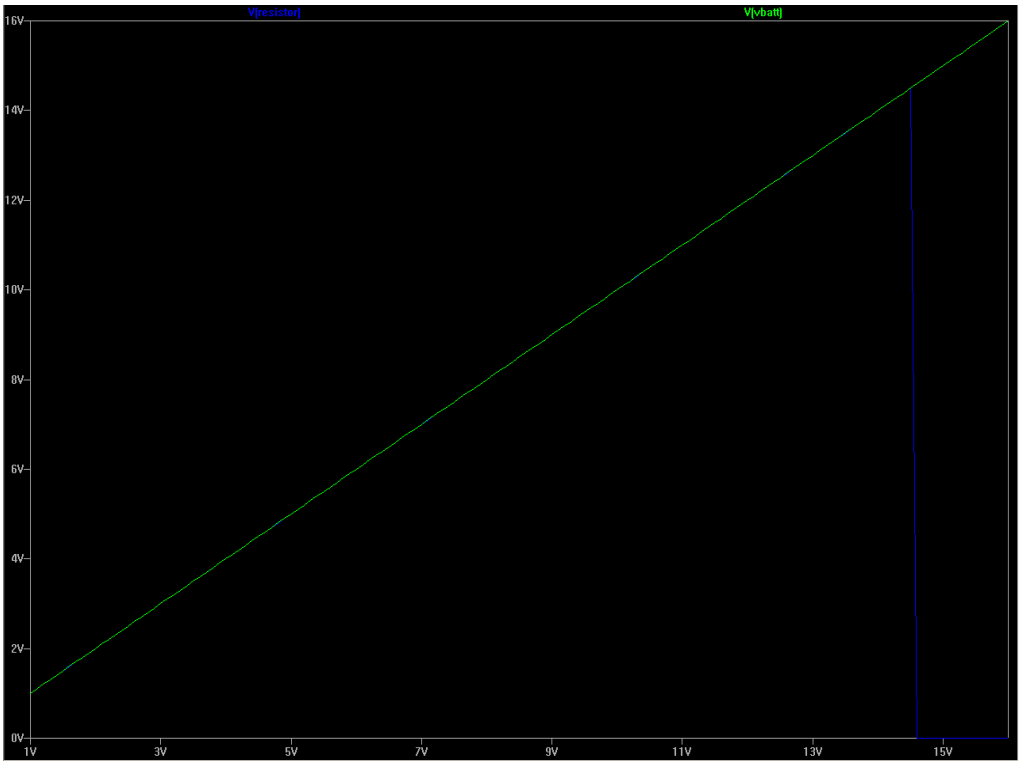
Σχήμα 4.4 Η τάση της μπαταρίας απο 1 εώς 15 V



Σχήμα 4.5 Η τάση στο ένα άκρο του απορριπτικού φορτίου , ή διαφορετικά η τάση στην έξοδο του ρελέ

Το κύκλωμα μας ανταποκρίνεται ικανοποιητικά στα όριο πού του έχουμε θέσει, δηλαδή στα 14.4V όντως το ένα άκρο του απορριπτικού φορτίου γειώνεται με αποτέλεσμα η επιπλέον ισχύς να διοχετεύεται σε αυτό.

Και οι δύο τάσεις μαζί φαίνονται στο παρακάτω σχήμα για περισσότερη εποπτική κατανόηση :

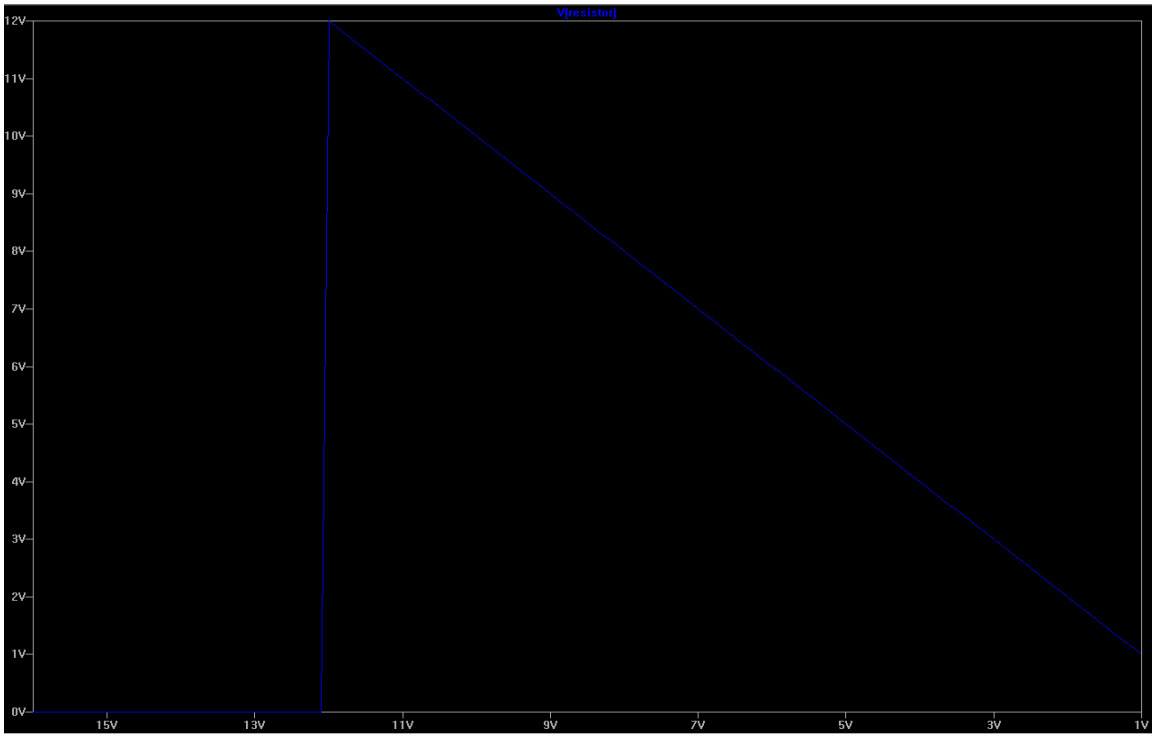


Σχήμα 4.6 Και οι δύο τάσεις συγκεντρωμένες στο ίδιο σχήμα

Ένα σημείο που θέλει προσοχή κατά την ανάλυση των προσομοιώσεων είναι ότι η τάση της μπαταρίας που φαίνεται στα σχήματα, στο σχήμα 4.6 είναι η πράσινη γραμμή για παράδειγμα, στην ουσία δεν αποτελεί την πραγματική τάση της μπαταρίας ,αλλά την πηγή της προσομοίωσης ,δηλαδή την τάση με την οποία τροφοδοτούμε το σύστημα μας για να πάρουμε χρήσιμα αποτελέσματα. Αυτό έχει αξία διότι στα σχήματα τα συγκεντρωτικά θα φαίνεται η τάση της μπαταρίας να αυξάνεται ακόμα και όταν το απορριπτικό φορτίο είναι αντός συστήματος. Αυτό προφανώς δεν ισχύει στην πραγματικότητα αλλά ανάλυση μας δεν επικεντρώνουμε στο τί κάνει η μπαταρία μετά της είσοδο ή την έξοδο του φορτίου αλλά τη λειτουργία των ελεγκτών. Εν ολίγοις αυξάνουμε ή μειώνουμε γραμμικά την τάση που τροφοδοτεί ή "βλέπει" ο ελεγκτής και παρατηρούμε τη συμπεριφορά του. Αυτή η αύξηση ή μείωση της τάσης φαίνεται ότι είναι και η τάση της μπαταρίας στην πραγματικότητα ενώ στην ουσία είναι μόνο η τάση που εφαρμόζουμε στα άκρα του κυκλώματος μας.

Στην προσπάθεια μας να προσομοιώσουμε τη συμπεριφορά κατά την οποία το φορτίο μας βγαίνει από το σύστημα όταν η τάση είναι κάτω απο ένα επίπεδο ,στην περίπτωση μας τα 13.5V δεν κατέστη δυνατό

να “φτιάξουμε” το επιθυμητό επίπεδο τάσης ,μεταβάλλοντας τις τιμές των Rv, Rh χωρίς να μεταβληθεί αντίστοιχα και η τάση στην οποία θέλουμε να εισέρχεται το φορτίο στο σύστημα μας.



Σχήμα 4.7 Η τάση στα άκρα του φορτίου συναρτήσει της τάσης της μπαταρίας κατά την έξοδο του απορριπτικού φορτίου απο το σύστημα μας

Ήδη απο το παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι για τις τιμές που θέσαμε έτσι ώστε να πετύχουμε τη συμπεριφορά του σχήματος 4.6, δηλαδή το φορτίο να μπαίνει στο σύστημα στα 14.4V, η τάση στην οποία βγαίνει το φορτίο είναι περίπου 12.3V η οποία είναι εξαιρετικά χαμηλή και δεν ανταποκρίνεται στις προδιαγραφές που έχουμε θέσει. Αυτό σημαίνει ότι ναι μέν το σύσημα θα λειτουργεί ικανοποιητικά κατά την είσοδο του φορτίου αλλά η πολύ χαμηλή τάση εξόδου έχει ώς αποτέλεσμα να είμαστε σε λειτουργία απορριπτικού φορτίου για μεγάλο χρονικό διάστημα με αποτέλεσμα να αποφορτίζεται η μπαταρία, κάτι που μπορεί να οδηγήσει στη μείωση της απόδοσης της και πιθανώς την καταστροφή της αν το παραπάνω γίνεται για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Συνοψίζοντας σε ότι αφορά στον ελεγκτή του Folkecenter μπορούμε να πούμε ότι ενώ είναι μια ιδιαίτερα οικονομική επιλογή και αρκετά απλή στην υλοποίηση της με υλικά που είναι εύκολο να προμηθευτούν, η δυσκολία που παρουσιάζει κατά τη παραμετροποίησή του με αποτέλεσμα την ελλιπή δυνατότητα ρύθμισης την καθιστούν καλή επιλογή μόνο για εφαρμογές μικρής κλίμακας όπως μία συστοιχία λαμπών ή κάτι ανάλογο σε σύνδεση με μπαταρίες 12V, καθώς για εφαρμογές πιο πολύπλοκες και με μεγαλύτερα φορτία που απαιτούν συνεχή παρακολούθηση και πλήρη παραμετροποίηση της λειτουργίας του ελεγκτή, θεωρούμε ότι μάλλον είναι ελλιπής. Ένα ακόμα μειονέκτημά του είναι η απουσία δυνατότητας οποιασδήποτε προσθήκης με απλό και κατανοητό

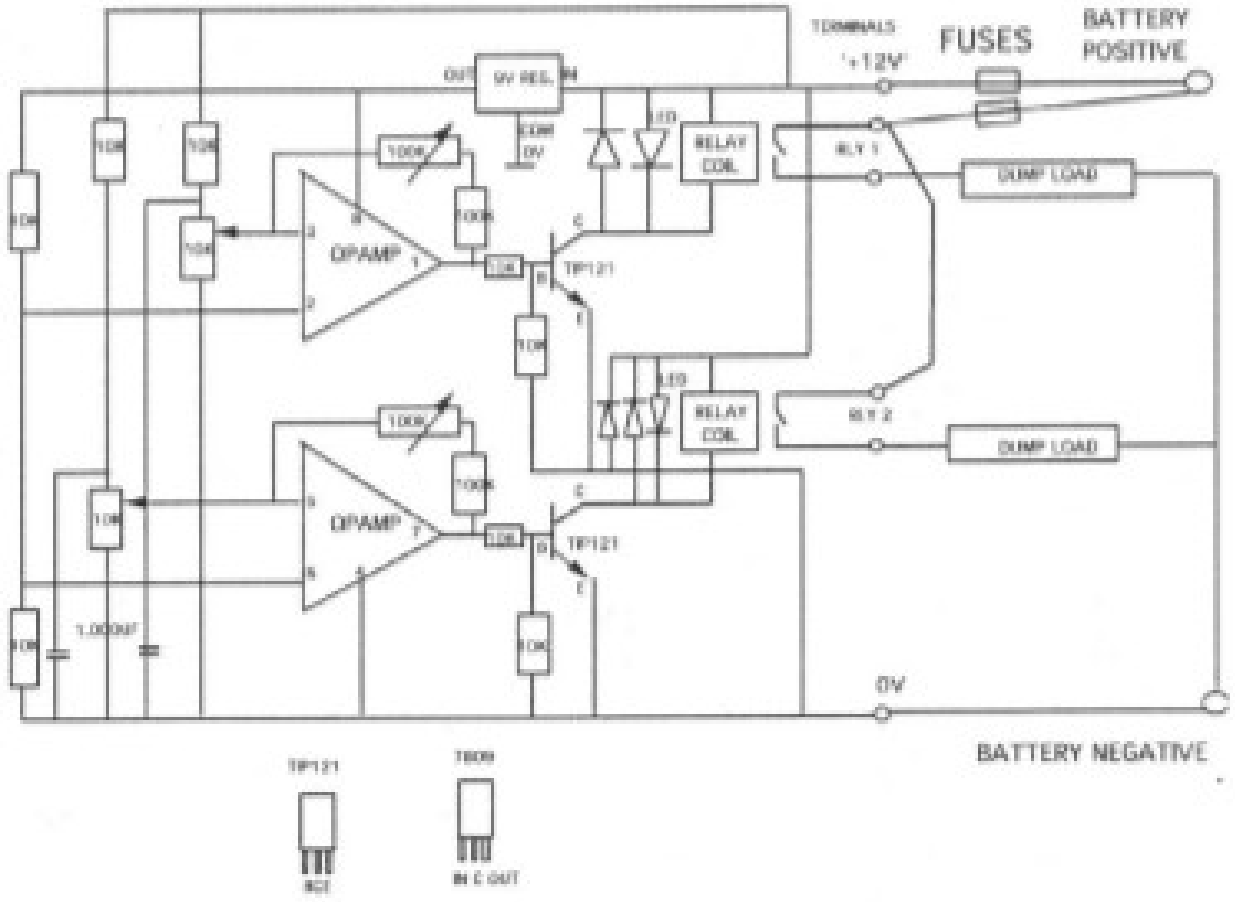
τρόπο, για παράδειγμα έναν αισθητήρα τάσης ή ρεύματος , χωρίς να χρειαστεί να αλλάξουν τόσο τα κομμάτια που τον αποτελούν αλλά και η ίδια η τοπολογία του ελεγκτή.

4.2.2 Hugh Piggott Dump Load Controller

4.2.2.1 Παρουσίαση του κυκλώματος και επεξήγηση της λειτουργίας του

Ο επόμενος ελεγκτής με τον οποίο ασχοληθήκαμε είναι αυτός που ανέπτυξε και παρουσίασε στο έργο του "Hugh Piggott : How to build a small wind turbine" ο ίδιος ο Piggott και αποτελεί στην ουσία τη βάση πάνω στην οποία αναπτύχθηκε και ο ελεγκτής της προηγούμενης ενότητας. Και εδώ δεν έχουμε να κάνουμε με ελεγκτή που να βασίζεται σε microcontrollers όπως αυτός που κατασκευάσαμε στο εργαστήριο αλλά σε ολοκληρωμένα και σε ρελέ. Η ιστοσελίδα του όπου μπορεί κάποιος να βρεί περισσότερες πληροφορίες είναι η http://scoraigwind.co.uk/ .

Πιο συγκεκριμένα το ρόλο του "εγκεφάλου" του κυκλώματος παίζει το ολοκληρωμένο LM741 καθώς αυτό είναι που τελικά δίνει τα καθοριστικά σήματα στα transistors και επομένως και στις εισόδους των ρελέ για να ανοίξουν ή να κλείσουν αντίστοιχα. Αξίζει να σημειωθεί ότι και αυτός ο ελεγκτής αφορά και είναι κατασκευασμένος για συστήματα 12V και όπως και αναφέρει ο Piggott στην εργασία του κάθε σύστημα απαιτεί δύο ελεγκτές και 4 φορτία των 10A για να ελέγξουμε το ρυθμό φόρτισης, ενώ για συστήματα 24V απαιτούνται κάποιες τροποποιήσεις, όπως η αλλαγή του ρυθμιστή τάσης απο τα 9V στα 12V και αλλαγές των μεταβλητών αντιστάσεων απο τα 10 kOhm στα 18 kOhm. Επίσης καλό θα είναι να αλλάξουν και τα ρελέ καθώς αυτά που χρησιμοποιεί ο Piggott αναφέρει ότι δεν είναι τόσο ανθεκτικά όσο θα ήθελε. Στη συνέχεια παρουσιάζουμε το πρωτότυπο σχέδιο και επεξηγούμε τη λειτουργία του .

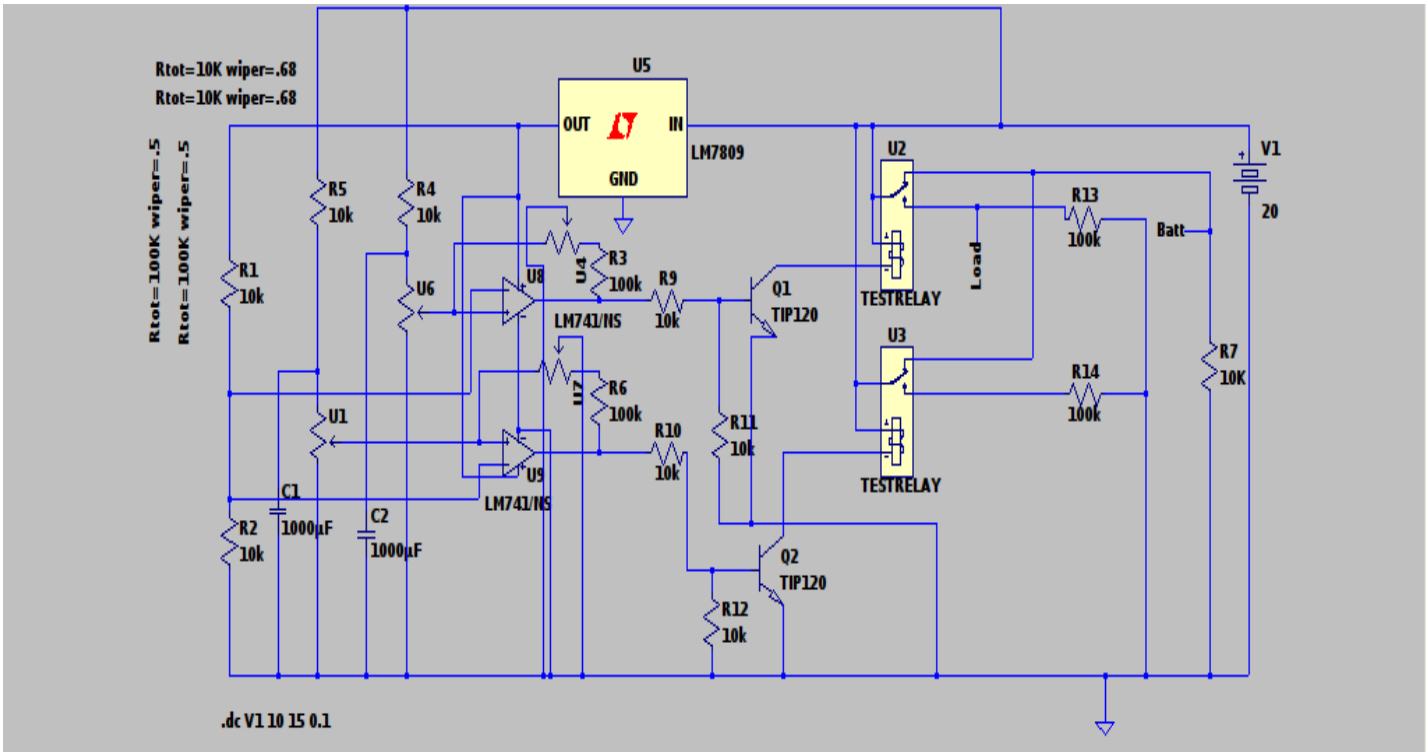


Σχήμα 4.8 Σχέδιο του ελεγκτή όπως παρουσιάζεται στην εργασία του Piggott.

