



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

**Ανάλυση αιολικού πάρκου
ανεμογεννητριών με μηχανές διπλής τροφοδότησης διασυνδεδεμένων
στο δίκτυο**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αναστάσιος Δ. Ουλής – Ρούσης

Επιβλέπων : Αντώνιος Γ. Κλαδάς
Καθηγητής

Αθήνα, Ιούλιος 2013



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

**Ανάλυση αιολικού πάρκου
ανεμογεννητριών με μηχανές διπλής τροφοδότησης διασυνδεδεμένων
στο δίκτυο**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αναστάσιος Δ. Ουλής – Ρούσης

Επιβλέπων : Αντώνιος Γ. Κλαδάς
Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 25^η Ιουλίου 2013.

.....
Αντώνιος Γ. Κλαδάς

.....
Στ. Ν. Μανιάς

.....
Στ. Παπαθανασίου

Αθήνα, Ιούλιος 2013

.....
Αναστάσιος Δ. Ουλής – Ρούσης

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

Copyright © Αναστάσιος Δ. Ουλής – Ρούσης 2013.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η αυξανόμενη χρήση της αιολικής ενέργειας στη σημερινή εποχή σε συνδυασμό με τη ραγδαία ανάπτυξη των τεχνολογιών ανεμογεννητριών έχει προκαλέσει το έντονο ενδιαφέρον για τη βέλτιστη αξιοποίηση του ανέμου σε ευρύ φάσμα ταχυτήτων. Στο πλαίσιο αυτό, βασική απαίτηση των αιολικών συστημάτων αποτελεί η αδιάλλειπτη παροχή μέγιστης ισχύος στο ηλεκτρικό δίκτυο ακόμα και σε συνθήκες διαταραχών.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη κατάλληλου μοντέλου για την ανάλυση και τον έλεγχο ασύγχρονης γεννήτριας διπλής τροφοδότησης, που είναι πλέον πολύ διαδεδομένη στα αιολικά συστήματα. Αρχικά, περιγράφονται τα επιμέρους υποσυστήματα της ανεμογεννήτριας που μελετήθηκε. Συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στο αεροδυναμικό μέρος, αναλύεται μαθηματικά η ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης και επεξηγείται η λειτουργία του back – to – back μετατροπέα με λεπτομερή ανάλυση των επιμέρους τμημάτων του.

Στη συνέχεια, εξετάζεται το σύστημα ελέγχου και ο τρόπος λειτουργίας του. Στο σημείο αυτό, περιγράφεται η τεχνική του διανυσματικού ελέγχου και αναλύεται ο έλεγχος της ανεμογεννήτριας τόσο από την πλευρά του δρομέα όσο και από την πλευρά του δικτύου. Ακόμη, περιγράφεται η λειτουργία του συστήματος ανεύρεσης σημείου παροχής μέγιστης ισχύος με δεδομένη χαρακτηριστική καμπύλη.

Παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά αιολικού πάρκου και μελετώνται διάφορες περιπτώσεις λειτουργίας ώστε να αξιολογηθεί η εναρμόνισή του με τις τεχνικές απαιτήσεις του διαχειριστή του ελληνικού συστήματος. Στο πλαίσιο αυτό, προσομοιώνονται περιπτώσεις κανονικής λειτουργίας αλλά και διαταραχών στην πλευρά του δικτύου.

Επιπλέον, συγκρίνονται οι αποκρίσεις του συστήματος της παρούσας εργασίας με εκείνες αντίστοιχου συστήματος της βιβλιογραφίας, προκειμένου να επιβεβαιωθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του προτεινόμενου μοντέλου.

Τέλος, διερευνάται η επίπτωση στις αποκρίσεις του συστήματος ελέγχου με τυπικά κέρδη ανάδρασης ολοκληρωτικού σφάλματος με εκείνες που προκύπτουν μετά από βελτιστοποίησή τους με τη μέθοδο των Ziegler – Nichols.

Λέξεις κλειδιά

Αιολική ενέργεια, Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών, Ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης, Back – to – back μετατροπέας, Διανυσματικός έλεγχος, Μετασχηματισμός Park, Μέθοδος ανεύρεσης σημείου παροχής μέγιστης ισχύος, Βύθιση τάσης, Μέθοδος Ziegler – Nichols.

Abstract

The fast development of wind energy in the current era combined with the rapid improvement of wind turbine technology has attracted the interest to optimize their use in wide wind speed ranges. In this context, an essential requirement for wind turbine systems is the uninterrupted supply of maximum power to the grid even under fault conditions.

The aim of this thesis is the development of appropriate simulation models for analysis and control of doubly fed asynchronous generators, which are now widely used in wind systems. In a first step, the subsystems of the studied wind turbines are described. More specifically, the aerodynamic part of a wind turbine is examined, the doubly fed asynchronous generator is analyzed and the operation of the back – to – back converter is explained while the constitutive parts are detailed.

In a second step, the control and its operating characteristics are examined. At this point, the vector control technique is described while the control actions of the wind turbine are analyzed both at the rotor side and at the grid side. The maximum power point tracking system (MPPT) based on a specific optimum power-speed characteristic is also described.

In the followings, a wind farm is simulated under various operating conditions in order to assess fulfillment of the technical requirements of the Greek system administrator. In this context, both normal operating conditions as well as fault cases at the grid side are examined.

Moreover, the response results of the studied grid interconnected wind farm system are compared to the corresponding ones of a system found in the literature, in order to validate the proposed model accuracy.

Finally, the impact on the controller efficiency is examined when tuning the PI feedback gains by using the Ziegler – Nichols optimization technique.

Keywords

Wind energy, Variable speed wind turbine, Doubly fed asynchronous generator, Back – to – back converter, Vector control technique, Park transformation method, Maximum power point tracking, Voltage dip, Ziegler – Nichols method.

Ευχαριστίες

Αισίως, ένα ιδιαίτερα ευχάριστο κομμάτι της ζωής κάθε ανθρώπου φθάνει στο τέλος του. Τα προηγούμενα χρόνια αποδείχτηκαν εποικοδομητικά και προσοδοφόρα παρά το γεγονός ότι το πέρασμα τους προκάλεσε ανάμεικτα συναισθήματα. Και αυτό γιατί άλλοτε βιώσαμε ευχάριστες και άλλοτε δυσάρεστες στιγμές. Σε κάθε περίπτωση, όμως, τώρα που φθάνω στο τέλος το μόνο συναίσθημα που επικρατεί είναι η χαρά και η ανάγκη να κρατήσω μόνο τις όμορφες στιγμές, οι οποίες ήταν αμέτρητες! Άλλωστε, σε καμία περίπτωση δε θα μπορούσα να ξεχάσω τις ατελείωτες ώρες γέλιου με την παρέα, αλλά και τις ατελείωτες ώρες διαβάσματος, που οδήγησαν στη περάτωση του πρώτου κύκλου σπουδών μου. Κλείνοντας, λοιπόν, αυτός ο κύκλος δημιουργείται η ανάγκη για αναζήτηση κάτι καινούριου. Κάτι καινούριο που με δίψα και μεγάλη χαρά θέλω να κυνηγήσω και να ολοκληρώσω με μεγαλύτερη ακόμη επιτυχία δεδομένου ότι τώρα ελπίζω πως όλα μπορώ να τα δω με πιο ώριμη και κριτική σκέψη. Επιπλέον, αισθάνομαι πολύ τυχερός γιατί ήρθαν έτσι τα πράγματα αυτά τα χρόνια, που νιώθω ότι μόνο κέρδισα και σε καμία περίπτωση δε ζημιώθηκα.

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να εκφράσω την ευχαρίστηση και ευγνωμοσύνη μου σε όλους εκείνους που συνετέλεσαν στις όμορφες αυτές αναμνήσεις και οδήγησαν στην ολοκλήρωση των σπουδών μου. Έτσι, ευχαριστώ πολύ τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής εργασίας κ. Αντώνιο Γ. Κλαδά για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της και τον κ. Αργύριο Σολδάτο για τη βοήθεια του σε ένα κρίσιμο σημείο για την περάτωση της διπλωματικής μου εργασίας. Επιπλέον, δε θα μπορούσα να εξαιρέσω από τις ευχαριστίες μου το συμφοιτήτη και καλό μου φίλο Παρασκευά Συμινελάκη, του οποίου η βοήθεια γύρω από το λογισμικό Matlab υπήρξε μεγάλη καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας (όπως επίσης και όλα αυτά τα χρόνια μέσα από τις διάφορες συζητήσεις που είχαμε).