΄Οπως φαίνεται στο σχήμα αρχικά το κύκλωμα τροφοδοτείται κατευθείαν απο τη μπαταρία και μέσω του ρυθμιστή τάσης (LM7809) σταθεροποιούμε την τάση στα 9V που είναι απαραίτητα για τη λειτουργία του κυκλώματος. Υπεύθυνα για την τάση στην οποία τα απορριπτικά φορτία εισέρχονται στο σύστημα και επομένως η ισχύς των μπαταριών καταναλώνεται πάνω τους ελέγχεται και καθορίζεται απο τα δύο ποτενσιόμετρα των 10 kOhm τα οποία βρίσκονται στις εισόδους 3 και 5 του LM741 που ελέγχουν και οδηγούν στην ουσία τη συμπεριφορά των LM741 και των transistors (TIP120 – 121). Αυτά με τη σειρά τους δίνουν τα σήματα στις εισόδους των ρελέ και παράλληλα ανάβουν ή σβήνουν τα LEDs που είναι προσαρτημένα στο κύκλωμα. Στην ιστοσελίδα του ο Piggott τονίζει ότι ένα καλό επίπεδο τάσης στο οποίο είναι καλό να γίνεται αυτή η αλλαγή είναι τα 14.5V και αντίστροφα να "βγαίνουν" τα φορτία στα 13.5V. Το τελευταίο ρυθμίζεται μέσω των μεταβλητών αντιστάσεων των 100 kOhm που βρίσκονται μεταξύ των εισόδων 1 – 3 και 7 – 5 του LM741 που αποτελούν τα ολοκληρωμένα που ορίζουν την υστέρηση μεταξύ της τάσης εισόδου και εξόδου των φορτιών μέσω των ρελέ τα οποία πρέπει να είναι 12V και να αντέχουν 16A.

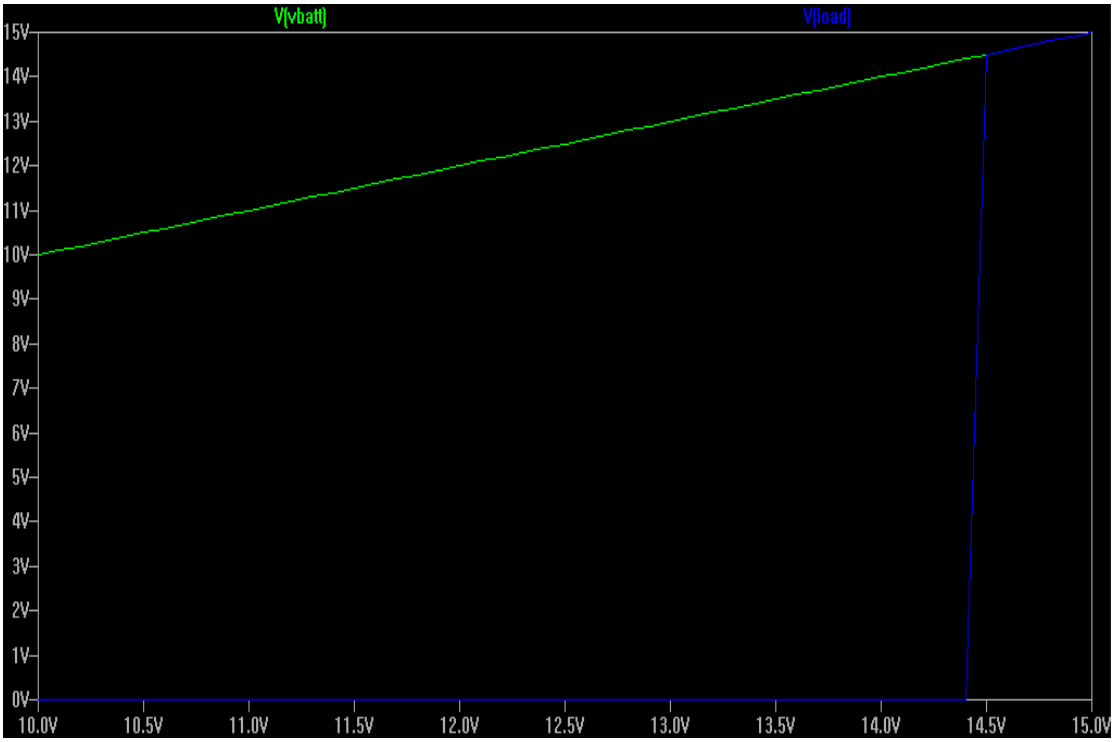
4.2.2.2 Προσομοίωση στο LTSpice

Η αναπαράσταση του ελεγκτή στο λογισμικό LTSpice είναι η παρακάτω:



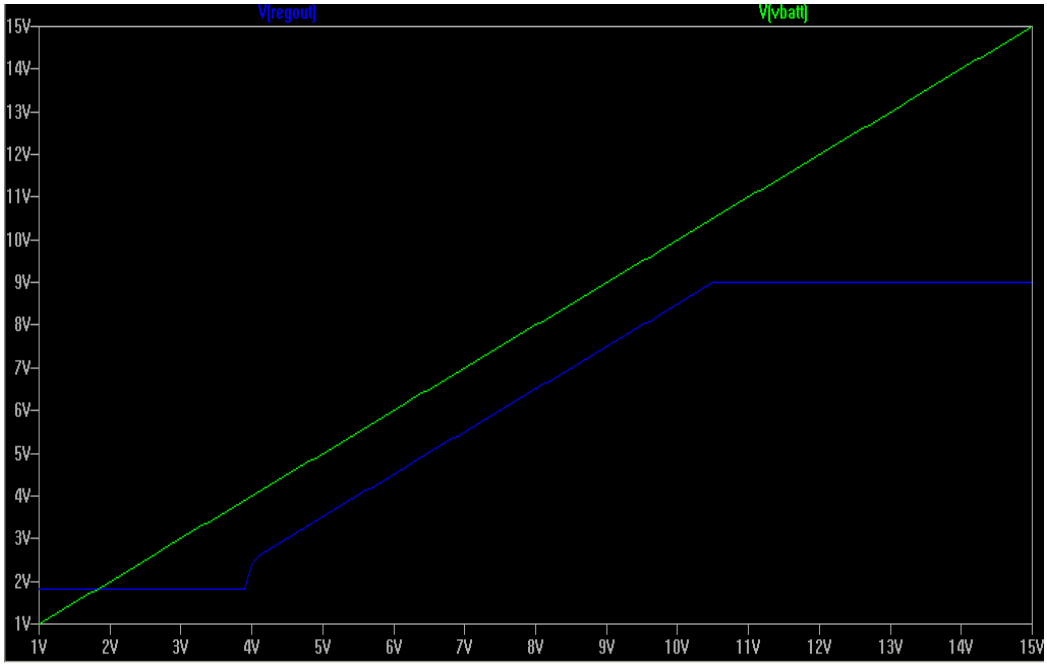
Σχήμα 4.9 Η κυκλωματική αναπαράσταση του Dump Load Controller του Piggott στο λογισμικό LTSpice

Και εδώ όπως και στην αντίστοιχη προσπάθεια με τον ελεγκτή που αναπτύχθηκε στο Folkecenter το κύκλωμα παρουσιάζει κάποιες τροποποιήσεις - απλοποιήσεις με σκοπό την ευκολότερη προσομοίωση αλλά και την καλύτερη εποπτεία του όλου συστήματος. Για παράδειγμα τα LEDs έχουν αφαιρεθεί και το κύκλωμα τροφοδοσίας έχει διαφορετική τοπολογία κάτι που διευκόλυνε αρκετά στην ανάλυση των παρισμάτων της προσομοίωσης. Η λογική κατά τη λειτουργία είναι παρόμοια με αυτή της προηγούμενης ενότητας : Αυξάνουμε την τάση της πηγής V1 που αντιπροσωπεύει την τάση της μπαταρίας 12V και κοιτάμε την τάση στα άκρα των ρελέ, στο σχήμα 4.9 φέρουν την ετικέτα Load, και στη συνέχεια μειώνουμε την τάση ελέγχοντας πάλι τη συμπεριφορά των άκρων των ρελέ. Επίσης θα δείξουμε και τη λειτουγία του ρυθμιστή τάσης LM7809.



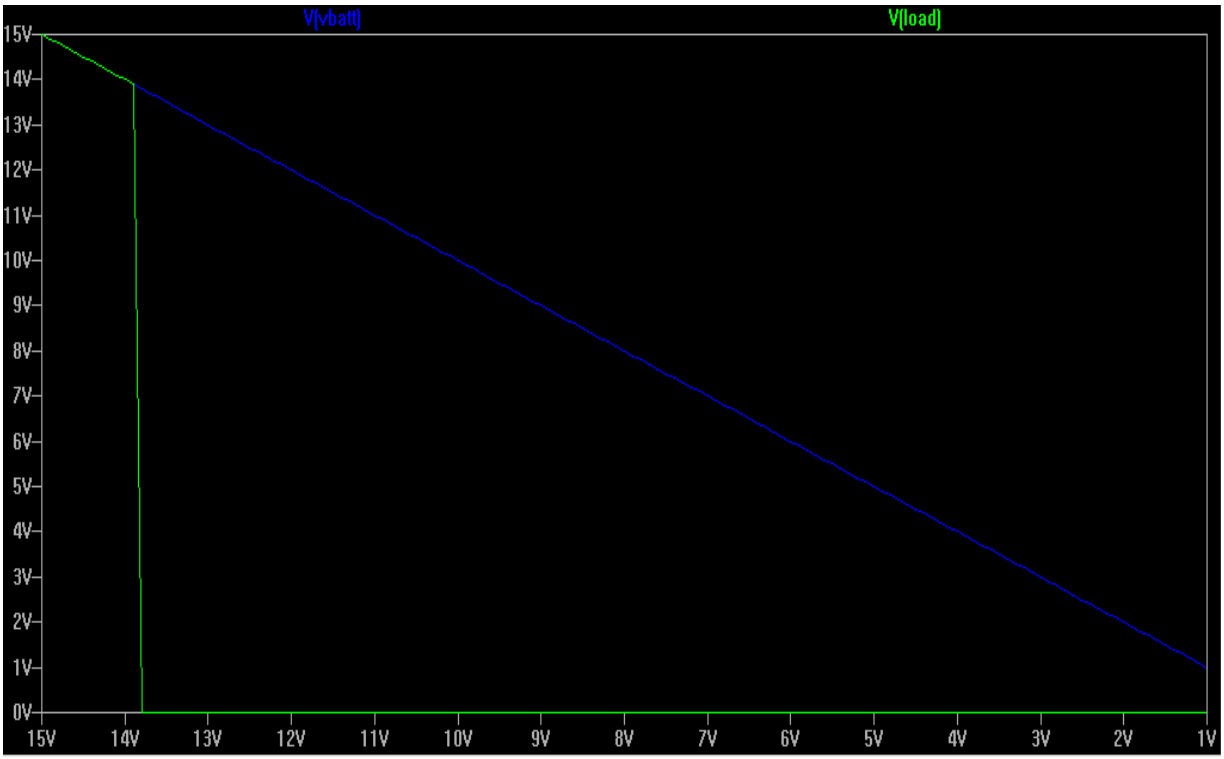
Σχήμα 4.10 Οι τάσεις της μπαταρίας και στα άκρα των απορριπτικών φορτίων

Παρατηρούμε λοιπόν εδώ ότι όντως μετά απο ρύθμιση των μεταβλητών αντιστάσεων και των ποτενσιόμετρων καταφέραμε να επιτύχουμε τα απορριπτικά φορτία μας να "μπαίνουν" στο σύστημα στα 14.5V.



Σχήμα 4.11 Η τάση στην είσοδο του ρυθμιστή τάσης (πράσινη γραμμή) και η τάση στην έξοδο του (μπλέ γραμμή)

Βλέπουμε λοιπόν ότι ο ρυθμιστής τάσης αυτό που ουσιαστικά κάνει είναι να κρατάει σταθερή την τάση στην είσοδο του μέχρι μια cut-in τάση, στο παράδειγμά μας τα 4 volt περίπου, στην συνέχεια να αυξάνει την τάση ανάλογα με την τάση στην είσοδο του και στη συνέχεια να τη κρατάει σταθερή στα 9V ανεξάρτητα με την περαιτέρω αύξηση της τάσης εισόδου. Αυτό τα συγκεκριμένα ολοκληρωμένα το πετυχαίνουν μετατρέποντας την επιπλέον ισχύ σε θερμότητα και γι' αυτό το λόγο έχουν και πολύ χαμηλή ενεργειακή απόδοση.



Σχήμα 4.12 Η τάση στα άκρα του φορτίου (πράσινη γραμμή) κατά τη μείωση της τάσης της μπαταρίας

Κατά τη μείωση της μπαταρίας ο στόχος μας είναι τα φορτία να "βγαίνουν" εκτός συστήματος στα 13.5V. Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα το σημείο που βγαίνουν τα φορτία δεδομένης της ρύθμισης που είχε γίνει αρχικά είναι τα 13.7V, τιμή αρκετά ικανοποιητική και εντός των προδιαγραφών που έχουμε θέσει για τα επιθυμητά επίπεδα τάσης.

Όσον αφορά λοιπόν στον παραπάνω ελεγκτή, συμπερασματικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι η λειτουργία του για τις συνθήκες της προσομοίωσης είναι άκρως αποτελεσματική και ικανοποιητική. Δεν παρατηρήθηκαν αστάθειες κατά τις μεταβάσεις ενώ η δυνατότητα ρύθμισης και παραμετροποίησης τόσο κατά την διαδιακασία εισόδου των απορριπτικών φορτίων αλλά και και κατά την έξοδο. Το κόστος του είναι αρκετά χαμηλό και τα επιμέρους τμήματά του είναι εύκολα προσβάσιμα σε καταστήματα ηλεκτρονικών σε όλο τον ελλαδικό χώρο. Επίσης σε σχέση με τον ελεγκτή του Folkecenter η λειτουργία του είναι πιό πλήρης και κατανοητή λόγω των επιπλέον ολοκληρωμένων ενώ και απο άποψη εποπτείας της λειτουργίας του είναι πιό πλήρης καθώς ο μεγαλύτερος αριθμός LEDs για κάθε μία λειτουργία εξασφαλίζει καλύτερο έλεγχο σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Τέλος να

τονιστεί το γενονός ότι το μόνο μέρος του το οποίο παρουσιάζει προβλήματα κατά τη λειτουργία του είναι τα ρελέ όπως τονίζει και ο Piggott, λόγω μειωμένης αντοχής στο χρόνο, ενώ άξιο αναφοράς είναι και το ότι ελεγκτές σαν αυτό που παρουσιάσαμε χρησιμοποιούνται ήδη απο το Piggott σε διάφορες εφαρμογές και παράλληλα με αντίστοιχους εμπορικούς με λίγο πιο απαιτητικές λειτουργίες που αντιστοιχούν προφανώς και σε μεγαλύτερης κλίμακας εφαρμογές.

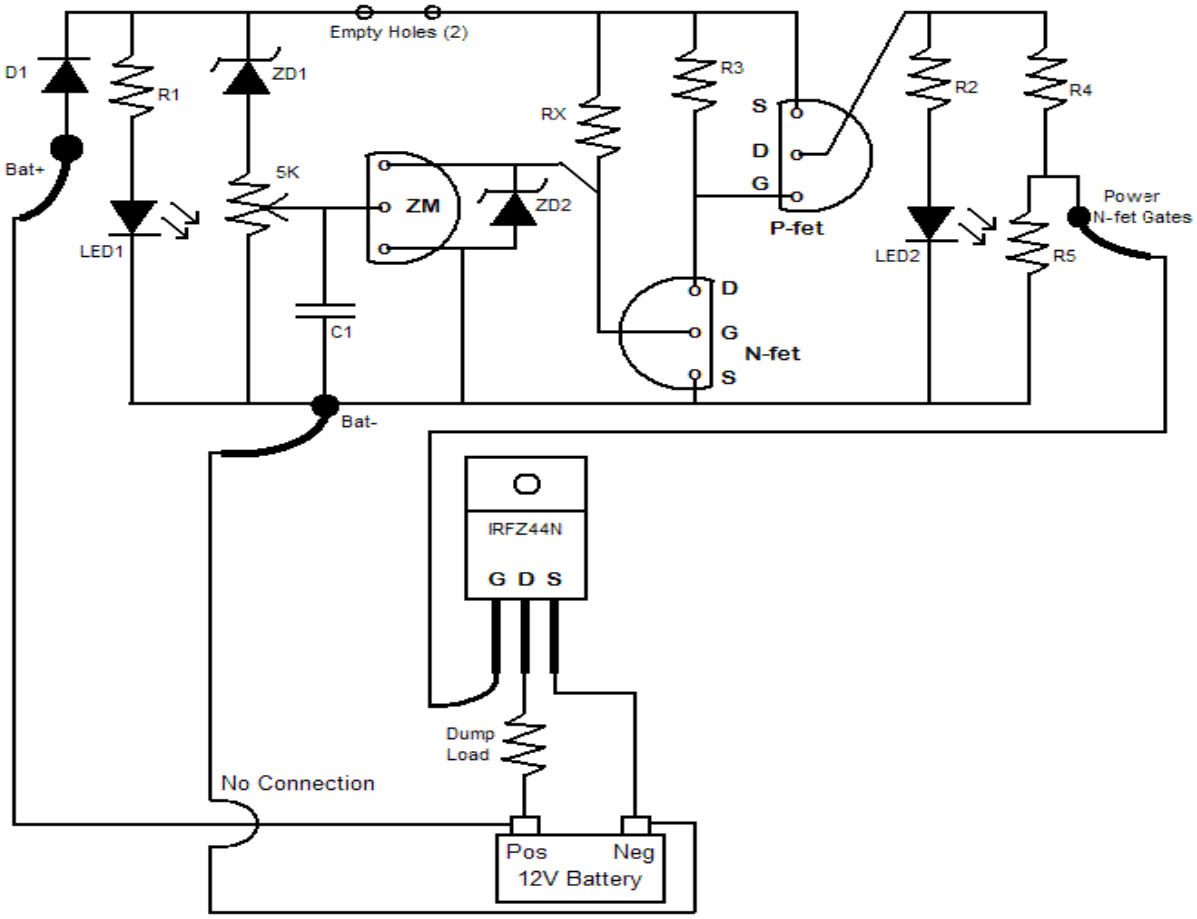
4.2.3 gHurd Dump Load Controller

4.2.3.1 Παρουσίαση του κυκλώματος και επεξήγηση της λειτουργίας του

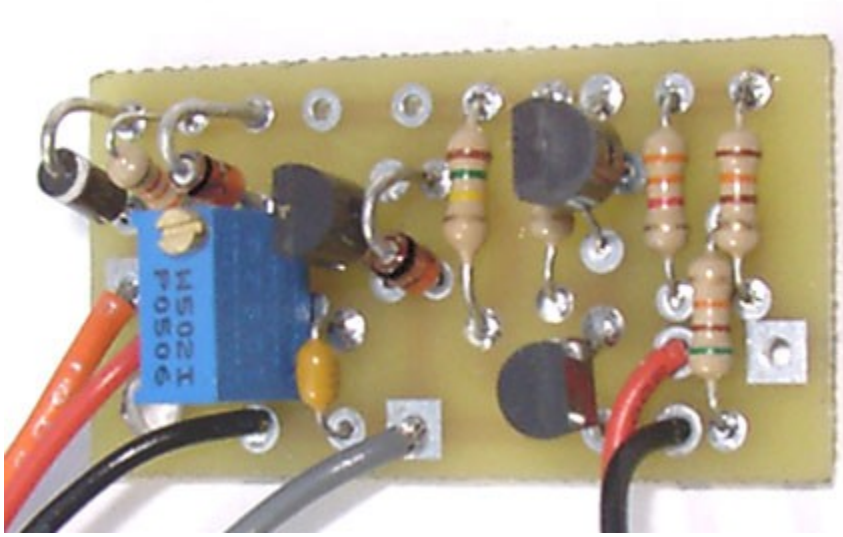
Ο επόμενος ελεγκτής με τον οποίο καταπιαστήκαμε είναι αυτός που ανέπτυξε ο Hurd και χρησιμοποιείται τόσο σε εφαρμογές με φωτοβολταϊκά όσο και σε αντίστοιχες με ανεμογεννήτριες. Σχεδιάστηκε και αυτός αρχικά για σύνδεση σε συσσωρευτές 12V ενώ με τροποποιήσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε 24V ή 48V. Η ιστοσελίδα του είναι η www.ghurd.info όπου υπάρχει λεπτομερέστατη περιγραφή τόσο του συγκεκριμένου ελεγκτή αλλά και διάφορων άλλων.

Η διαφορά του με τους δύο προηγούμενους είναι η παρουσία mosfet σε αντίθεση με τα μηχανικά ρελέ που αξιοποιούσαν οι προηγούμενοι. Το πλεονέκτημα αυτής της επιλογής είναι η απουσία μηχανικών μερών κάτι που εξασφαλίζει μεγαλύτερη αντοχή στο χρόνο και στις καταπονήσεις και η μεγαλύτερη ακρίβεια στη λειτουργία του, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε εφαρμογές όπου έχουμε συχνές μεταβάσεις απο την κατάσταση εισόδου των φορτίων και της κατάστασης εξόδου. Κεντρικό ρόλο στη λεττουργία του παίζει το ολοκληρωμένο ZM33064, το οποίο είναι ένας επόπτης παροχής τάσης (supply voltage monitor). Προορίζεται κυρίως για χρήση σε συστήματα ή κυκλώματα με μικροεπεξεργαστές λόγω της ακρίβειας της λειτουργίας του όσον αφορά στα σήματα που δίνει αλλά και στη δυνατότητα ρύθμισης της χρονικής του απόκρισης. Ένα απο τα πλέον σημαντικά του μειονεκτήματα είναι ότι η εταιρεία που είναι υπεύθυνη για την κατασκευή τους τα αντικατέστησε λίγο μετά την επιλογή τους για χρήση σε αυτόν τον ελεγκτή και επομένως η μή ευρεία χρήση τους είχε ως αποτέλεσμα να μην υπάρχουν βιβλιοθήκες στο LTSpice για την προσομοίωση του. Συνεπώς δε καταφέραμε να προχωρήσουμε σε κυκλωματική του ανάλυση αλλά προχωρήσαμε στην κατασκευή του στο εργαστήριο και στη μέτρηση του σε εργαστηριακές συνθήκες πλέον.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η κυκλωματική του αναπαράστασης και η φωτογραφία του πραγματικού κυκλώματος:



Σχήμα 4.13 Κυκλωματική απεικόνιση του gHurd Controller



Σχήμα 4.14 Ο ελεγκτής μετά τη συναρμολόγησή του

Τα κριτήρια επιλογής των υλικών της συγκεκριμένης πλακέτας είναι η απλότητα, η αποτελεσματικότητα και φυσικά το χαμηλό κόστος. Η αρχή λειτουργίας τους είναι ίδια όπως και στους υπόλοιπους ελεγκτές. Στην ουσία το ΖΜ "κοιτάει" την τάση των συσσωρευτών και στέλνει ανάλογα σήματα στα mosfets που με τη σειρά τους οδηγούν τα σήματα στο power mosfet IRFZ44N το οποίο είναι και υπεύθυνο για τις αλλαγές κατάστασης (είσοδος του απορριπτικού φορτίου – έξοδος). Η τάση εισόδου καθορίζεται ρυθμίζοντας το ποτενσιόμετρο των 5 kOhm και τα βοηθητικά LEDs δείχνουν τις δύο καταστάσεις : Το LED1 δείχνει οτι το κύκλωμα είναι συνδεδεμένο στις μπαταρίες, επί της ουσίας επιβεβαιώνει την τροφοδοσία του και το LED2 όταν ανάβει επιβεβαιώνει ότι το φορτίο "μπαίνει" στο σύστημα. Η πρώτη Zener μαζί με το ποτενσιόμετρο είναι ένας διαιρέτης τάσης που χρησιμοποιείται για να παρακολουθούμε την τάση της μπαταρίας. Όταν η τάση στην είσοδο του ΖΜ είναι κάτω απο 4,6V, τότε αυτό γειώνει την είσοδο του 2N7000 (N-fet) και το υπόλοιπο κύκλωμα βγαίνει εκτός. Όταν η τάση είναι μεγαλύτερη απο 4,6V τότε το ΖΜ ανοίγει και η τάση στην είσοδο του 2N7000 είναι 5,1V. Αυτό ενεργοποιεί και το υπόλοιπο κύκλωμα. Εν συνεχεία το *BSS92* (P-fet) βλέπει χαμηλή τάση και ανοίγει. Με τη σειρά του αυτό στέλνει σήμα στο IRFZ44N να ανοίξει με αποτέλεσμα το απορριπτικό φορτίο να είναι εντός του κυκλώματος. Η υστέρηση του κυκλώματος καθορίζεται μέσω της ρύθμισης της μεταβλητής αντίστασης RX η οποία ανάλογα με την τιμή της δηλώνει και μία τιμή σε volt που αποτελεί την υστέρηση. Ενδεικτικά αναφέρουμε κάποιες τιμές αντίστασης και τις αντίστοιχες σε volt :

1.8K/1.0V, 3K/0.8V, 3.9K/0.62V, 51K/0.14V, 100K/0.1V, 150K/0.08V, 180K/0.06V, 220K/0.04V

Τα όρια που έχουν τεθεί τόσο τα πάνω όσο και τα κάτω αποτελούν όρια ασφαλούς λειτουργίας και καλό θα ήταν να μη παραβιάζονται.

Στο εργαστήριο μετά απο παραγγελία των εξαρτημάτων που απαιτούνταν, προχωρήσαμε στη συναρμολόγηση της πλακέτας, διαδικασία εξαιρετικά εύκολη μιας και μαζί με τα εξαρτήματα που παραγγείλαμε στον Hurd, μας ήρθε τυπωμένη σε PCB η τοπολογία του κυκλώματος, οπότε σε πολύ λίγο χρονικό διάστημα είχαμε κατασκευάσει τον ελεγκτή μας. Στη συνέχεια προχωρήσαμε στο καλιμπράρισμα τόσο της τάσης εισόδου, δίνοντας τάση απο το τροφοδοτικό μας στα 14,4V και μεταβάλλοντας σταδιακά την αντίσταση του ποτενσιόμετρου, μέχρι να ανάψει το LED2 και επιβεβαιώσαμε το σήμα οδήγησης που καταλήγει στο IRFZ44N. Δεν παρουσιάστηκε κάποιο πρόβλημα κατά τη διάρκεια των μεταβάσεων και η διαδικασία ελέγχου και παραμετροποίησης ήταν απλή και κατανοητή.

Παρ' όλη την ευκολία κατασκευής του και παραμετροποίησης του, η παρουσία στο κύκλωμα ενός ολοκληρωμένου το οποίο είναι αρκετά δύσκολο να βρεθεί στο εμπόριο πλέον και πιθανώς ο μόνος τρόπος είναι μαζί με την πλακέτα απο τον ίδιο το Hurd, μάλλον καθιστά τον ελεγκτή μικρής αξίας καθώς οποιαδήποτε βλάβη ειδικά στο ΖΜ απαιτεί χρόνο αναμονής και έξοδα που δε δικαιολογούν κατά τη γνώμη μας τις λειτουργίες που προσφέρει. Επίσης ένα μειονέκτημα που μοιράζεται με όλους τους υπόλοιπους είναι ότι για την οποιαδήποτε προσθήκη αισθητήρα ή μέσου εποπτείας, πχ οθόνη ,ανεμόμετρο, ή αισθητήρα ρεύματος πρώτον απαιτείται αλλαγή στην τοπολογία του κυκλώματος και φυσικά η δυσκολία που θα είχε ένα τέτοιο εγχείρημα καθώς απαιτούνται εξειδικευμένα κυκλώματα και ολοκληρωμένα για να μπορέσουν να ενσωματωθούν και να λειτουργούν με αποτελεσματικότητα τα παραπάνω, καθιστούν οποιαδήποτε τροποποίηση πέρα αυτών που απαιτούνται για να συνδεθεί σε σύστημα 24V μάλλον ασύμφορα και εξαιρετικά χρονοβόρα. Επομένως ένα τέτοιος ελεγκτής ανταποκρίνεται με αποτελεσματικότητα ακριβώς σε αυτά που πρσοφέρει : "Αόρατη" στο χρήστη

εποπτεία της τάσης των συσσωρευτών και απλή οδήγηση σημάτων σε ένα power mosfet που με τη σειρά του οδηγεί το απορριπτικό φορτίο εντός και εκτός συστήματος.

4.2.4 Arduino Dump Load Controller

4.2.4.1 Λίγα λόγια για τους μικροελεγκτές

Όπως είδαμε και με την παρουσίαση των υπόλοιπων controllers, οι μή εμπορικοί ελεγκτές παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των αντίστοιχων εμπορικών κάποια απο τα οποία είναι το μικρό κόστος, η ευκολία στην κατασκευή, η απλότητα στη σχεδίαση και την επισκευή του κυκλώματος σε περίπτωση βλάβης. Παρουσιάζουν όμως και αρκετά μειονεκτήματα σημαντικότερο απο τα οποία είναι κατά τη γνώμη μας η μονολιθικότητα του κυκλώματος, υπό την έννοια ότι κάθε πλακέτα είναι φτιαγμένη για συγκεκριμένο τύπο σύνδεσης ,πχ 12V ή 24V, και κατ' αυτόν τον τρόπο οποιαδήποτε αλλαγή στο σύστημα τόσο στο κομμάτι της γεννήτριας αλλά και των συσσωρευτών απαιτεί είτε αλλαγή των ολοκληρωμένων ,για παράδειγμα των mosfet για να αντέχουν σε μεγαλύτερες τιμές ρεύματος, είτε ολόκληρης της σχεδίασης για να προστεθούν - αφαιρεθούν ολοκληρωμένα ή και υποκυκλώματα.

Σημαντικό επίσης ζήτημα που το εντοπίσαμε κατά την ενασχόληση μας κυρίως με τον gHurd controller αλλά και με όλους τους προηγούμενους εν γένει είναι η απουσία δυνατότητας προσθήκης καποιου είδους αισθητήρα ,πχ τάσης, ρεύματος, ταχύτητας ανέμου, έτσι ώστε να μπορούμε να έχουμε καλύτερο έλεγχο του συστήματος μας στο σύνολό του αλλά και να μποούμε να προλάβουμε κάποια βλκάβη μέχω της συνεχούς παρακολούθησης της κατάστασης του. Αυτό φυσικά απαιτεί είτε κάποιου είδους εποπτικό μέσο, όπως για παράδειγμα μία οθόνη πάνω στον ελεγκτή μας, σαν αυτή που έχουν σχεδόν όλοι οι εμπορικοί, είτε μέσω κάποιας σύνδεσης και προγραμμάτων, άμεση παρακολούθηση μέσω ενός υπολογιστή είτε σε τοπικό δίκτυο είτε σε απομακρυσμένη σύνδεση. Αυτές οι προσθήκες στους παραπάνω ελεγκτές είναι σχεδόν αδύνατο να συμβούν χωρίς να αλλάξει η τοπολογία, το μέγεθος και τελικώς η λειτουργία και η σύσταση της κυκλωματικής διαταξης.

Άμεση λύση στο παραπάνω πρόβλημα δίνουν οι μικροελεγκτές, οι οποίοι σε αντίθεση με τα ολοκληρωμένα που παίζουν το ρόλο του "εγκέφαλου" στα προηγούμενα κυκλώματα με τρόπο όπως είπαμε μονολιθικό και επικεντρωμένο αποκλειστικά σε μία και μόνο λειτουργία, επιτελούν περισσότερες λειτουργίες ενώ η μεγάλη ταχύτητα επεξεργασίας που παρουσιάζουν, μειώνουν τις καθυστερήσεις και επιτρέπουν τον έλεγχο και τη συντονισμένη λειτουργία μεγαλύτερων και πιό πολύπλοκων κυκλωματικών διατάξεων. Επίσης προσφέρουν τη δυνατότητα επαναπρογραμματισμού τους μέσω εφαρμογών κυρίως σε υπολογιστικά συστήματα και επομένως οποιαδήποτε αλλαγή απαιτείται απλώς προγραμματίζεται ο μικροελεγκτής σε πολύ λίγο χρονικό διάστημα και χωρίς ιδιαίτερο κόπο. Τέλος λόγω της υπολογιστικής τους ταχύτητας αλλά και του τρόπου που διαχειρίζονται

τις διάφορες εισόδους – εξόδους τους μπορούν πολύ εύκολα να προγραμματιστούν για να ελέγχουν και να συντονίζουν τη λειτουργία διάφορων τύπων αισθητήρων,όπως θερμοκρασίας, υγρασίας μέχρι πολύποκες διατάξεις βιομηχανικών αισθητήρων ελέγχου αλλά και πλήθος εποπτικών μέσων όπως οθόνες.

Όταν δε οι μικροελεγκτές αποτελούν μέρος ολοκληρωμένων διατάξεων και πλατφορμών τότε οι δυνατότητες τους αυξάνονται ακόμα περισσότερο καθώς υπάρχει πληθώρα "ασπίδων" (shields) που έχουν αναπτυχθεί με σκοπό την συνεργασία με τις προαναφερθείσες διατάξεις και επιτρέπουν και απο άποψη λογισμικού προγραμματισμού (programming software) αλλά και υλικού (hardware) λειτουργίες αρκετά εξελιγμένες όπως είναι η ανταλλαγή δεδομένων με τον υπολογιστή (ethernet – wireless shields) διατάξεις οθονών (LCD Shileds), πλήθος μηχανικών διατάξεων (Servo shields), ακόμα και ασπίδων τηλεπικοινωνιακών σκοπών (GSM shileds). Και η λίστα είναι σχεδόν χωρίς τέλος....

Η ύπαρξη έτοιμων shields μειώνει το κόστος κατασκευής κάποιου κομματιού πιό εξειδικευμένου απο το μηδέν, πχ μία διάταξη ασύρματης επικοινωνίας με τον υπολογιστή, ενώ επιτρέπουν μέσω της ευελιξίας της κατασκευαστικής τους αρχής, την επέκταση της λειτουργίας των διατάξεων χωρίς να επιβαρύνει τις υπόλοιπες λειτουργίας του κυκλώματος προφανώς μέσω της ευελιξίας και ταχύτητας του ίδιου του μικροελεγκτή. Επίσης το γεγονός ότι η διαδικασία προγραμματισμού τους βασίζεται πάνω σε αρχές και εργαλεία ανοιχτού κώδικα, επιτρέπει τον πειραματισμό και τη δημιουργία με απλό τρόπο, κυκλωματικών διατάξεων και εφαρμογών που χωρίς τους μικροελεγκτές θα απαιτούσαν πολλαπλάσιο κόπο, χρόνο, κόστος και σε κάποιες περιπτώσεις θα ήταν σχεδόν αδύνατη η δημιουργία τους.

4.2.4.2 Παρουσίαση της πρωτότυπης πλατφόρμας Arduino

Μία απο τις πιό διαδεδομένες πλατφόρμες με τα χαρακτηριστικά που είδαμε παραπάνω είναι η πλατφόρμα Arduino :

Σχήμα 4.15 Η πλατφόρμα Arduino UNO

Ο Arduino μπορεί να "αισθανθεί" το περιβάλλον τριγύρω του μέσω σημάτων που δέχεται στις διάφορες εισόδους του διαμέσω αισθητήρων μεγάλης γκάμα και με τη σειρά του μπορεί να επηρεάσει το περιβάλλον του μεσω των εξόδων του και των κυκλωματικών διατάξεων που συνδέονται σε αυτές. Ο μικροελεγκτής του είναι ο ATmega328 και μπορεί να προγραμματιστεί σε γλώσσα Arduino, η οποία βασίζεται στη Wiring και μοιάζει αρκετά στη δομή και στη σύνταξη της με τη γλώσσα C . Το περιβάλλον ανάπτυξης είναι βασισμένο και αναπτυγμένο σε Processing και μπορεί είτε να αξιοποιηθεί μόνο του είτε να επικοινωνήσει με πλήθος λογισμικού όπως είναι το MaxMSP,Flash,Processing και πολλά άλλα. Ακόμα και τα σχέδια κατασκευής του είναι ανοιχτού κώδικα, όπως και όλα τα προγράμματα που συνοδεύουν τα shields του ή τις διάφορες εφαρμογές που πραγματοποιούν οι χρήστες του, επομένως έχουμε να κάνουμε με ένα αρκετά πλούσιο πεδίο πειραματισμού, μία αρκετά ενεργή κοινότητα και πλούσια γκάμα είτε συναρμολογημένων shields είτε βιβλιοθήκες και εξαρτήματα που έχουν δημιουργηθεί και δοκιμαστεί απο την κοινότητά του.

Οι δυνατότητες που προσφέρει σε συνδυασμό με το μικρό κόστος του, τις πλούσιες βιβλιοθήκες του αλλά και της κοινότητας του το καθιστούν κατά τη γνώμη μας ιδανική πλατφόρμα κατασκευής ,έρευνας αλλά και ανάπτυξης εφαρμογών που απαιτούν ακρίβεια, ταχύτητα, προσθήκη αισθητήρων αλλά και ελέγχου μηχανισμών και διατάξεων.