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, που με τον ένα ή τον άλλο τρόπο ήταν δίπλα μου στην όμορφη πορεία των προπτυχιακών μου χρόνων, τα οποία με γέμισαν με εμπειρίες – εφόδια για όλη μου τη ζωή. Συγκεκριμένα, τους γονείς μου που ακόμη κι αν δεν κατάφεραν κάποιες φορές να το εκφράσουν σωστά, πάντα επιδίωκαν και ακόμη επιδιώκουν το καλύτερο για εμάς. Επίσης, τη δίδυμη αδερφή μου Μαρία και τον μικρότερο αδερφό μου Κωνσταντίνο, που πάντα ήταν παρόντες στις δύσκολες στιγμές και ιδίως τους τελευταίους μήνες, που υπηρετούσα στις Ένοπλες Δυνάμεις. Σε όλους εύχομαι υγεία πάνω απ' όλα με αισιοδοξία για την αντιμετώπιση των δυσκολιών της ζωής. Στα αδέρφια μου ιδιαίτερα εύχομαι καλή τύχη στο στίβο της ζωής, που δεν είναι εύκολος, αλλά με επιμονή και υπομονή μπορεί να στεφθεί με μεγάλη επιτυχία.

Στα καλύτερα, που με τη βοήθεια του Θεού θα έρθουν...

Περιεχόμενα

| | |
|---|-----------|
| Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή..... | 13 |
| 1.1 Αντικείμενο και δομή της εργασίας..... | 13 |
| 1.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας..... | 16 |
| 1.3 Αιολική Ενέργεια..... | 16 |
| 1.4 Όρια διεύθυνσης αιολικής ενέργειας..... | 17 |
| 1.5 Τεχνολογίες Ανεμογεννητριών..... | 18 |
| 1.5.1 Επικρατέστερες διαμορφώσεις ηλεκτρικού μέρους ανεμογεννητριών...20 | |
| 1.5.2 Συνήθεις τοπολογίες μετατροπών σε συστήματα ανεμογεννητριών..... | 22 |
| 1.6 Περιγραφή της υπό μελέτη ανεμογεννήτριας..... | 23 |
| 1.7 Διασύνδεση ανεμογεννητριών στο δίκτυο..... | 24 |
| 1.7.1 Τεχνικές απαιτήσεις για σύνδεση στο δίκτυο..... | 24 |
| 1.7.1.1 Ελληνικοί Κανονισμοί..... | 24 |
| 1.7.1.2 Κανονισμοί άλλων χωρών..... | 29 |
| 1.7.1.3 Επιλογή των κανονισμών που θα ληφθούν υπ' όψιν..... | 34 |
| | |
| Κεφάλαιο 2: Μοντελοποίηση Α/Γ και αιολικού πάρκου..... | 35 |
| 2.1 Δυναμικό μοντέλο αιολικού πάρκου..... | 35 |
| 2.2 Αεροδυναμικό μέρος ανεμογεννήτριας..... | 36 |
| 2.2.1 Μοντελοποίηση αεροδυναμικού μέρους..... | 38 |
| 2.3 Ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης..... | 39 |
| 2.3.1 Μοντελοποίηση ασύγχρονης γεννήτριας διπλής τροφοδότησης..... | 42 |
| 2.4 Μετατροπείας back – to – back..... | 44 |
| 2.4.1 Τριφασική ανορθωτική γέφυρα..... | 45 |
| 2.4.2 Τριφασικός αντιστροφέας πηγής τάσης..... | 45 |
| 2.5 Σύστημα ελέγχου παρακολούθησης του σημείου παροχής μέγιστης ισχύος..... | 46 |