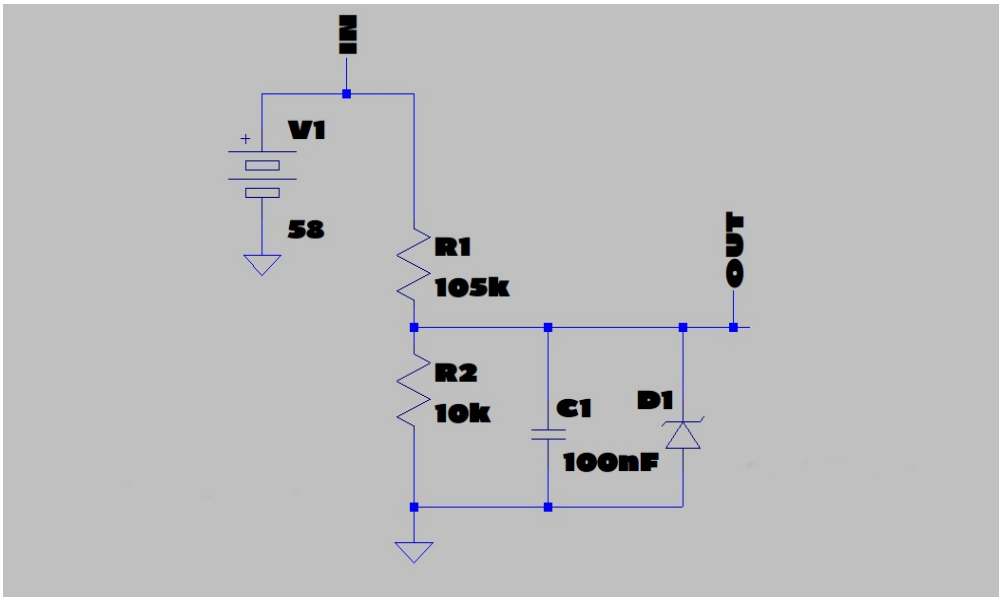
4.2.4.3 Παρουσίαση του κυκλώματος του Dump Load Controller και επεξήγηση της λειτουργίας του

Η αρχική έμπνευση για την κατασκευή μας ήρθε απο τον Matthew Little, τον οποίο και ευχαριστούμε για την πολύτιμη βοήθεια του και τις συμβουλές του, και τη εργασία του όπως παρουσιάζεται στην σελίδα www.re-innovation.co.uk, ο οποίος προσπάθησε να κατασκευάσει έναν ελεγκτή βασισμένο πάνω στον μικροελεγκτή PICAXE ο οποίος αν και παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με τον Arduino η πληρότητα που παρουσιάζει ο δεύτερος, μας οδήγησαν στην επιλογή αυτής της πλαταφόρμας για τη δημιουργία και κατασκευή του ελεγκτή μας.

Ακολουθήσαμε την ίδια πορεία εργασίας και χωρίσαμε την κατασκευή του ελεγκτή μας σε στάδια :

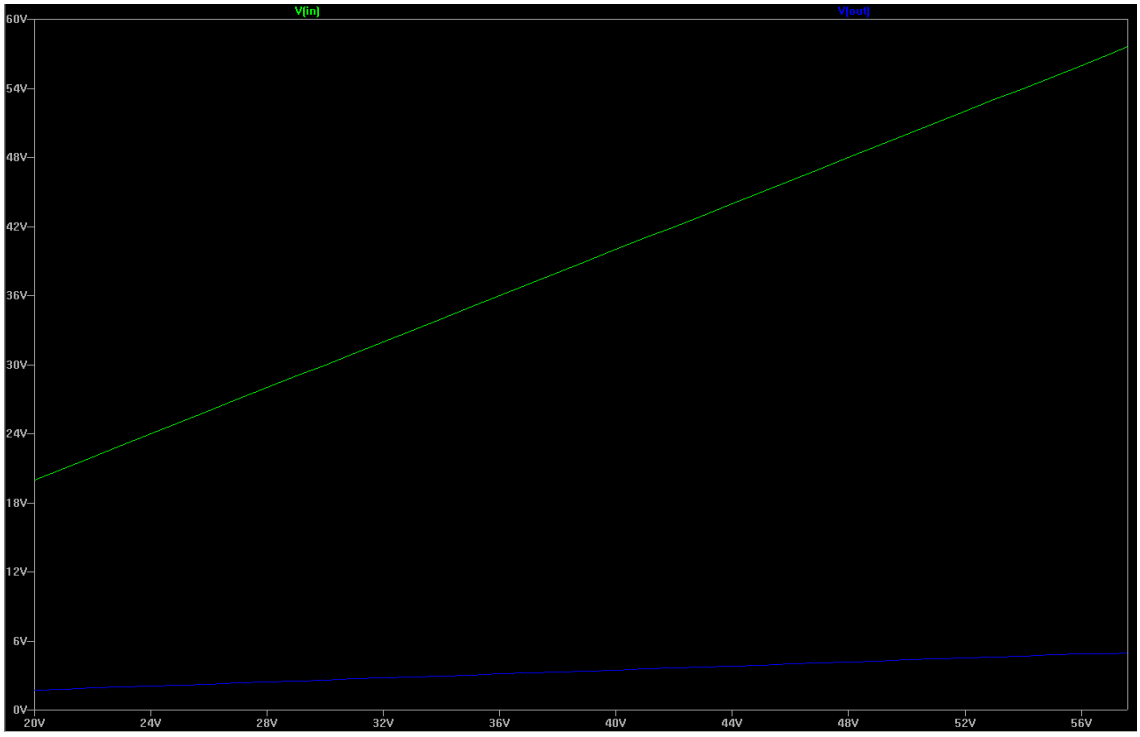
- **Εποπτεία και μέτρηση της τάσης των συσσωρευτών**

Ο Arduino μπορεί να δεχτεί και να μετρήσει τάση μέχρι 5V. Το σύστημα μας και η ρύθμιση της κατασκευής μας είναι για σύνδεση σε συσσωρευτές 48V. Επομένως θα πρέπει με κάποιο τρόπο να καταφέρουμε τον Arduino να διαβάσει με ασφαλή και ακριβή τρόπο αυτό το επίπεδο τάσης. Γι' αυτό το σκοπό κατασκευάζουμε ένα διαιρέτη τάσης που υποβιβάζει τα πραγματικά επίπεδα τάσης της μπαταρίας σε επίπεδα που να μπορεί να ερμηνεύσει ο μικροελεγκτής μας και φυσικά σε χαμηλά επίπεδα ρεύματος. Το κύκλωμα το οποίο είναι κατάλληλο γι' αυτό το σκοπό φαίνεται παρακάτω μαζί με την προσομοίωση της λειτουργίας τους σε λογισμικό LTSpice :



Σχήμα 4.16 Το κύκλωμα μέτρησης και εποπτείας της τάσης των συσσωρευτών

Το μέγιστο όριο φόρτισης που θέλουμε να έχουν οι μπαταρίες των 48V είναι 57,6V. Επομένως θα πρέπει το κύκλωμα μας να αντιστοιχεί το μέγιστο της τάσης της μπαταρίας με τη μέγιστη τιμή που μπορεί να διαβάσει ο Arduino. Οι επιλογές των αντιστάσεων έγιναν με γνώμονα τα παραπάνω, ενώ η Zener των 5,1V προστατεύει την είσοδο του μικροελεγκτή.



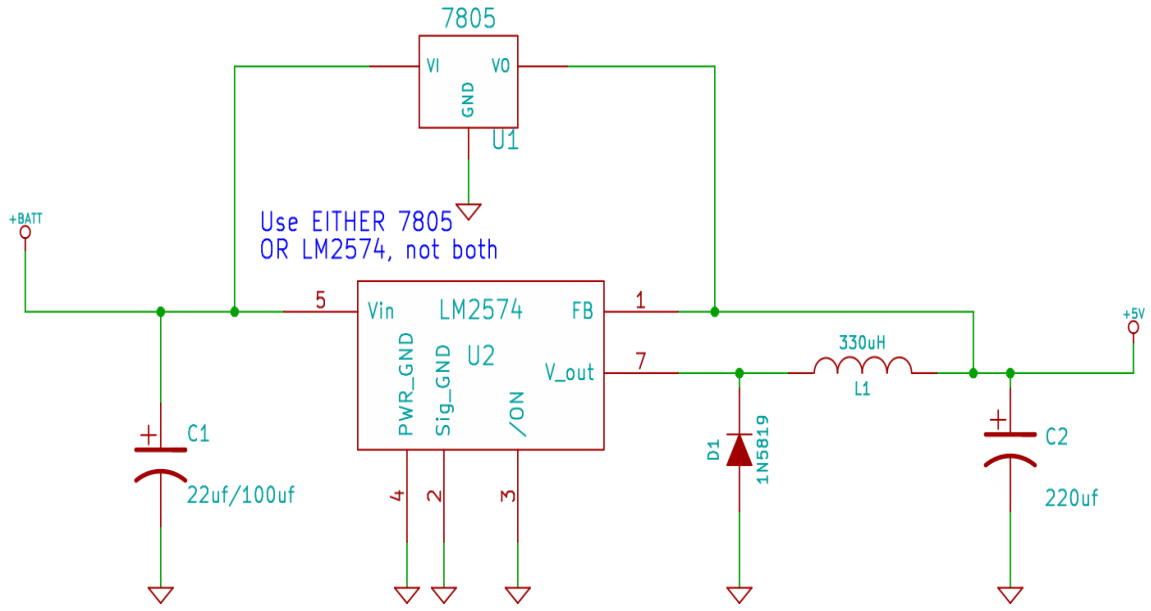
Σχήμα 4.17 Η τάση των συσσωρευτών (Vin) και η τάση στην είσοδο του μικροελεγκτή (Vout)

Όπως φαίνεται και στο σχήμα το κύκλωμά μας όντως αντιστοιχεί την τάση 57.6V στα 5V και πιό συγκεκριμένα στα 5,03V τιμή αρκετά ικανοποιητική και εντός των προδιαγραφών που έχουμε θέσει για τις λειτουργίες του ελεγκτή.

Ο Arduino όπως και όλα τα ψηφιακά συστήματα δε μπορούν να διαβάσουν αναλογικά σήματα, παρά μόνο υπό την μορφή ψηφιακών παλμών. Έτσι όταν δίνουμε ένα αναλογικό σήμα στον Arduino θα πρέπει για να το αναγνωρίσει σωστά να το μετατρέψουμε μέσω κώδικα σε διακριτά επίπεδα τάσης, μικρότερα ή ίσα των 5V και σε ένα εύρος που να περιλαμβάνει πρώτον όλες τις τιμές που θέλουμε να διαβάσουμε και δεύτερον η ανάλυση και η διαφορά απο τη μία τιμή στην άλλη να μην είναι μεγάλη για να μπορούμε να επιτύχουμε αρκετά μεγάλη ακρίβεια στις τιμές μας. Ο Arduino αυτό το πετυχαίνει κάνοντας ανάλυση 10-bit στις αναλογικές του εισόδους, κάτι που σημαίνει ότι τα 5V αναλύονται και διαχωρίζονται σε 2^{10} διακριτά επίπεδα τάσης, δηλαδή 1024 επίπεδα τάσης. Επομένως το κάθε επίπεδο αντιστοιχεί σε 5/1024 = 0,00488V ή αλλιώς 4,88mV πού είναι ανάλυση αρεκτά καλή για τους σκοπούς μας.

- **Τροφοδοσία του κυκλώματος**

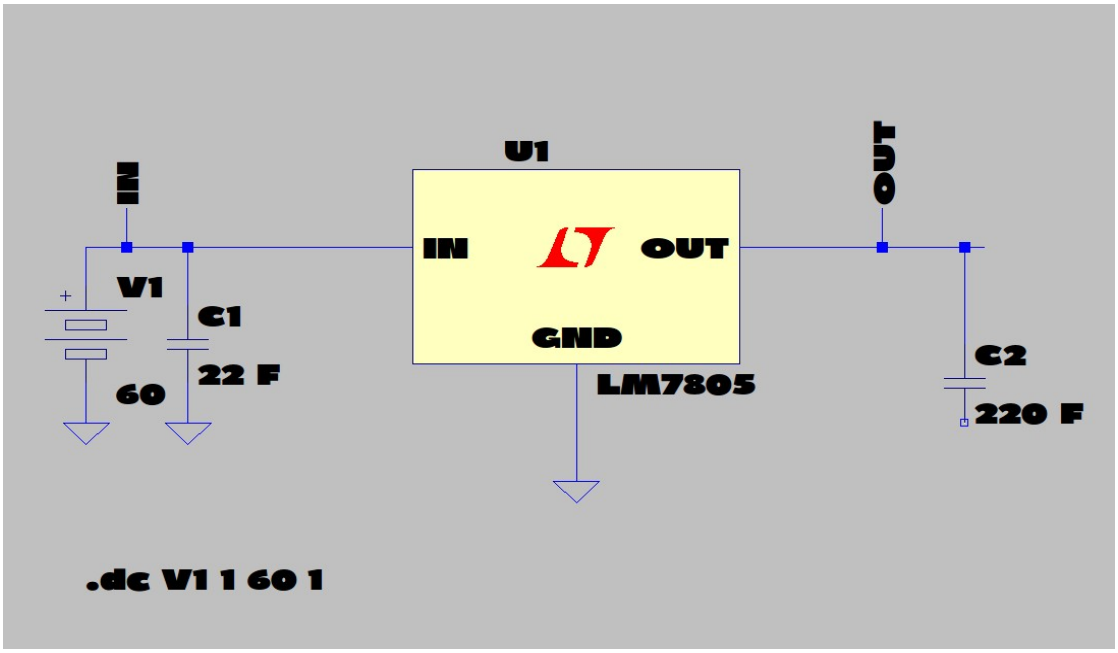
Στη συνέχεια σημαντικό πρόβλημα ήταν η τροφοδοσία τόσο του Arduino, όσο και της πλακέτας που θα τον συνοδεύει. Ο Arduino τροφοδοτείται με τάση 5V ενώ μπορούμε να του δώσουμε μέχρι και 12V στην είσοδό του καθώς τα εσωτερικά του κυκλώματα θα τη μετατρέψουν και θα τη σταθεροποιήσουν στα 5V. Το εύρος αυτό 5V – 12V φάνηκε ιδιαίτερα χρήσιμο κατά τη κατασκευή του έργου, καθώς μας επέτρεψε να τοποθετήσουμε και ανεμιστήρες για την ψύξη του κυκλώματος αλλά και την οθόνη όπως θα δούμε στη συνέχεια. Το κύκλωμα που αξιοποιούμε για να τροφοδοτήσουμε το κύκλωμα μας είναι το παρακάτω :



Σχήμα 4.18 Κυκλωματική αναπαράσταση της διάταξης τροφοδοσίας

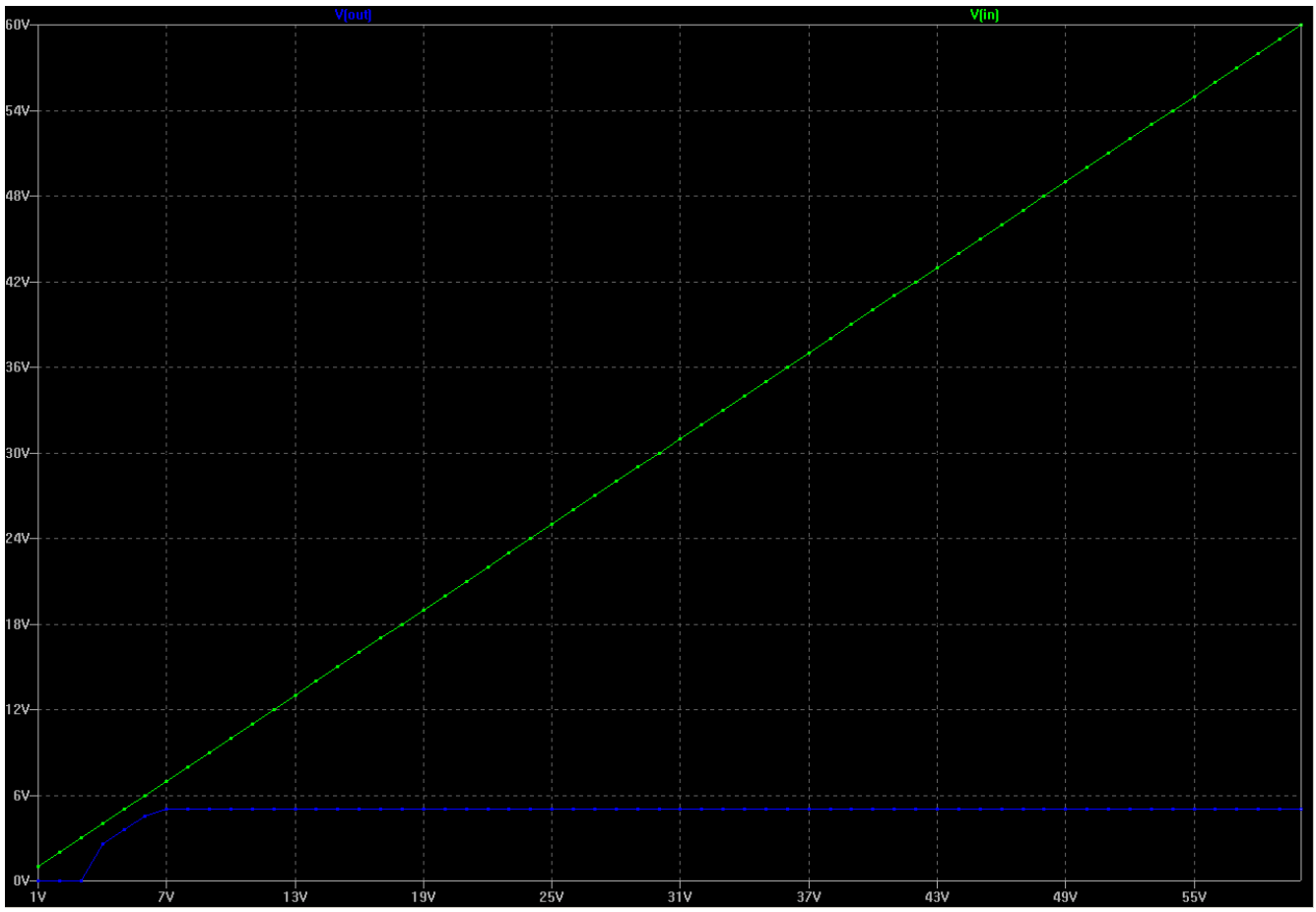
Οι επιλογές που υπήρχαν ήταν είτε η χρήση ενός Step – Down – Converter (STC),που στην ουσία είναι ένας DC – DC μετατροπέας που υποβιβάζει πάντα την τάση. Στο σχήμα 4.18 ο STC είναι η διάταξη που περιλαμβάνει το ολοκληρωμένο LM2574, τους δύο πυκνωτές και το πηνίο. Παρ' όλα αυτά η αύξηση της πολυπλοκότητας του κυκλώματος αλλά κυρίως το γεγονός ότι οι άμεσα διαθέσιμοι STCs άντεχαν τροφοδοσία μέχρι 40V – 45V, κάτι που εμάς δε μας καλύπτει καθώς θέλουμε να αντέχει το κύκλωμά μας μέχρι 60V, μας έκαναν να επιλέξουμε το δρόμο του γραμμικού ρυθμιστή τάσης (Linear Voltage Regulator) και πιό συγκεκριμένα του ολοκληρωμένου LM371HV, και όχι το LM7805 που φαίνεται στο σχήμα, το οποίο στις τάσεις που προαναφέρθηκαν λειτουργεί με τρόπο ικανοποιητικό αν και όπως ήδη έχει αναφερθεί λόγω του τρόπου της λειτουργίας των linear regulators απαιτούνται μέσα ψύξης, όπως η ψύκτρα που τοποθετήθηκε στο ολοκληρωμένο αλλά και ανεμιστηράκι 12V που τοποθετήθηκε στο κουτί της διάταξης κατά το πέρας της κατασκευής της.