| | |
|---|-----------|
| Κεφάλαιο 3: Σύστημα ελέγχου..... | 51 |
| 3.1 Γενική περιγραφή του συστήματος..... | 51 |
| 3.2 Διανυσματικός Έλεγχος – Δυναμικές εξισώσεις..... | 51 |
| 3.3 Η αναπαράσταση των δύο αξόνων..... | 51 |
| 3.4 Έλεγχος της ασύγχρονης γεννήτριας διπλής τροφοδότησης..... | 56 |
| 3.4.1 Έλεγχος από την πλευρά του δρομέα..... | 56 |
| 3.4.2 Έλεγχος από την πλευρά του δικτύου..... | 58 |
| 3.5 Ανεύρεση του σημείου παροχής μέγιστης ισχύος..... | 59 |
| 3.6 Παράμετροι συστήματος..... | 61 |
| | |
| Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα προσομοίωσης συστήματος..... | 63 |
| 4.1 Κανονική λειτουργία..... | 64 |
| 4.2 Διαταραχές της τάσης..... | 67 |
| 4.2.1 Βύθιση της τάσης κατά 30% για 10 sec (περίπτωση λειτουργίας 1)..... | 67 |
| 4.2.2 Βύθιση της τάσης κατά 50% για 0.5 sec (περίπτωση λειτουργίας 2)..... | 70 |
| 4.2.3 Βύθιση της τάσης κατά 85% για 0.2 sec (περίπτωση λειτουργίας 3)..... | 73 |
| 4.3 Περιπτώσεις λειτουργίας για επίδειξη του MPPT..... | 76 |
| 4.3.1 Εφαρμογή βηματικής μεταβολής ανέμου..... | 76 |
| 4.3.2 Εφαρμογή πραγματικής ανεμοσειράς..... | 78 |
| | |
| Κεφάλαιο 5: Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου με αντίστοιχα της βιβλιογραφίας..... | 81 |
| 5.1 Περίπτωση λειτουργίας 1..... | 81 |
| 5.2 Περίπτωση λειτουργίας 2..... | 84 |
| 5.3 Περίπτωση λειτουργίας 3..... | 88 |

| | |
|--|------------|
| Κεφάλαιο 6: Βελτιστοποίηση κερδών ανάδρασης ελεγκτών..... | 93 |
| 6.1 Ρύθμιση κατά Ziegler – Nichols..... | 93 |
| 6.2 Εφαρμογή της μεθόδου στους PI ελεγκτές της παρούσας εργασίας..... | 95 |
| 6.3 Απόκριση του συστήματος στις εξετασθείσες περιπτώσεις λειτουργίας και σύγκριση μεταξύ των δύο ελεγκτών..... | 100 |
| 6.3.1 Κανονική λειτουργία..... | 101 |
| 6.3.2 Βύθιση της τάσης κατά 30% για 10 sec (περίπτωση λειτουργίας 1)..... | 103 |
| 6.3.3 Βύθιση της τάσης κατά 50% για 0.5 sec (περίπτωση λειτουργίας 2)..... | 106 |
| 6.3.4 Βύθιση της τάσης κατά 85% για 0.2 sec (περίπτωση λειτουργίας 3)..... | 109 |
| 6.4 Συμπέρασμα..... | 111 |
| | |
| Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα..... | 113 |
| 7.1 Κυριότερα συμπεράσματα της εργασίας..... | 113 |
| 7.2 Σημεία επιστημονικής συνεισφοράς της εργασίας..... | 115 |
| 7.3 Προτεινόμενα θέματα για περαιτέρω διερεύνηση..... | 115 |
| | |
| Βιβλιογραφία..... | 117 |
| Παράρτημα Α: Υποσυστήματα ανεμογεννητριών..... | 119 |
| Παράρτημα Β: Υποσυστήματα ελεγκτή..... | 121 |

1

Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο και δομή της εργασίας

Για δεκαετίες, οι συμβατικές πηγές ενέργειας κατέστη δυνατόν να καλύψουν επαρκώς τις διαρκώς αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες του ανθρώπου. Παρόλα αυτά, η χρήση τους είχε ως αντίκτυπο αυξημένα επίπεδα ρύπανσης του πλανήτη με αποτέλεσμα να επιδιώκεται ο περιορισμός της. Επιπλέον, η εμφάνιση δύο ενεργειακών κρίσεων (1973 και 1979, αντίστοιχα) επέφερε ραγδαία αύξηση του κόστους τους. Όλα αυτά σε συνδυασμό με τα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) ανέδειξαν τη σκοπιμότητα ανάπτυξής τους στο χώρο της ενέργειας. Ως εκ τούτου, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν σήμερα αντικείμενο συνεχούς μελέτης για πληθώρα ερευνητικών ομάδων διεθνώς. Ιδιαίτερα, η αιολική ενέργεια είναι μία από τις ταχύτερα αξιοποιούμενες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και μάλιστα κατέχει το μεγαλύτερο ποσοστό εγκατάστασης ΑΠΕ παγκοσμίως.

Μολονότι η αρχή λειτουργίας των ανεμογεννητριών είναι αρκετά απλή, η αξιοποίησή τους θέτει σημαντικές προκλήσεις σχετικά με την απόδοση, τον έλεγχο και το κόστος κατασκευής τους. Στο πλαίσιο αυτό, υιοθετήθηκαν διάφορες διαμορφώσεις ανεμογεννητριών με ποικίλα χαρακτηριστικά [2] όπως σταθερών ή μεταβλητών στροφών, με ασύγχρονη ή σύγχρονη γεννήτρια ως προς τη διαμόρφωση του ηλεκτρικού μέρους, με μετατροπέα EP/ΣP/EP στο στάτη ή στο δρομέα.