Για να υποδείξουμε τη λειτουργία του ρυθμιστή τάσης προσομοιώσαμε τη λειτουργία του LM7805 στο πρόγραμμα LTSpice, έχοντας κατά νού ότι και η λειτουργία του LM371HV είναι ίδια αν και αλλάζει λίγο η τοπολογία του κυκλώματος:



Σχήμα 4.19 Αναπαράσταση του κυκλώματος τροφοδοσίας με το ολοκληρωμένο LM7805 στο LTSpice

Στη συνέχεια φαίνεται η τάση των μπαταριών και ταυτόχρονα η τάση εξόδου του κυκλώματος που είναι και τάση τροφοδοσίας του κυκλώματος:

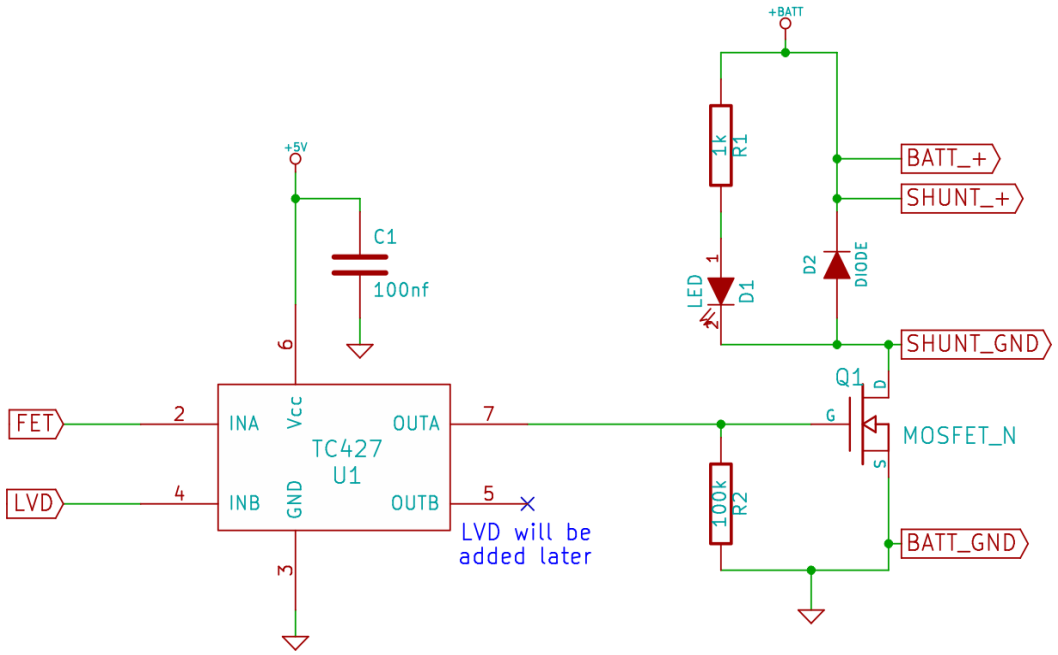


Σχήμα 4.20 Η τάση τροφοδοσίας συναρτήσει της τάσης των μπαταριών

Έτσι λαμβάνοντας υπ 'όψιν τις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται και παίρνοντας τα απαραίτητα μέτρα, εξασφαλίζουμε αποτελεσματική και σταθερή τροφοδοσία για το κύκλωμά μας και για τον Arduino.

- **Στάδιο ελέγχου του power mosfet για την αλλαγή κατάστασης του απορριπτικού φορτίου**

Στο στάδιο αυτό κατασκευάζουμε την τοπολογία που θα μας επιτρέψει να "ανοίγουμε" ή να κλείνουμε στο power mosfet που θα δούμε παρακάτω με σκοπό το απορριπτικό μας φορτίο να εισέρχεται και να εξέρχεται αντίστοιχα απο το σύστημα. Η επιλογή mosfets έναντι ρελέ έχει αναλυθεί παραπάνω και αποτέλεσε προφανή επιλογή τόσο για τον Little που ξεκίνησε την εργασία αυτή αλλά και για τους σκοπούς της δικής μας εργασίας. Η αναπαράσταση του κυκλώματος οδήγησης του mosfet φαίνεται παρακάτω :

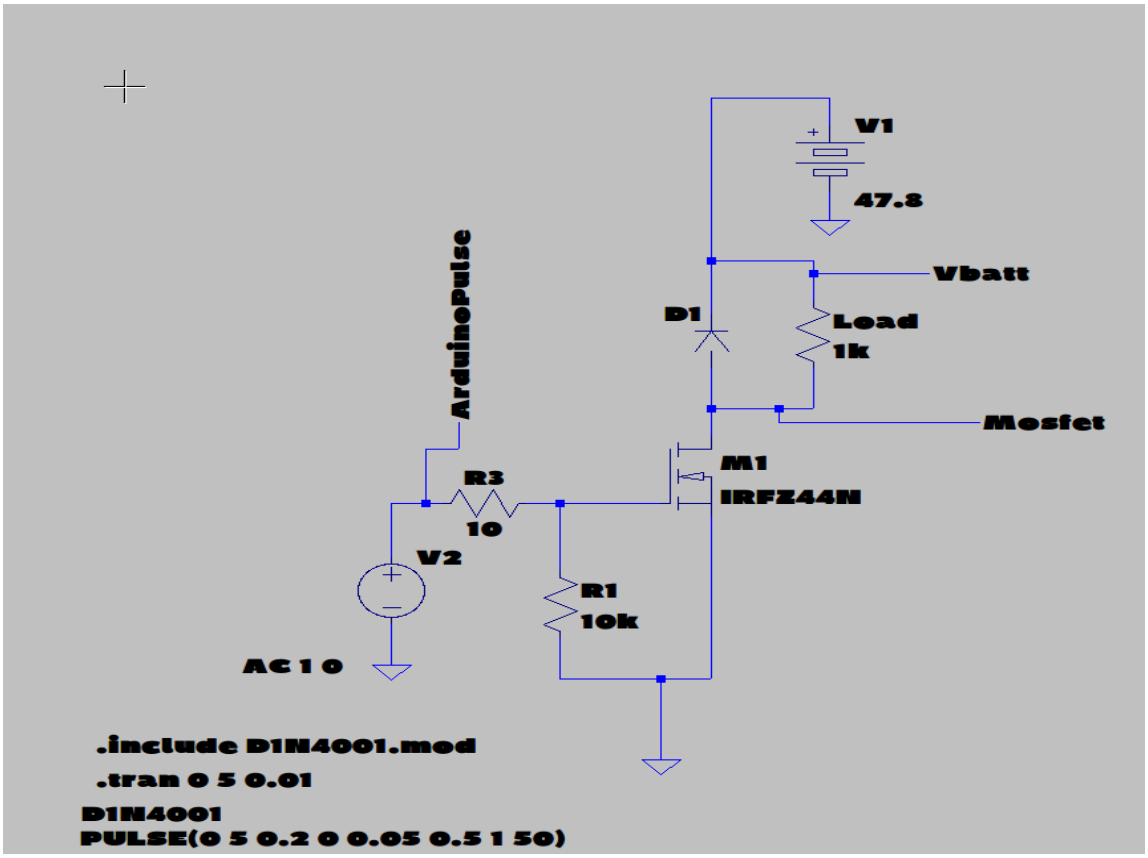


Σχήμα 4.21 Κύκλωμα οδήγησης mosfet

Η τοπολογία αποτελείται απο ένα power mosfet, πιό συγκεκριμένα το IRLI3705N το οποίο είναι ικανό να αντέξει ρεύμα μέχρι 52A, τιμή αρκετά καλή για το σύστημα των 48V και την ανεμογεννήτρια των 850W, η οποία σε ριπές ανέμου μπορεί να παράξει μέχρι 2400W και λαμβάνοντας υπ' όψν ότι η μέγιστη τάση της μπαταρίας είναι 57,6V μιλάμε για ρεύμα κοντά στα 42A που θα ρέει στο απορριπτικό φορτίο. Επίσης περιλαμβάνει έναν οδηγό mosfet (mosfet driver), τον TC427, ο οποίος εξασφαλίζει ότι τα σήματα που θα δίνει ο Arduino μέχω των εξόδων του και θα είναι ουσιαστικά παλμοί με πλάτος απο 0 – 5V θα είναι τέτοιοι ώστε να μπορούν με σιγουριά και χωρίς σπινθηρισμούς (spikes) να ανοίγουν και να κλείνουν το IRLI3705N. Παρατηρήθηκε δε ότι αν χρησιμποιούσαμε μόνο το mosfet χωρίς τον οδηγό του, η συμπεριφορά του δεν ήταν η αναμενόμενη σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας και γι' αυτό το λόγο προτείνουμε τη χρήση του σε οποιαδήποτε αντίστοιχη εργασία. Το TC427 τροφοδοτείται απο την έξοδο 5V του Arduino για σταθερότητα στην τάση και λαμβάνει σήμα εισόδου στην είσοδό του 2. Τέλος η δίοδος μεταξύ της μπαταρίας και του mosfet πρέπει να είναι μία δίοδος υψηλής ταχύτητας όπως είναι η 1N4937 αλλιώς σε περίπτωση επιλογής "συμβατικής" διόδου όπως είναι η 1N4001 η συμπεριφορά του κυκλώματος δεν είναι η αναμενόμενη.

Στο λογισμικό LTSpice επιχειρήσαμε να προσομοιώσουμε το παραπάνω κομμάτι. Λόγω έλλειψης βιβλιοθηκών για το TC427, καταφέραμε μόνο να προσομοιώσουμε το απλοποιημένο κύκλωμα που περιλαμβάνει το mosfet χωρίς τον οδηγό του και έχοντας τοποθετήσει μία αντίσταση τυχαίας τιμής στα άκρα Shunt που δείχνει το σχήμα 4.21 ,προσπαθώντας να αναπαραστήσουμε το απορριπτικό φορτίο.

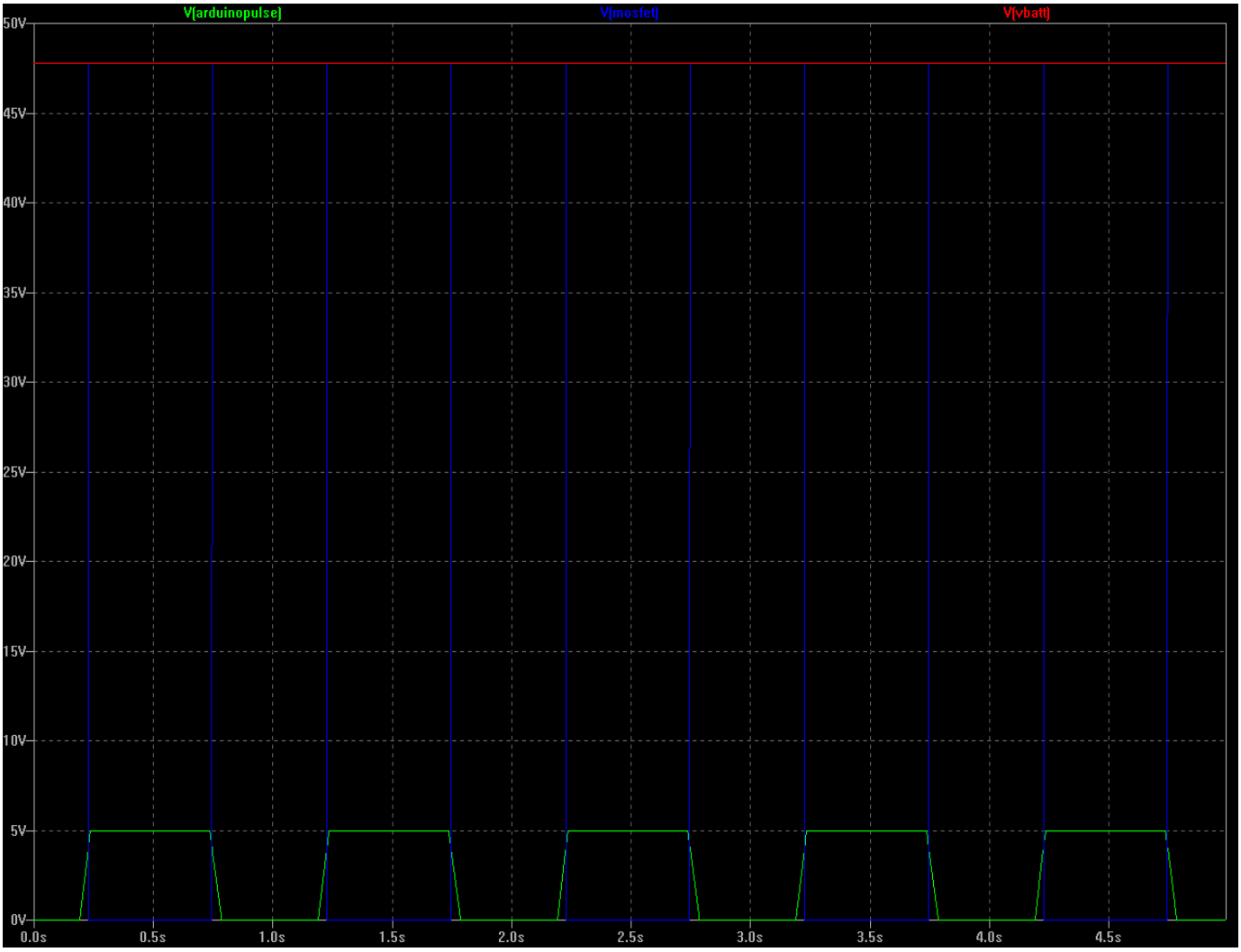
Αυτό που φαίνεται ξεκάθαρα είναι η λειτουργία του mosfet καθώς και τί συνεπάγεται αυτό για το απορριπτικό φορτίο και κυρίως για τη διαφορά δυναμικού στα αάκρα του που εν τέλει καθορίζουν και την κατάστασή του (εντός ή εκτός συστήματος) :



Σχήμα 4.22 Προσομοίωση του κυκλώματος του mosfet στο LTSpice

Όπως φαίνεται και στο σχήμα η τοπολογία δεν ανταποκρίνεται στη πραγματικό μας κύκλωμα και εξυπηρετεί μόνο εποπτικούς και διδακτικούς σκοπούς. Οι προφανείς διαφορές είναι η απουσία του κυκλώματατος οδήγησης και αντικατάσταση του IRLI3705N απο το IRFZ44N το οποίο υπήρχε στις βιβλιοθήκες της κοινότητας του LTSpice.

Μία ακόμα σημαντική διαφορά είναι και η τάση της μπαταρίας που για τους σκοπούς της προσομοίωσης τέθηκε ίση με 47,8V καθώς μεγαλύτερη τιμή δημιουργούσε χαοτική συμπεριφορά στα αποτελέσματα. Ανεξάρτητα των διαφορών με το πραγματικό κύκλωμα μπορούμε να διαπιστώσουμε με την παρακάτω γραφική την αρχή λειτουργίας του πραγματικού κυκλώματος. Πράγματι θα δούμε ότι μόλις το mosfet λάβει σήμα με πλάτος 5V τότε αμέσως γειώνει το ένα του άκρο στο οποίο βρίσκεται το φορτίο και το οποιό προηγουμένως "έβλεπε" την τάση της μπαταρίας, μή έχοντας διαφορά δυναμικού στην ουσία μεταξύ των δύο άκρων του. Έτσι με το άνοιγμα του mosfet και τη γείωση του ενός άκρου του mosfet και κατ' επέκταση του φορτίου, η ισχύς της μπαταρίας διοχετεύεται πλέον στο απορριπτικό παράλληλα με τα υπόλοιπα φορτία που ούτως ή άλλως τροφοδοτεί με αποτέλεσμα να κρατιέται η τάση της εντός των προδιαγραφών που έχουν τεθεί εξ'αρχής και αφορούν τα επίπεδα τάσης.



Σχήμα 4.23 Η λειτουργία του mosfet συναρτήσει του παλμού που δέχεται απο τον Arduino

Βλέπουμε λοιπόν ότι μόλις ο παλμός απο τον Arduino γίνει 5V (πράσινη γραμμή), τότε το mosfet γειώνει το ένα άκρο του με αποτέλεσμα η διαφορά δυναμικού στα άκρα του φορτίου να είναι ίση με την τάση της μπαταρίας (κόκκινη γραμμή). Σε περίπτωση που ο παλμός δεν έχει πλάτος 5V τότε η τάση στο άκρο του mosfet άρα και του φορτίου είναι ίση με την τάση της μπαταρίας (μπλέ γραμμή).

.

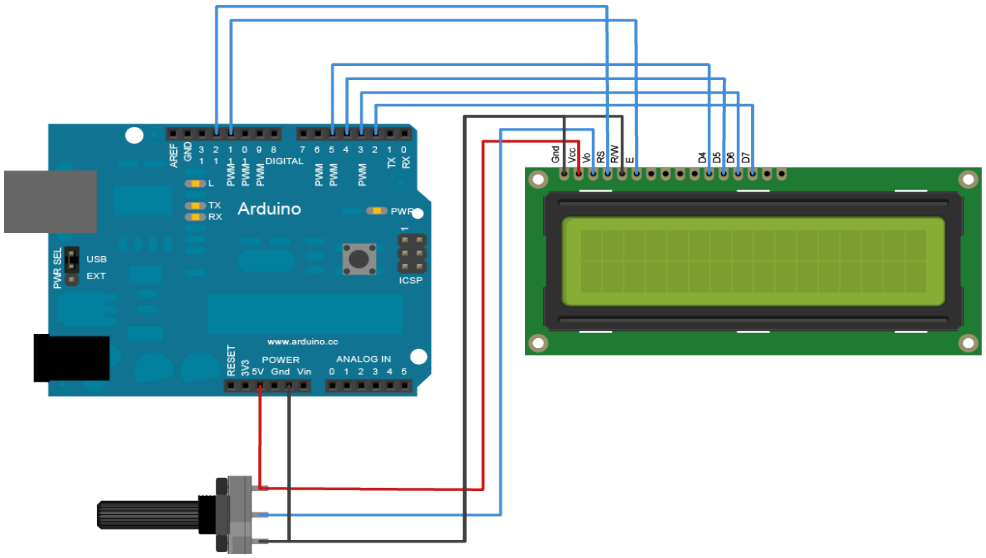
- **Οθόνη εποπτείας και ελέγχου του κυκλώματος και άλλες προσθήκες στην κατασκευή**

Προσπαθώντας να ξεπεράσουμε το μειονέκτημα που παρουσιάζουν οι προηγούμενοι ελεγκτές οι οποίοι δεν περιελάμβαναν κανένα μέσω εποπτείας και ελέγχου της λειτουργίας, επιλέξαμε την προσθήκη μιας οθόνης υγρών κρυστάλλων η οποία θα είναι συμβατή με τον Arduino υπό την έννοια ότι καλό θα είναι να υπάρχουν έτοιμες βιβλιοθήκες που να καθιστούν την επικοινωνία αλλά και τον

προγραμματισμό μεταξύ της οθόνης και του Arduino εύκολη αλλά και την αντιμετώπιση των προβλημάτων πιό εύκολη και γρήγορη. Με μία έρευνα στην κοινότητα του Arduino (http://arduino.cc/en/Tutorial/LiquidCrystal), καταλήξαμε ότι μια αθόνη που πληρεί αυτές της προδιαγραφές είναι μία οθόνη 16 γραμμών και δύο στηλών που να βασίζεται πάνω στο οδηγό Hitachi HD44780.

Σχήμα 4.24 Η οθόνη υγρών κρυστάλλων που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή μας

Ο τρόπος σύνδεσης της οθόνης περιγράφεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 4.25 Ο τρόπος σύνδεσης της οθόνης στον Arduino

Η βιβλιοθήκη που διευκολύνει το προγραμματισμό και τη επικοινωνία με τον Arduino είναι η LiquidCrystal.h και περιλαμβάνεται σε αυτές που έχει αποθηκευμένες το λογισμικό όταν γίνεται η εγκατάσταση στον υπολογιστή, οπότε και δεν υπάρχει κάποιο ιδιαίτερο πρόβλημα, πέρα απο τις λεπτομέρειες της εμφάνισης των χαρακτήρων στην οθόνη που με λίγο "παιχνίδι" πολύ γρήγορα μπορούμε να έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Επίσης για ακόμα καλύτερη διαχείριση και έλεγχο της διάταξης τοποθετήσαμε τρία LEDs τα οποία ουσιαστικά δείχνουν την κατάσταση του κυκλώματος μας :

- **Κόκκινο LED :** Δείχνει ότι η μπαταρία φορτίζει και επομένως το απορριπτικό φορτίο είναι εκτός κυκλώματος, ενώ κυκλωματικά δείχνει ότι το power mosfet (IRLI3705N) δε δέχεται καθόλου παλμούς. Συνοδεύεται απο την ένδειξη "Charging" στην οθόνη.

- **Κίτρινο LED :** Η αρχή λειτουργίας του κυκλώματος μέσω του Arduino είναι η εξής :

  Θέτουμε ένα κάτω όριο, κάτω απο το οποίο το απορριπτικό φορτίο μας να βγαίνει εκτός και μία υστέρηση η οποία δείχνει πόσο μετά απο αυτό το όριο να θέτουμε το απορριπτικό φορτίο εντός συστήματος. Έτσι το κίτρινο LED αντιστοιχεί ακριβώς σε αυτή τη λειτουργία, ανάβει όταν η τάση είναι μεταξύ του κάτω ορίου (έξοδος του φορτίου) και του πάνω (είσοδος του φορτίου). Σε κυκλωματικο επίπεδο αυτό υποδεικνύει ότι το power mosfet αρχίζει να δέχεται παλμούς με μεταβλητό πλάτος κάτω των 5V με σκοπό ουσιασικά να "προετοιμαστεί" να ανοίξει όταν η τάση φτάσει τα 5V και αντίστοιχα κατά το κλείσιμο του. Συνοδεύεται απο την ένδειξη "Threshold" στην οθόνη.

- **Πράσινο LED :** Δηλώνει ότι πλέον το απορριπτικό φορτίο είναι εντός του συστήματος και κυκλωματικά ότι πλέον το power mosfet δέχεται μέσω του οδηγού του συνεχείς παλμούς με πλάτος 5V με αποτέλεσμα να γειώνει το ένα άκρο του (το άκρο Drain συνδέεται με το Source που είναι συνδεδεμένο στη γείωση). Συνοδεύεται απο την ένδειξη "Dumping" στην οθόνη.

Τέλος για την αποτελεσματικότερη ψύξη του linear regulator τοτποθετήσαμε ένα κοινό ανεμιστηράκι των 12V του οποίου την παροχή πήραμε απο την έξοδο του ρυθμιστή τάσης και στη συνέχεια το βιδώσαμε στο κουτί που τοποθετήσαμε την όλη διάταξη ακριβώς δίπλα απο το LM371HV. Για να επιτύχουμε καλή λειτουργία του ανεμιστήρα θέσαμε την έξοδο του LM371HV στα 10V, τάση που μπορεί να δεχτεί ο Arduino και είναι αρκετά ικανοποιητική για τις στροφές που θέλουμε να πετύχουμε.

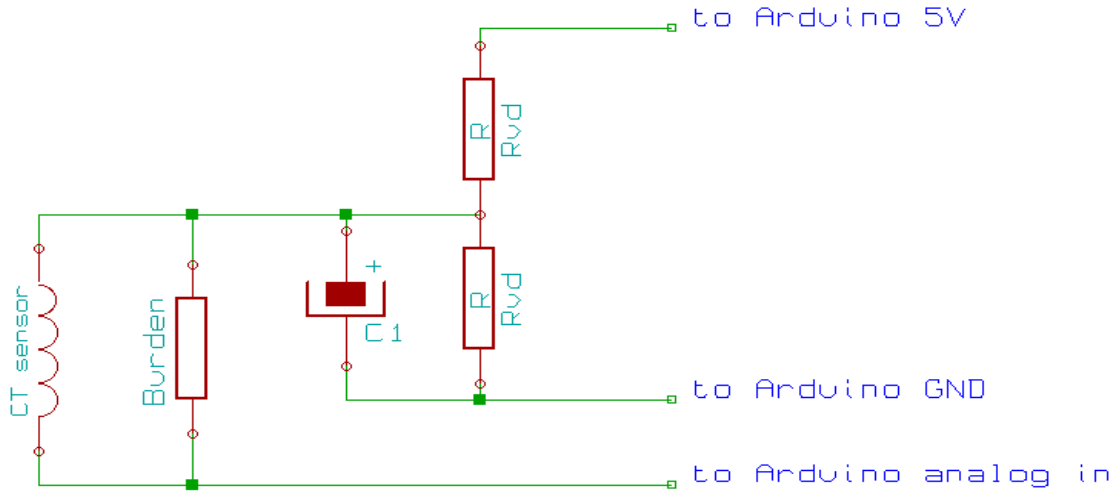
Σχήμα 4.26 Το ανεμιστηράκι των 12V που τοποθετήσαμε στο κουτί της διάταξης για τη ψύξη του LM371HV

Εκμεταλλευόμενοι ακριβώς αυτή την ευελιξία που μας προσφέρει η πλατφόρμα αλλά και το πλήθος των εξωτερικών εξαρτημάτων και ασπιδών που μπορούμε να συνδέσουμε στον Arduino αλλά και τις

εξαιρετικά τεκμηριωμένες και πλήρεις βιβλιοθήκες που συνοδεύουν το κάθε ένα απο αυτά, επιλέξαμε να τοποθετήσουμε στον ελεγκτή μας ένα μετρητή ρεύματος. Η διάταξη είναι μία αμπεροτσιμπίδα που αξιοποιεί τις μεταβολές του μαγνητικού πεδίου γύρω απο τα καλώδια στα οποία ρέει ρεύμα και με το κατάλληλο κύκλωμα να μετατρέπει αυτά τα σήματα σε μεταβολές τάσης, με τιμές τέτοιες που να μπορεί να τις δεχθεί ο Arduino σε κάποια απο τις αναλογικές του εισόδους. Στη συνέχεια με τη βοήθεια της βιβλιοθήκης που έχει γραφτεί για το έργο open energy monitor και υπάρχει στην ιστοσελίδα www.openenergymonitor.org μπορούμε να διαβάσουμε τις τιμές του ρεύματος σε μονοφασικό αγωγό που διαρέεται απο εναλλασσόμενο ρεύμα είτε στον υπολογιστή μας , είτε στην περίπτωση μας στην οθόνη που περιγράψαμε παραπάνω δίπλα από την ένδειξη για την τάση των μπαταριών.

Σχήμα 4.27 Η αμπεροτσιμπίδα SCT-013-030 της Spark Fun που χρησιμοποιήσαμε

Η διάταξη που επιτρέπει την ανάγνωση των τιμών του ρεύματος με αρκετά καλή ακρίβεια είναι η εξής :



Σχήμα 4.28 Η κυκλωματική διάταξη που επιτρέπει την ανάγνωση των τιμών του ρεύματος απο τον Arduino

Ο υπολογισμός των τιμών των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων που αποτελούν το παραπάνω κύκλωμα γίνεται με βάση το μοντέλο, το είδος και τη χρήση της αμπεροτσιμπίδας. Εν προκειμένω οι τιμές που

ικανοποιούσαν τις δικές μας προδιαγραφές είναι R_{burden} = 20 Ohm, C1 = 10μF και η κάθε μία πο τις R_{vd} = 10 kOhm. Με αυτές τις τιμές οι ενδείξεις που παίρναμε παρουσίαζαν ελάχιστο σφάλμα το οποίο εύκολα διορθώνεται στο στάδιο της εμφάνισης του αποτελέσματος στην οθόνη.

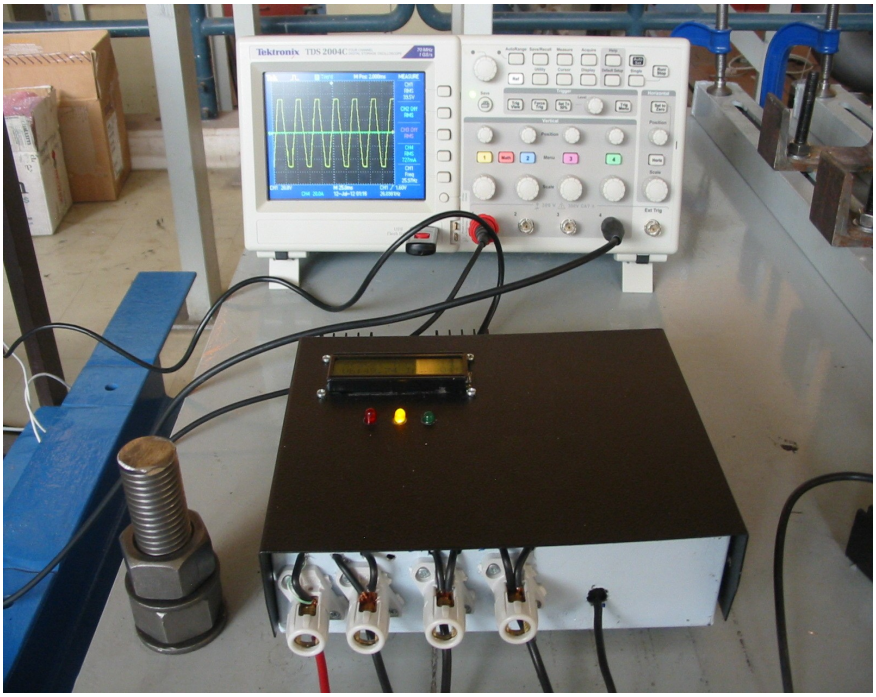
Ένα απλό παράδειγμα του κώδικα που αναλαμβάνει του υπολογισμό και την εμφάνιση του αποτελέσματος στον υπολογιστή μας είναι ο παρακάτω και στηρίζεται στη βιβλιοθήκη EmonLib.h που όπως έχει ήδη αναφερθεί μπορεί να βρεθεί, ελεύθερα εννοείται, στην ιστοσελίδα του open energy monitor :

```
#include "EmonLib.h"           // Include Emon Library
EnergyMonitor emon1;// Create an instance

void setup()
{
Serial.begin(9600);

  emon1.voltage(2,234.26,1.7);// Voltage: input pin, calibration, phase_shift
  emon1.current(1,111.1)l;// Current: input pin, calibration.
}

void loop()
{
emon1.calcVI(20,2000);// Calculate all. No.of wavelengths, time-out
emon1.serialprint();// Print out all variables
}
```

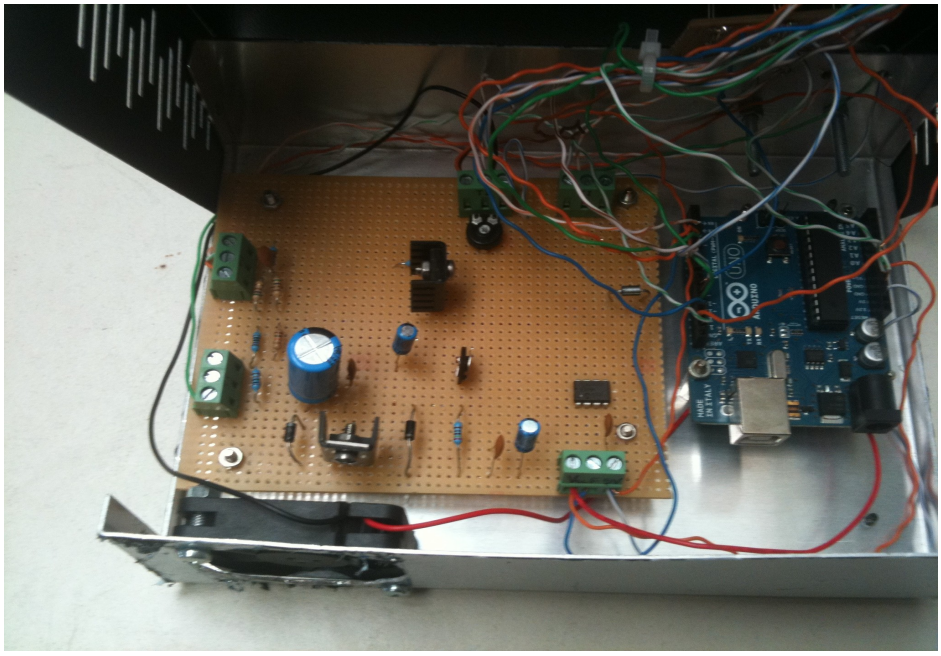
Ο παραπάνω κώδικας διαβάζει την τάση στην αναλογική είσοδο 2 (στην κατασκευή μας την τάση δε τη διαβάζουμε με τέτοια διάταξη οπότε μπορούμε να το παραλείψουμε), όπως επίσης και το ρεύμα στην αναλογική είσοδο 1 και τυπώνει τα αποτελέσματα μαζί με στη σειριακή έξοδο του Arduino άρα στην οθόνη του υπολογιστή μας.

Ακολουθούν φωτογραφίες της κατασκευής μας σε ολοκληρωμένο πιά στάδιο:

Φωτογραφία 4.1 : Ο ελεγκτής μας σε τελικό στάδιο κατασκευής



Φωτογραφία 4.2 : Μιά άλλη όψη όπου διακρίνονται οι κλέμες όπου συνδέονται τα καλώδια και στα δεξιά η έξοδος της αμπεροτσιμπίδας



Φωτογραφία 4.3 : Το εσωτερικό του ελεγκτή όπου απουσιάζει ακόμα η κυκλωματική διάταξη της αμπεροτσιμπίδας και τα κατάλληλα καλώδια (διατομές) για το κομμάτι ισχύος (mosfet kai συνδέσεις μπαταριών – απορριπτικών φορτίων). Στα δεξιά διακρίνεται ο Arduino και στα αριστερά το κύκλωμα που έχει περιγραφεί παραπάνω.

Τέλος παρουσιάζεται ο κώδικας σύμφωνα με τον οποίο προγραμματίσαμε τον Arduino και επομένως και το κύκλωμά μας :

```
int ledon = 9;
int ledthr = 10;
int ledoff = 13;
int PFET = 6;
#include "EmonLib.h"                    //Perilamvanoume tis aparaithtes vivliothikes kai kanoume tis
                                        //aparaithtes arxikopoihseis

#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2);
EnergyMonitor emon1;

void setup()
{

 lcd.begin(16, 2);
emon1.current(3, 111.1);
pinMode(ledon, OUTPUT);
pinMode(ledoff, OUTPUT);
pinMode(ledthr, OUTPUT);
pinMode(PFET, OUTPUT);
lcd.print("State:");
lcd.setCursor(7, 0);
```

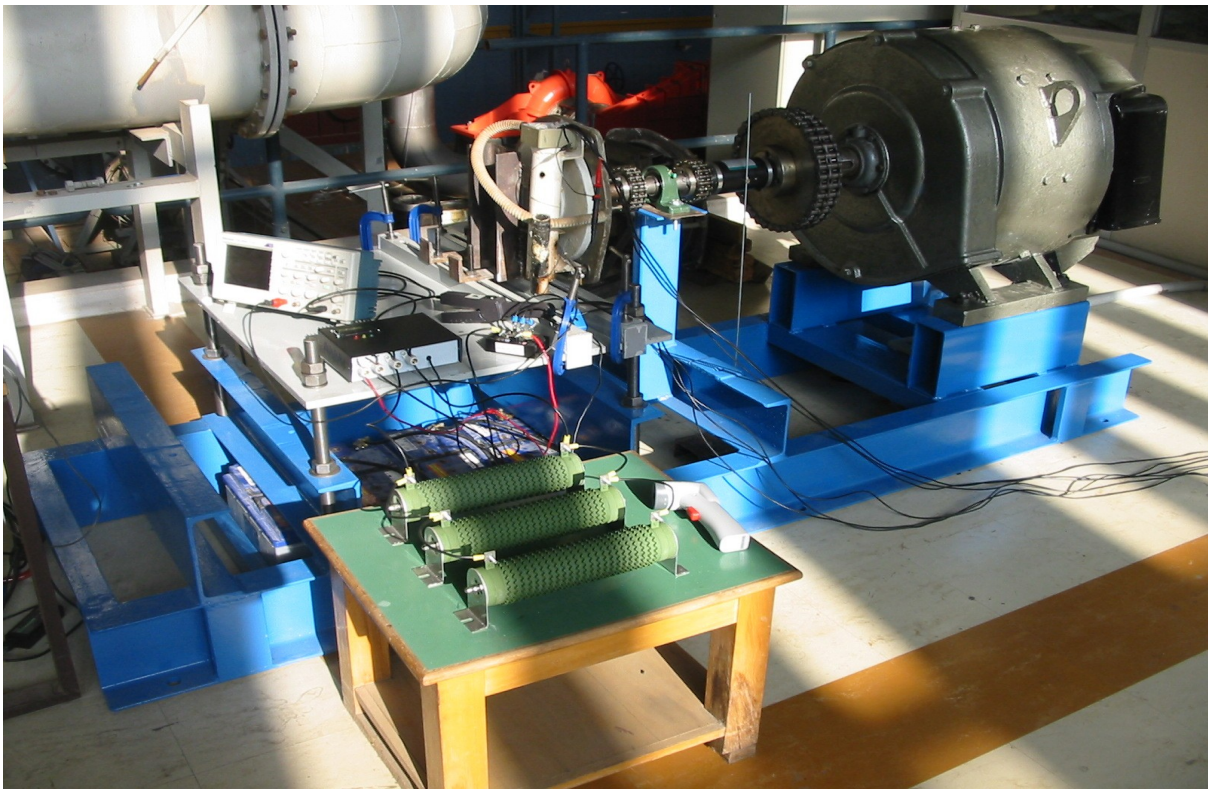
```
}

void loop()
{

  float w4;
  float w1;
  float w6;
  float w2;

  double Irms = emon1.calcIrms(1480);              // Calculate Irms only

  long VminPWM = 56600;                            //Orio sto opoio tha bgainei to aporriptiko fortio
  int hysterPWM = 1000;                            //Parathyro metaksy tou oriou pou tha bgainei kai autou pou tha
                                                   //mpainei

 float sensorValue = analogRead(A0);               //diavazoume thn tash twn mpatariwn


float  voltage=sensorValue * (5.0 / 1023.0);       //prosarmozoume katallhla ta epipeda tashs pou diavazoume
  w1 = sensorValue;
 w1 = w1* 0.056207234;
  w1 = w1*1000;

long w3 = VminPWM+hysterPWM;

  if (w1>=w3)                                      //Periptwsh na eimaste panw apo to anwtato orio fortishs ara
                                                   //dinoume
                                                   // entolh sto mosfet na anoiksei me thn entolh w4=255 pou
                                                   //antistoixei se duty cycle 100% ara synexhs palmos me platos 5V
   {
    w4 = 255 ;
    lcd.print("State:");
    lcd.setCursor(7, 0);
    lcd.print("Dumping");                          //Typwnoume thn antistoixh frash
    delay(500);
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 1);

    digitalWrite(ledoff, LOW);                     //anavoume to antistoixo LED
    digitalWrite(ledthr, LOW);
    digitalWrite(ledon, HIGH);
   }


   else if (w1 >= VminPWM)                         //Periptwsh na eimaste panw apo to katw orio kai katw apo to
                                                   //anwtato orio opote stelnoume tyxaious palmous sto mosfet gia
                                                   //na to proetoimasoume na anoiksei

    {

    w3 = w1-VminPWM;                                // This finds a value from which to make the PWM (0 - anything)
```

```
  w6 = hysterPWM/100;
  w4 = w3*4/w6;
   lcd.print("State:");
   lcd.setCursor(7, 0);
   lcd.print("Threshold");                    //Typwnoume thn antistoixh frash
  delay(500);
   lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 1);
        digitalWrite(ledoff, LOW);            //Anavoume to antistoixo LED
        digitalWrite(ledon, LOW);
        digitalWrite(ledthr, HIGH);
  }

  else if (w1 < VminPWM)                      //Eimaste katw apo to katwtato orio ara de stelnoume kanena
                                              //shma sto mosfet
  {

   w4 = 0;
   lcd.print("State:");
   lcd.setCursor(7,0);
   lcd.print("Charging");                     //Typwnoume to antistoixo mhnyma
  delay(500);
   lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 1);


   digitalWrite(ledon,LOW);                   //Anavoume to antistoixo LED
   digitalWrite(ledoff, HIGH);
   digitalWrite(ledthr, LOW);

  }

  analogWrite(PFET,w4);                       //Meta thn anagnwsh thw katastashs twn mpatariwn eggrafoume
                                              //sthn katallhlh eksodo tou Arduino thn metablhth w4 pou einai
                                              //255 an to fortio mpainei sto systhma,0 an einai ektos kai tyxaia
                                              //timh otan einai metaksy tou katw kai tou panw oriou.
  lcd.print("Vb:");
  lcd.setCursor(3, 1);
  lcd.print(w1/1000);
  lcd.setCursor(9,1);
  lcd.print("Ir:");                           //Typwnoume kai thn RMS timh tou Iac pou reei sth mia fash tou
                                              //kyklwmatos
  lcd.print(Irms-0.17);
  lcd.setCursor(0,0);

}
```