Μια από τις διαμορφώσεις, που παρουσιάζει έντονο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια, είναι η ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης (DFIG). Αυτός ο τύπος ανεμογεννήτριας είναι μεταβλητών στροφών (μεγιστοποίηση της απόδοσης ισχύος) χρησιμοποιώντας κατάλληλο έλεγχο μέσω μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος συνδεδεμένου στον δρομέα. Έχουν αναπτυχθεί και αναφέρονται στη βιβλιογραφία διάφορες εφαρμογές της συγκεκριμένης τοπολογίας ανεμογεννήτριας και των μεθόδων ελέγχου της.

Συγκεκριμένα, οι Erlich et al. [1] μοντελοποιούν μία ανεμογεννήτρια διπλής τροφοδότησης με back – to – back μετατροπέα και ρυθμιστή, που χρησιμοποιεί διανυσματικό έλεγχο. Έτσι, επιτυγχάνουν ανεξάρτητο έλεγχο ενεργού και άεργου ισχύος για περιπτώσεις λειτουργίας τόσο μόνιμης κατάστασης όσο και διαταραχών τάσης. Η συγκεκριμένη ομάδα υλοποίησε τις μεθόδους της σε υπεράκτιο αιολικό πάρκο στη Γερμανία πετυχαίνοντας ικανοποιητική απόδοση. Στα πλαίσια της διπλωματικής του εργασίας [2], ο κ. Δ. Μαρούδας συγκρίνει διάφορα αιολικά συστήματα και τελικά χρησιμοποιεί την DFIG για να διερευνηθεί η λειτουργία δύο διαφορετικών ελεγκτών, ενός κλασσικού PI ελεγκτή και ενός πολυωνυμικού RST ελεγκτή. Οι συνθήκες που εξετάζονται είναι η ονομαστική κατάσταση λειτουργίας και απόκριση σε απότομες μεταβολές ταχύτητας ενώ διερευνάται η σθεναρότητα σε μεταβολές των παραμέτρων της μηχανής.

Αντίστοιχα, στις εργασίες [3], [4] και [5] μελετάται η ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης εξετάζοντας διάφορες περιπτώσεις λειτουργίας με εναλλακτικές τεχνικές διανυσματικού ελέγχου. Συγκεκριμένα, οι Fletcher et al. [3] αναλύουν πλήρως τη λειτουργία της DFIG, του back – to – back μετατροπέα και των βασικών τεχνικών ελέγχου σε αυτόν αναφέροντας ορισμένα παραδείγματα πρακτικών εφαρμογών. Ως συμπέρασμα της εν λόγω εργασίας, προκύπτει ότι η DFIG είναι η πιο ανταγωνιστική επιλογή από άποψη ισορροπίας ανάμεσα στην απόδοση και το κόστος. Επιπλέον, στην [4] χρησιμοποιείται ένα σύγχρονα περιστρεφόμενο πλαίσιο προσανατολισμένο στη ροή του στάτη για να αναλυθούν τα ηλεκτρικά μεγέθη προκειμένου να αναλυθεί η λειτουργία ενός ελεγκτή τερματικής τάσης κατά την εφαρμογή διαφόρων χρονοσειρών ανέμου στο σύστημα. Επίσης, αναπτύσσεται ένας ρυθμιστής ταχύτητας, ο οποίος επιδιώκει την ανεύρεση του σημείου παροχής μέγιστης ισχύος. Στην εργασία [5], οι Morren et al. χρησιμοποιώντας το ίδιο πλαίσιο αναφοράς εξετάζουν την ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος με βάση τις απαιτήσεις του διαχειριστή του γερμανικού συστήματος. Για τον λόγο αυτό, εξετάζονται βυθίσεις τάσης 40% και 85%, αντίστοιχα.

Τέλος, οι Pierik et al. [6] – [7], κατόπιν μελέτης διαφόρων διαμορφώσεων αναλύουν την ανεμογεννήτρια διπλής τροφοδότησης με back – to – back μετατροπέα. Προκειμένου να ελεγχθεί πλήρως η λειτουργία της μηχανής εξετάζεται αιολικό πάρκο 12 ανεμογεννητριών, στο οποίο διερευνώνται διάφορες περιπτώσεις λειτουργίας. Συγκεκριμένα, στην αρχή ελέγχεται η απόκριση του συστήματος σε μεταβολές του ανέμου υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας του δικτύου και στη συνέχεια επιβάλλονται διαταραχές στην τάση του δικτύου (βυθίσεις 30%, 50% και 85%, αντίστοιχα, ως προς την ονομαστική τιμή της).

Στην παρούσα εργασία μελετάται το προναφερόμενο αιολικό πάρκο και αφού αναλύεται πλήρως η λειτουργία της ασύγχρονης γεννήτριας διπλής τροφοδότησης και του back – to – back μετατροπέα, αναπτύσσεται ένας συμβατικός ελεγκτής για τον έλεγχο τους. Στη συνέχεια εξετάζονται οι ίδιες περιπτώσεις λειτουργίας με την [7] και επιβεβαιώνεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια, βελτιστοποιούνται τα κέρδη του ελεγκτή και αντιπαραβάλλονται οι νέες αποκρίσεις με εκείνες του τυπικού.

Αναλυτικότερα, η εργασία διαρθρώνεται ως εξής. Στο **πρώτο κεφάλαιο** εξετάζονται οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ιδιαίτερα η αιολική ενέργεια και η διείσδυσή της στα σύγχρονα ηλεκτρικά δίκτυα. Επιπλέον, επιχειρείται επισκόπηση των αιολικών συστημάτων και των τεχνολογιών που εφαρμόζονται σε αυτές. Στην τελευταία υποπαράγραφο, αναφέρονται οι τεχνικές απαιτήσεις των διαχειριστών διαφόρων χωρών, καθώς και του ελληνικού συστήματος.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** περιγράφονται τα επιμέρους συστήματα των ανεμογεννητριών. Αρχικά, αναλύεται το αεροδυναμικό μέρος και οι αντίστοιχες εξισώσεις στις οποίες βασίζεται το μοντέλο. Στη συνέχεια, παρατίθεται η θεωρία των ασύγχρονων μηχανών διπλής τροφοδότησης αναφέροντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Ακολουθεί σύντομη περιγραφή των σχέσεων του μετατροπέα back – to – back του συστήματος.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** περιγράφεται το σύστημα ελέγχου που αξιοποιεί τεχνικές διανυσματικού ελέγχου και αναπαράστασης των ηλεκτρικών μεγεθών σε δύο άξονες. Στη συνέχεια, αναλύονται οι επιμέρους δράσεις του ελέγχου της γεννήτριας (έλεγχος από την πλευρά του δρομέα και έλεγχος από την πλευρά του δικτύου). Επιπλέον, αναλύεται η διαδικασία ανεύρεσης του σημείου παροχής μέγιστης ισχύος (MPPT).

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** μελετώνται διάφορες περιπτώσεις λειτουργίας του συστήματος. Αρχικά, εξετάζεται μια περίπτωση κανονικής λειτουργίας προκειμένου να επιβεβαιωθεί η ορθή λειτουργία του συστήματος βάσει των επιλεγθέντων κανονισμών (σταθερή τάση, λειτουργία υπό μοναδιαίο συντελεστή ισχύος). Στη συνέχεια, εξετάζονται οι αποκρίσεις σε διάφορες διαταραχές τάσης όπως επίσης και η λειτουργική συμπεριφορά του MPPT του συστήματος.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** συγκρίνονται οι διάφορες περιπτώσεις λειτουργίας, που παρουσιάστηκαν στο τέταρτο κεφάλαιο, με τις αντίστοιχες της [7], προκειμένου να επιβεβαιωθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων της μεθοδολογίας μοντελοποίησης που αναπτύχθηκε.

Στο **έκτο κεφάλαιο** χρησιμοποιείται μια εναλλακτική συστηματική μέθοδος για τη βελτιστοποίηση των κερδών αναδράσεων των PI ελεγκτών προκειμένου να συγκριθεί η λειτουργία του ελεγκτή, με εκείνη που προκύπτει για τις τυπικές τιμές.

Στο **έβδομο κεφάλαιο** συγκεντρώνονται τα κυριότερα συμπεράσματα της εργασίας, επισημαίνεται η επιστημονική συνεισφορά της και αναφέρονται θέματα που θα μπορούσαν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής διερεύνησης.