Κεφάλαιο 5 : Πειραματικές διατάξεις και μέτρηση μεγεθών της γεννήτριας κατά τη σύνδεση της σε συσσωρευτές

5.1 Σύνδεση στη γεννήτρια 850 W και διεξαγωγή πειραμάτων

Στο Εργαστήριο Υδροδυναμικής του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πολυτεχνείου συνδέσαμε την γεννήτρια των 850W σε συσσωρευτές 48V και μετρήσαμε μεγέθη της κατά της σύνδεση της σε αυτούς μέσω καλωδίων 20 μέτρων και διατομής 2,5 mm^2 ανά φάση μέσω ανορθωτή, ο οποίος συνδέθηκε με τους συσσωρευτές μεω καλωδίου 2 μέτρων και διατομής 4 mm^2 . Τα μεγέθη αυτά επιλέχτηκαν για να μπορέσουμε να επιβεβαιώσουμε τα αποτελέσματα των θεωρητικών μας μετρήσεων οι οποίες βασίζονται στο AC μοντέλο σύνδεσης. Τέλος συνδέσαμε και 3 απορριπτικά φορτία 1000W με τιμές 4,7Ohm παράλληλα ,άρα έχοντας συνολική αντίσταση φορτίου 1,56 Ohm καθώς και τον dump load controller με σκοπό να παρατηρήσουμε τη συμπεριφορά του κατά τη διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης των συσσωρευτών.



Φωτογραφία 5.1 Η πειραματική διάταξη που αξιοποιήσαμε. Διακρίνονται τα απορριπτικά φορτία, ο ελεγκτής που κατασκευάσαμε, η γεννήτρια που οδηγείται απο τον κινητήρα καθώς και η συστοιχία συσσωρευτών και ο ανορθωτής στα δεξιά του ελεγκτή.

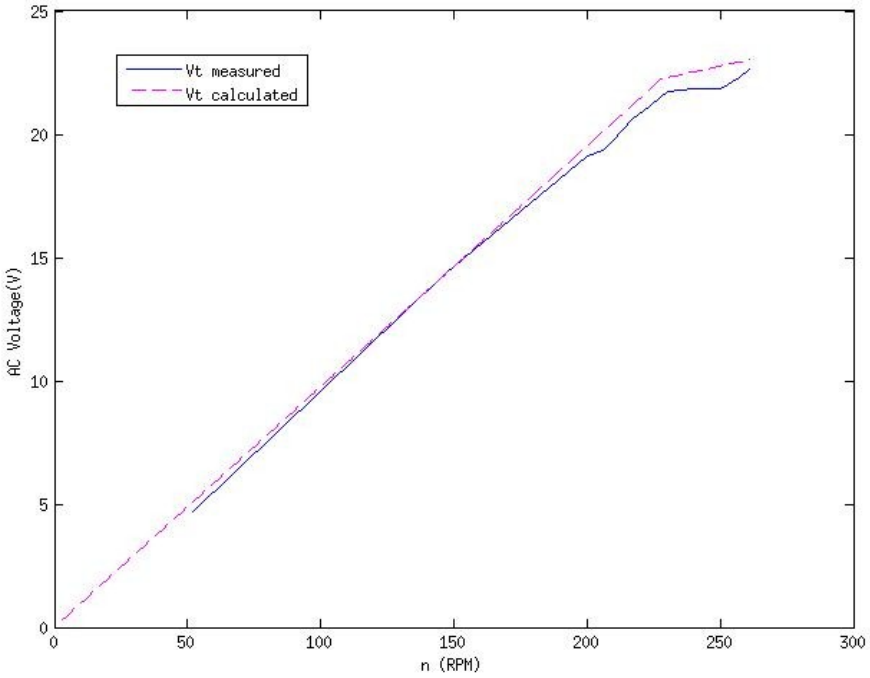
Κατά το πρώτο πείραμάς μας συνδέσαμε μόνο τους συσσωρευτές μέσω του καλωδίου 20 μέτρων και του ανορθωτή με τη γεννήτρια και μεταβάλλαμε τις στροφές τις γεννήτριας μέχρι τις 261 RPM που είναι για αυτό τον τρόπο σύνδεσης (48V σύστημα, απευθείας σύνδεση σε μπαταρίες) οι μέγιστες στροφές που επιτυγχάνονται σε άνεμο 10m/sec κρατώντας το λ κάτω απο την τιμή 8. Κατά τη διάρκεια του πειράματος παίρναμε μετρήσεις για την πολική τάση ανά δύο των φάσεων της γεννήτριας, καθώς ο ουδέτερος είχε μείνει στο εσωτερικό της γεννήτριας και δεν ήταν δυνατή η μέτρηση φασικών μεγεθών.

Επίσης μέσω της αμπεροτσιμπίδας που έχουμε ενσωματώσει στον ελεγκτή μας μετρούσαμε την AC τιμή του ρεύματος σε μία απο τις φάσεις της γεννήτριας και μέσω του παλμογράφου καταγράφαμε τις πολικές τιμές της τάσεις καθώς και την DC τιμή του ρεύματος μετά τον ανορθωτή. Έτσι πήραμε τις παρακάτω τιμές :

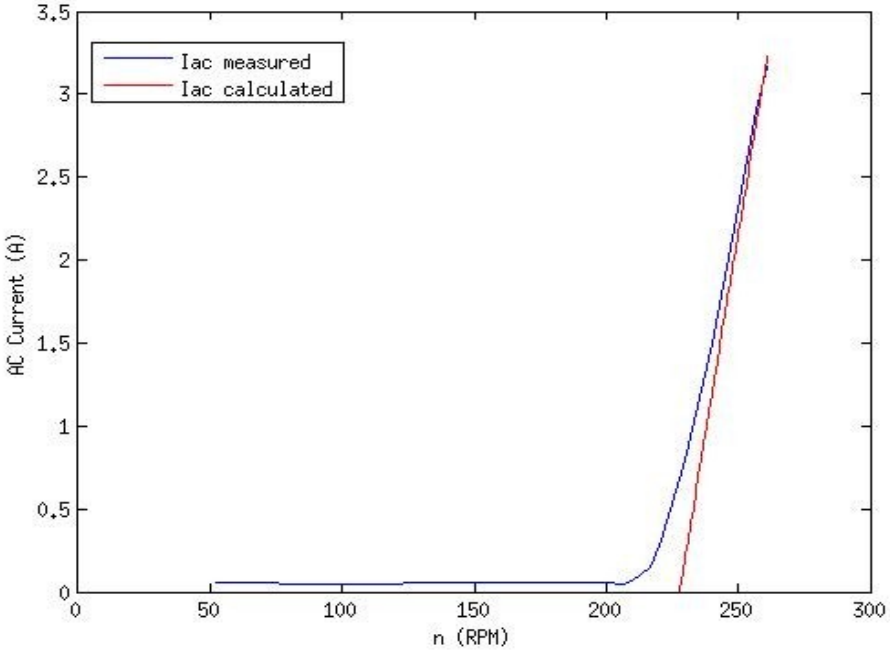
N (RPM)	**Vtab (V)**	**Vtac (V)**	**Vtbc (V)**	**Vt avg (V)**	**Iac (A)**	**Vdc (V)**	**Idc (A)**	**Pdc (W)**
52	8,28	7,93	8,17	8,13	0,06	48,23	0,07	3,38
100	16,80	16,50	16,40	16,57	0,05	48,23	0,07	3,38
147	25,20	24,60	24,70	24,83	0,06	48,23	0,07	3,38
200	33,60	32,80	32,90	33,10	0,06	48,23	0,07	3,38
206	34,20	33,30	33,10	33,53	0,06	48,23	0,07	3,38
210	34,70	33,90	34,10	34,23	0,07	48,23	0,08	3,91
217	36,10	35,30	35,50	35,63	0,15	48,23	0,30	14,47
221	36,30	36,10	36,30	36,23	0,31	48,23	0,50	24,12
230	38,00	37,40	37,60	37,67	0,79	48,39	1,03	49,84
240	38,10	37,60	37,70	37,80	1,50	48,68	1,92	93,47
250	38,10	37,60	37,80	37,83	2,31	49,13	2,86	140,51
257	38,90	38,40	38,60	38,63	2,90	49,46	3,63	179,54
261	39,50	39,00	39,20	39,23	3,17	49,74	4,03	200,45

Πίνακας 5.1 Οι μετρήσεις που λάβαμε απο τις 50 μέχρι τις 261 στροφές

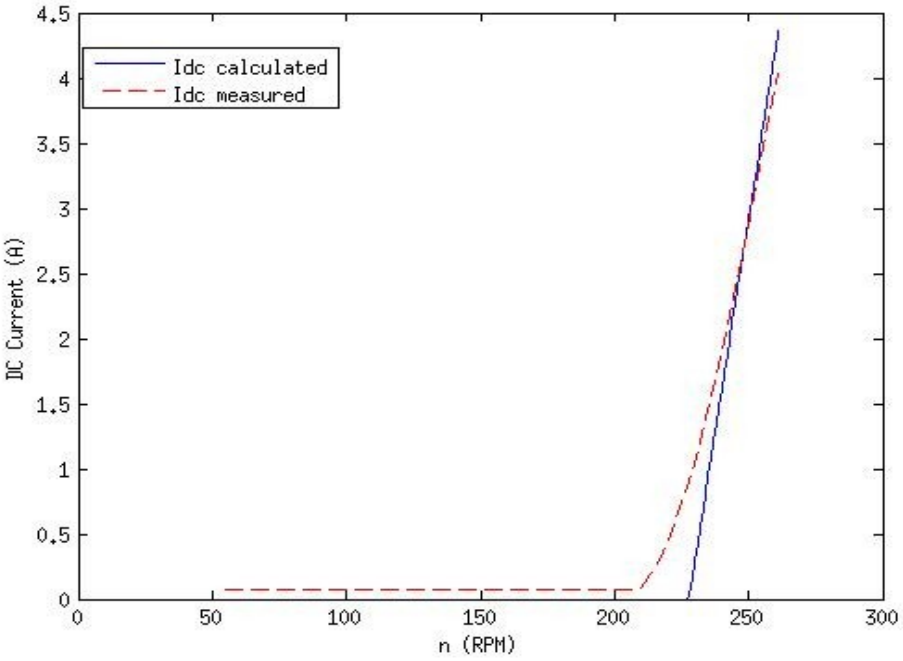
Οι στροφές της γεννήτριας υπολογίζονται απο τη σχέση $n=\frac{120\mathrm{f}}{p}$. Με τη βοήθεια του παλμογράφου βλέπουμε τη συχνότητα και γνωρίζοντας τον αριθμό των πόλων, πού είναι 12, βρίσκουμε εύκολα σε κάθε περίπτωση τις στροφές της γεννήτριας. Ήδη απο τον παραπάνω πίνακα μπορεί να φανεί ότι πλέον σε πραγματικές συνθήκες, η γεννήτρια μπαίνει στο σύστημα στις 210 στροφές αντίθετα με τις 228 που έχουμε θεωρητικά υπολογίσει καθώς εκεί είναι όπου αρχίζει να ρέει ρεύμα στο κύκλωμα (οι προηγούμενες τιμές είναι θόρυβος και όχι πραγματικές μετρήσεις). Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι γραφικές των παραπάνω μεγεθών μαζί με τις θεωρητικές της ανάλυσης του μοντέλου για να αποτυπωθούν και εποπτικά οι αποκλίσεις τους :



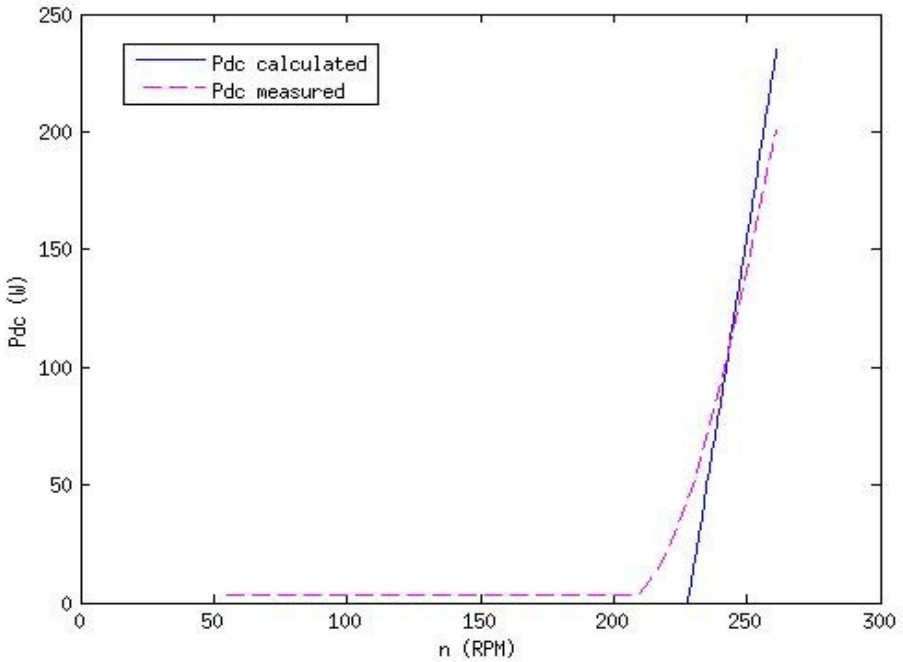
Σχήμα 5.1 Η AC τάση πρίν τον ανορθωτή οπως μετρήθηκε στο εργαστήριο και όπως υπολογίστηκε θεωρητικά για διάφορες στροφές της γεννήτριας



Σχήμα 5.2 Η AC τιμή του ρεύματος συναρτήσει των στροφών της γεννήτριας όπως μετρήθηκε στο εργαστήριο και όπως προέκυψε απο τη θεωρητική μας ανάλυση

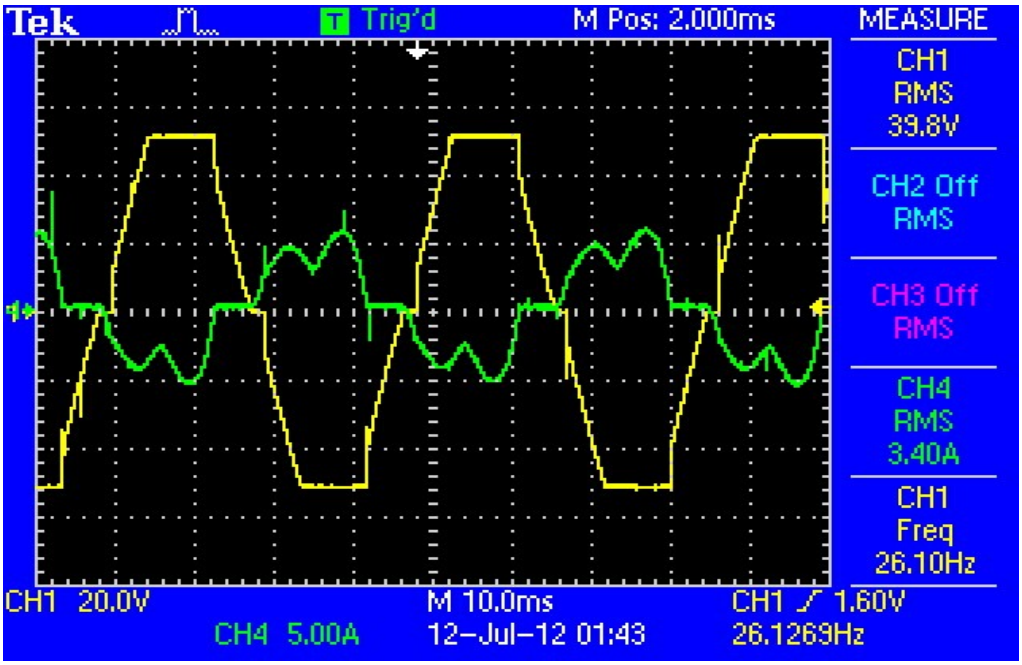


Σχήμα 5.3 Η DC τιμή του ρεύματος, μετά τον ανορθωτή σε σχέση με τις στροφές, όπως μετρήθηκε στο εργαστήριο και όπως υπολογίστηκε θεωρητικά



Σχήμα 5.4 Η DC ισχύς όπως μετρήθηκε στο εργαστήριο και όπως υπολογίστηκε θεωρητικά με βάση το μοντέλο μας

Επίσης παρατίθεται το στιγμιότυπο που δείχνει τα μεγέθη της γεννήτριας για σύνδεση απευθείας σε συσσωρευτές με το καλώδιο 20 μέτρων στο AC κομμάτι και 2 μέτρων στο DC κομμάτι, για λειτουργία βέλτιστης ενεργειακής απόδοσης. Αυτό σημαίνει ότι δουλεύει η γεννήτρια στις 261 στροφές και φαίνονται τα υπόλοιπα μεγέθη τους με σκοπό να συγκριθούν με τα αντίστοιχα θεωρητικά :



Σχήμα 5.5 Στιγμιότυπο κατά τη λειτουργία της γεννήτριας στις 261 στροφές

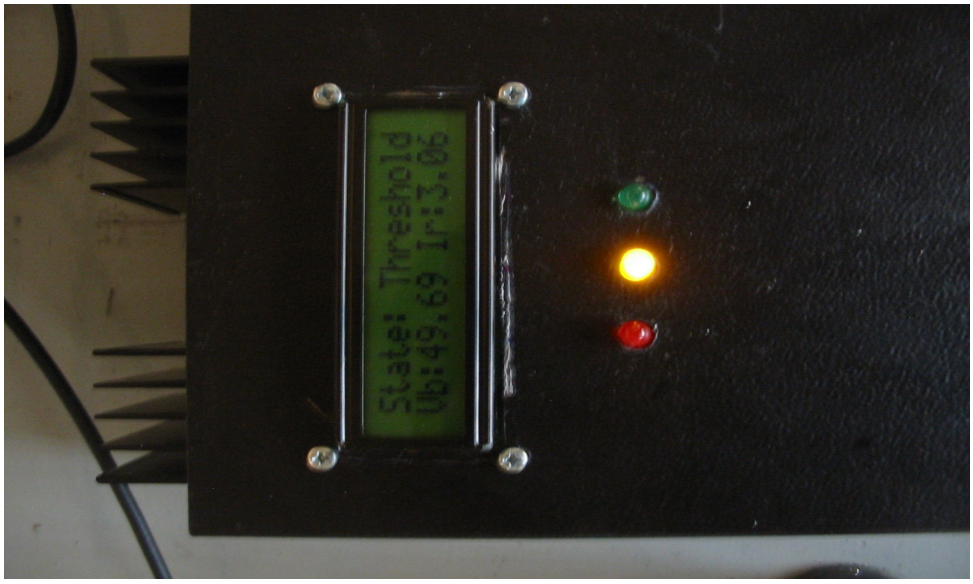
Όπως φαίνεται και στο στιγμιότυπο η συχνότητα είναι 26,1 Hz οπότε είμαστε στις 261 στροφές σύμφωνα με τον τύπο που παρατίθεται παραπάνω. Το ρεύμα Iac είναι 3,40 A και επίσης έχω Vt = 39,23 V πολικό άρα Vt = 22,64 V φασικό (βλέπε πίνακα 5.1). Τα αντίστοιχα μεγέθη που είχαμε υπολογίσει θεωρητικά ήταν Iac = 3,32 A και Vt = 23,02 V. Βλέπουμε λοιπόν ότι το μοντέλο μας είναι πάρα πολύ κοντά στην πραγματικότητα και επομένως θεωρείται αρκετά αξιόπιστο για μοντελοποίηση απευθείας σύνδεσης ανεμογεννητριών σε συσσωρευτές 48V.