Τέλος, παρατίθενται η βιβλιογραφία της εργασίας και παραρτήματα με τα μοντέλα των συνιστωσών όπως έχουν εισαχθεί σε περιβάλλον Matlab/Simulink.

Τα σημεία ιδιαίτερης ανάπτυξης της παρούσας εργασίας είναι:

- Η ανάλυση της λειτουργίας της ασύγχρονης γεννήτριας διπλής τροφοδότησης με back – to – back μετατροπέα και η ανάπτυξη κατάλληλου μοντέλου για τη μελέτη της.
- Ανάπτυξη κατάλληλου συστήματος ελέγχου, ώστε να επιτελούνται οι απαιτούμενες λειτουργίες σε αιολικό πάρκο πολλών ανεμογεννητριών. Πιο συγκεκριμένα, εξέταση πάρκου που περιλαμβάνει δώδεκα ανεμογεννήτριες και διερεύνηση συμμόρφωσης με τις τεχνικές απαιτήσεις του διαχειριστή του ελληνικού συστήματος, τόσο σε κανονικές συνθήκες όσο και κατά τη διάρκεια βυθίσεων τάσης στο ηλεκτρικό δίκτυο.
- Μελέτη της εναλλακτικής συστηματικής βελτιστοποίησης των κερδών αναδράσεων των PI ελεγκτών και σύγκριση των αποκρίσεων με εκείνες που προκύπτουν για τυπικές τιμές τους.

1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

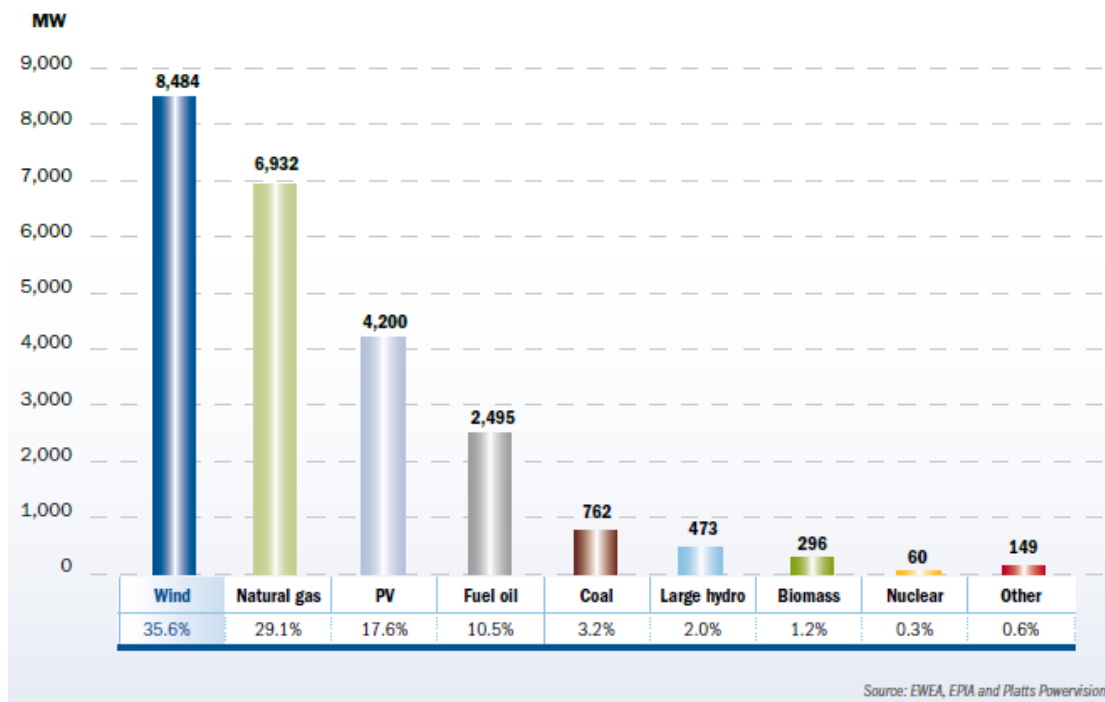
Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται πως ο άνθρωπος στρέφεται έντονα στην αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Το γεγονός αυτό σχετίζεται με πληθώρα παραγόντων, όπως είναι η ρύπανση του πλανήτη (π.χ. φαινόμενο θερμοκηπίου), οι συνθήκες ζωής που επικρατούν στα αστικά κέντρα και φυσικά οι θεωρίες περί εξάντλησης των συμβατικών ενεργειακών πηγών (ενεργειακές κρίσεις). Επιπλέον, η αύξηση της ζήτησης ενέργειας σε συνδυασμό με την αύξηση της τιμής των ορυκτών καυσίμων οδηγεί στην εκμετάλλευση εναλλακτικών ενεργειακών πηγών προκειμένου να καταστεί δυνατή η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών.