Στη συνέχεια συνδέσαμε και το ροπόμετρο στη γεννήτρια μας με τη βοήθεια του οποίου στις 261 στροφές που αντιστοιχούν σε άνεμο 10 m/sec υπολογίσαμε την μηχανική ισχύ P_{mechM} = 245 W . Με τη θεωρητική μας δουλειά η P_{mech} στις 261 στροφές είναι P_{mechC} = 263 W, παρατηρώντας και εδώ μικρή απόκλιση στις μετρούμενες και θεωρητικές τιμές. Επίσης γνωρίζοντας την τάση πρίν τα καλώδια σύνδεσης αλλά και το ρεύμα βρίσκουμε την ηλεκτρική ισχύ P_{genM} = 231,61 W. Η θεωρητική μας τιμή είναι P_{genC} = 223 W τιμή αρκετά κοντά στην μετρούμενη.

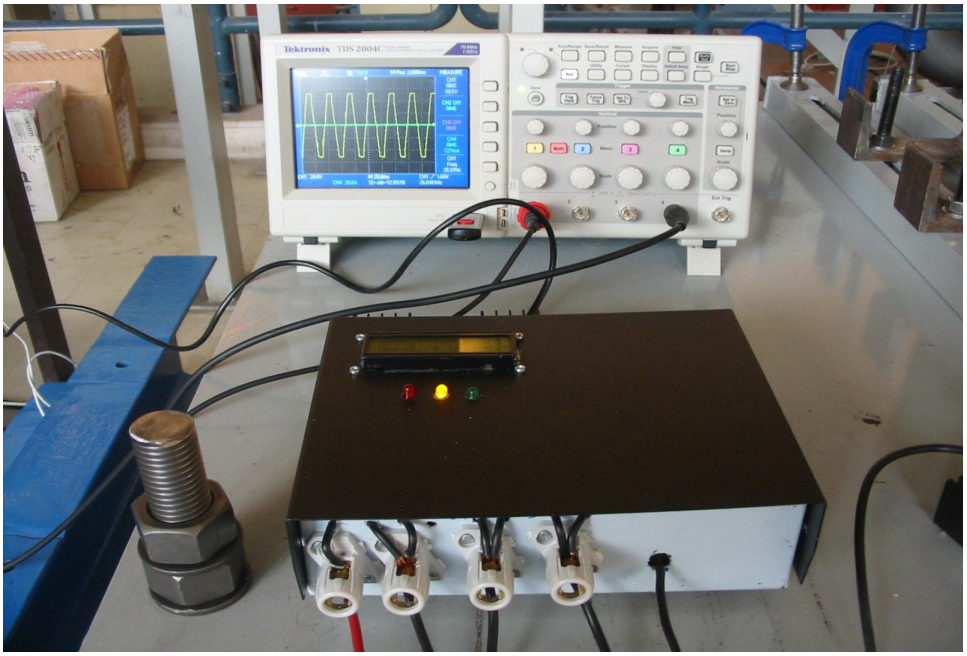
Στη συνέχεια συνδέσαμε τα απορριπτικά μας φορτία στον ελεγκτή, τον οποίο λόγω βαθμού φόρτισης

των συσσωρευτών προγραμματίσαμε να θέτει τα φορτία εντός συστήματος στα 50V και επίσης θέσαμε το κάτω όριο στα 49V ενώ σε συνθήκες πλήρους φόρτισης το άνω όριο, στο οποίο θα πρέπει να μπούν τα απορριπτικά φορτία στο σύστημα είναι τα 57,6V. Επομένως σύμφωνα με την παραπάνω παρουσίαση η ζώνη Charging είναι για τάσεις κάτω των 49V, η ζώνη Threshold απο 49V εώς 50V και η ζώνη Dumping απο 50 και πάνω.

Το σύστημα ανταποκρίθηκε αρκετά καλά στη διάταξη και όντως όταν έφτανε τα 50V η τάση των συσσωρευτών τα φορτία έμπαιναν στο σύστημα με αποτέλεσμα η τάση λόγω και της έλλειψης άλλων φορτίων που να συνδέονται με τους συσσωρευτές να παραμένει σε επίπεδα εντός της ζώνης Threshold χωρίς ωστόσο να ξεπερνούν ποτέ τη τιμή 50V. Λόγω της ταχύτητας του φαινομένου δε κατέστει δυνατό να αποτυπωθεί με κάποιο τρόπο η διαδικασία Dumping παρά μόνο η κατάσταση Threshold όπως αποτυπώνεται και στη παρακάτω φωτογραφία όπου φαίνεται η τάση των μπαταριών, κίτρινο LED που ανάβει σε αυτή τη ζώνη λειτουργίας, η κατάσταση του ελεγκτή και η RMS τιμή του ρεύματος που μετρά η αμπεροτσιμπίδα που έχουμε προσαρτήσει στον ελεγκτή :



Φωτογραφία 5.2 Η κατάσταση Threshold του Dump Load Controller που κατασκευάσαμε και δοκιμάσαμε στην πειραματική μας διάταξη του εργαστηρίου



Φωτογραφία 5.3 Ο ελεγκτής σε κατάσταση Threshold μαζί με τον παλμογράφο

Η κίτρινη γραμμή στον παλμογράφο δείχνει την τάση πριν τον ανορθωτή και η πράσινη το ρεύμα των απορριπτικών φορτίων που πολύ σωστά σε αυτή τη ζώνη έχει τιμή μηδέν καθώς είναι εκτός συστήματος και επομένως δε μπορεί να ρέει ρεύμα πάνω τους.

Συμπεράσματα και προτάσεις

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε κυρίως το κομμάτι της σύνδεσης ανεμογεννητριών απευθείας σε συσσωρευτές καθώς και το κομμάτι των dump load controllers που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν κατά τη μελέτη και την αποτελεσματικότερη λειτουργία του μοντέλου της AC σύνδεσης.

Όσον αφορά στη σύνδεση σε συστοιχία συσσωρευτών 48V παρατηρήσαμε την καταλυτική σημασία που παίζει το καλώδιο σύνδεσης κυρίως μεταξύ της γεννήτριας και του ανορθωτή καθώς το καλώδιο στο DC κομμάτι έχει αμελητέα επίδραση. Αυτό που έχει ιδιαίτερη σημασία σε αυτό το σημείο είναι η παρατήρηση ότι με την παρούσα έρευνα καταλήγουμε ότι για την αποτελεσματικότερη λειτουργία μιας εγκατάστασης που να περιλαμβάνει σύνδεση σαν αυτή που εξετάζουμε, καλό θα ήταν ανεξαρτήτως πραγματικών απαιτήσεων ή τοπογραφικών δεδομένων, τα καλώδια που θα χρησιμοποιηθούν για το AC κομμάτι να έχουν μήκος πάνω απο 50 – 60 μέτρα ανά φάση καθώς έτσι εξασφαλίζεται αρκετά ικανοποιητική λειτουργία και υψηλή ενεργειακή απόδοση με σχετικά χαμηλά διαφορά στην τιμή όπως φαίνεται στους αντίστοιχους πίνακες. Επίσης σημαντικό είναι τονιστεί και το γεγονός ότι η υψηλή τιμή της αντίστασης έχει ως αποτέλεσμα και υψηλές απώλειες χαλκού στο καλώδιο. Αυτό έχει μεγάλη σημασία καθώς όπως φαίνεται και στη μελέτη της σύνδεσης με αυτεπαγωγή αλλά και στη σύνδεση των 24V η ισχύς που φτάνει στους συσσωρευτές είναι τουλάχιστον διπλάσια για τις περισσότερες πειριπτώσεις μήκους καλωδίου. Χαρακτηριστικός είναι ο πίνακας 3.22 που αποτυπώνει τη διαφορά στην ισχύ των μπαταριών ανάμεσα στην απευθείας σύνδεση και τη σύνδεση με αυτεπαγωγή.

Σημαντικό επίσης είναι και το γενογός ότι αυτή η διαφορά στην ισχύ των συσσωρευτών δεν είναι ανάλογη με την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης. Αυτό μπορεί εύκολα να φανεί αν συγκριθούν οι τιμές της ενεργειακής απόδοσης μεταξύ του συστήματος 48V και του 24V όπου ενώ οι τιμές της ισχύος είναι σχεδόν διπλάσιες στην περίπτωση του συστήματος 24V, οι τιμές της ενεργειακής απόδοσης απέχουν ελάχιστα. Κάτι τέτοιο παρατηρείται καθώς η ενεργειακή απόδοση έχει να κάνει απο τη μία με το ποσοστό της αεροδυναμικής ισχύος που φτάνει στις μπαταρίες, ενώ απο την άλλη έχει να κάνει με την κατανομή του ανέμου και πώς ακριβώς αυτή σχετίζεται με τις καταστάσεις λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Με αυτό εννοούμε ότι είναι πολύ διαφορετικές οι τιμές τόσο των στροφών που λειτουργεί η γεννήτρια στις διάφορες συνδέσεις αλλά πολύ περισσότερο διαφορετικές είναι οι τιμές του Cp αλλά και του λ.

Στο κομμάτι που αφορά στην σύνδεση με αυτεπαγωγή, ενώ η θεωρητική ανάλυση υποδεικνύει αρκετά βελτιωμένα μεγέθη σε σχέση με την απευθείας σύνδεση, το υψηλό κόστος υλοποίησης καθιστά αυτόν τον κατά τα άλλα ιδιαίτερα ελκυστικό και εύκολο τρόπο βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης και της συμπεριφοράς εν γένει της ανεμογεννήτριας μή ελκυστικό. Αυτό που θα μπορούσε να γίνει στο μέλλον θα ήταν η προσπάθεια εύρεσης καποιου πιό εύκολου στην υλοποίηση τρόπου, είτε η προσπάθεια για κατασκευή κάποιας διάταξης που να εκτελεί τη διαδικασία μεγιστοποίησης της ισχύος (MPPT) με σχετικά μικρό κόστος, ίσως και να μπορούσε να υλοποιηθεί και με βάση την πλατφόρμα Arduino που σε περιπτώσεις φωτοβολταϊκών συστημάτων έχει αξιοποιηθει σε διάταξη MPPT με ιδιαίτερα αποτελεσματικό τρόπο [13]. Τέλος θα μπορούσε να γίνει έρευνα πάνω στον τρόπο κατασκευής αυτεπαγωγών με σκοπό να μπορεί κάποιος με ελάχιστες γνώσεις και χωρίς μεγάλο χρηματικό κόστος να κατασκευάσει αυτεπαγωγές για την εγκατάσταση του.

Επίσης ένα κομμάτι που μένει να ερευνηθεί στο μέλλον είναι η σύνδεση σε συσσωρευτές 12V τόσο σε απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές αλλά και με αυτεπαγωγή αν βέβαια κάτι τέτοιο έχει κάποια πρακτική αξία. Η δουλειά που έγινε με το σύστημα 24V έδειξε ότι ακόμα και σε αυτά τα βόλτ η σύνδεση αυτεπαγωγής δεν έχει κάποια τρομερή επίδραση στην αύξηση της ενεργειακής απόδοσης, ενώ προσθέτει καί ένα αρκετά μεγάλο κόστος στην κατασκευή, γι' αυτό και δεν παρουσιάστηκε και στην παρούσα έρευνα.

Στο κομμάτι που αφορά στον ελεγκτή υπάρχει ακόμα μεγάλο πεδιο έρευνας, καθώς οι δυνατότητες του ελεγκτή που κατασκευάσαμε είναι μόνο ένα κλάσμα των πραγματικών δυνατοτήτων που προσφέρει τόσο η πλατφόρμα Arduino αλλά και η κυκλωματική διάταξη που υλοποιήσαμε.

Πιο συγκεκριμένα δουλειά θα μπορούσε να γίνει στο κομμάτι της διαδικασίας εισόδου – εξόδου των απορριπτικών φορτίων απο το σύστημα. Με την υλοποίηση την οποία κατασκευάσαμε δεν αξιοποιούμε τις δυνατότητες συμπαραγωγής που μας προσφέρουν τα απορριπτικά φορτία καθώς τα κρατάμε για μικρό χρονικό διάστημα μέσα στο σύστημα και έτσι δε θα ήταν και πολύ αποδοτικά σε μία εγκατάσταση, για παράδειγμα συμπαραγωγής θερμότητας για την θέρμανση νερού. Μια υλοποίηση η οποία θα άφηνε τα φορτία για μεγαλύτερο χρόνο στο σύστημα, μέσω του κατάλληλου προγραμματισμού του Arduino θα ήταν δυνατό να εκμεαλλευτεί αυτό το γεγονός. Στην πραγματικότητα η υλοποίηση που κάνει ο Hurd επιτελεί αυτή ακριβώς τη λειτουργία. Βάζει τα φορτία στο σύστημα στα 14,4V και τα βγάζει στα 13,52V περίπου, επιτρέποντας έτσι ρεύμα να ρέει για μεγάλο χρονικό διάστημα στα dump loads.

Επίσης θα μπορούσαν να προστεθούν αισθητήρες ανέμου, θερμοκρασίας και ροπών. Εκμεταλλευόμενοι το πλήθος των φτηνών shields που κυκλοφορούν για Arduino αλλά και υλοποιήσεων που προσφέρει η κοινότητά του θα μπορούσαμε να έχουμε σχεδόν τον πλήρη έλεγχο του συστήματος μας. Όλα τα παραπάνω θα μπορούσαν να φαίνονται στην οθόνη που έχει ήδη προσαρτηθεί αλλά και να στέλνονται μέσω κατάλληλης υλοποίησης σε υπολογιστή, ακόμα και σε κινητό τηλέφωνο. Κάτι τέτοιο είναι προφανές ότι αυξάνει τη χρησιμότητα, την αποτελεσματικότητα αλλά και την ευελιξία του ελεγκτή μας. Τέλος αν έχουμε φορτώσει στον ελεγκτή όλα τα δεδομένα του συστήματός μας όπως ,αντίσταση καλωδίων ,τύπο ανορθωτή, τύπο μπαταρίας αλλά και μεγέθη που έχουν να κάνουν με τη κατασκευή της γεννήτριας, τότε πολύ εύκολα μέσω του μοντέλου μας, γνωρίζοντας μία τιμή τάσης αλλά και μία τιμή ρεύματος μέσω της αμπεροτσιμπίδας θα μας επέτρεπε τον υπολογισμό απωλειών χαλκού στα καλώδια, ηλεκτρικής και μηχανικής ισχύος αλλά και των τάσεων στα διάφορα μέρη του. Έτσι επιτυγχάνουμε αυξημένο βαθμό εποπτείας και ελέγχου της ανεμογεννήτριας μας ενώ εξοικειονόμαστε με την κατασκευή και λειτουργία ηλεκτρονικών συστημάτων οδηγούμενων απο μικροελεγκτές.

Βιβλιογραφία

[1] Hau E. "Wind Turbines, fundamentals, technologies, application, economics", second edition, Springer, 2006.

[2] Παπαθανασίου Σ, "Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας,σημειώσεις παραδόσεων" ΕΜΠ ,2008

[3] Chowdhury S., Chowdhury S.P., Crossley P., "Microgrids and Active Distribution Networkd", IET Renewable Energy Series 6, Institution of Engineering and Technology, 2009

[4] 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.

[5] Κοτσαμπόπουλος Πάνος,"Μελέτη ,προσομοίωση της λειτουργίας μικρής ανεμογεννήτριας αξονικής ροής" ΕΜΠ ,2010

[6] Gary Moor, Johan Beukes, "Maximum Power Point Tracking methods for small scale Wind Turbines".

[7] Μεσσήνης Γεώργιος ,"Βελτιστοποίηση, προσομοίωση και κατασκευή μικρής ανεμογεννήτριας για εφαρμογές χαμηλού κόστους και μελέτη της AC και DC σύνδεσης" ΕΜΠ ,2011

[8] Rossouw F., "Analysis and Design of Axial Flux Permanent Magnet Wind Generator System for Direct Battery Charging Applications", thesis MScEng, Stellenbosch University, 2009.

[9] Bumby J., Stannard N., Martin R., "A Permanent Magnet Generator for Small Scale Wind Turbines", IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 152, No. 5, pp.1065-1075, September 2005.

[10] Piggott H. "How to build a wind turbine", 2005.

[11] 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

[12] "Small Scale Renewable Energy Control Systems",
Brent Crowhurst ,Renewable Energy Program Coordinator Falls Brook Centre, New Brunswick, Canada
Nordic Folkecenter for Renewable Energy ,2007

[13] Αλεξάνδρα Καπετανάκη, “Μελέτη, κατασκευή και δοκιμές σε πραγματικές συνθήκες πολυκρυσταλλικού φωτοβολταϊκού πλαισίου και ανιχνευτή MPP γισ σύνδεση σε σύστημα συσσωρευτών για εφαρμογές χαμηλού κόστους” Ε.Μ.Π ,2011