Στην κατεύθυνση αυτή οι ΑΠΕ αποτελούν την πλέον συμφέρουσα επιλογή, καθώς είναι πρακτικά ανεξάντλητες λόγω της ανανέωσης τους μέσω των φυσικών κύκλων. Σε χώρες σαν την Ελλάδα (μεγάλη ηλιοφάνεια, ισχυροί άνεμοι, κ.τ.λ.) καθίσταται επιτακτική ανάγκη η χρήση τέτοιων ενεργειακών συστημάτων, αφού συμβάλλουν στην ανεξαρτητοποίηση από τις συμβατικές ενεργειακές πηγές και παράλληλα δημιουργούν νέες θέσεις εργασίας με την ανάπτυξη αποκεντρωμένων περιοχών. Σημαντικό κρίνεται να αναφερθεί ότι χάρη στην αυξανόμενη χρήση τους οι τιμές εγκατάστασης συστημάτων ΑΠΕ μειώνονται καθημερινά, με αποτέλεσμα να γίνεται εφικτό για τον οποιονδήποτε να εγκαταστήσει ένα τέτοιο σύστημα.

Γενικά, οι ΑΠΕ συμβάλλουν στην ενίσχυση της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε εθνικό επίπεδο, εφόσον είναι εγχώριες πηγές ενέργειας. Επίσης, οι εγκαταστάσεις εκμετάλλευσης τους μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες καταναλωτών τόσο σε ατομικό όσο και σε συλλογικό επίπεδο. Εύκολα γίνεται, λοιπόν, αντιληπτό ότι η χρήση των ΑΠΕ είναι υποχρεωτική στις μέρες μας.

1.3 Αιολική ενέργεια

Σήμερα η αιολική ενέργεια δεσμεύει το μεγαλύτερο ποσοστό των ΑΠΕ, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα που παρατίθεται παρακάτω για την εγκατεστημένη ισχύ στο 2008. Πιο συγκεκριμένα, η χώρα μας πλεονεκτεί στον τομέα αυτό, αφού πολλές είναι οι περιοχές με υψηλό μέσο άνεμο καθόλη τη διάρκεια του έτους. Ακόμη, η ποιότητα ανέμου στις περιοχές αυτές (συνεχής πνοή, ελάχιστες μέρες άπνοιας) τις καθιστά ιδανικές για εγκατάσταση αιολικών πάρκων.



Σχήμα 1.3.1 Στατιστικά στοιχεία εγκατάστασης διαφόρων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ευρώπη[21]

Το κυριότερο πλεονέκτημα των ανεμογεννητριών (Α/Γ) είναι ότι δεν παράγουν κατά τη λειτουργία τους CO₂, οξείδια του αζώτου και οξείδια του θείου. Παράλληλα, δαπανούν ιδιαίτερα μικρό ποσό ενέργειας για την κατασκευή και λειτουργία τους. Μάλιστα, υπολογίζεται πως μια Α/Γ αποδίδει την ενέργεια που έχει χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή, εγκατάσταση και λειτουργία της σε διάστημα μόλις τριών μηνών.

Ωστόσο, σημαντικό κρίνεται να αναφερθεί και ένα κύριο μειονέκτημα των Α/Γ, που δεν είναι άλλο από την αβεβαιότητα σχετικά με την εμφάνιση του ανέμου. Σαν αποτέλεσμα, ανακύπτει το πρόβλημα της μη σταθερής παραγωγής ενέργειας. Φυσικά, αυτό έχει άμεσο αντίκτυπο στα μεγάλα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, όπου οι απαιτήσεις των καταναλωτών ποικίλλουν και ως εκ τούτου εγκαθίστανται μεγάλες εφεδρείες ενέργειας.

1.4 Όρια διείσδυσης αιολικής ενέργειας

Με τα δεδομένα για την Ελλάδα σήμερα να είναι στα 10,5GW η αιχμή και 54TWh η ζήτηση, η διείσδυση των ΑΠΕ ανέρχεται στο 8%. Σύμφωνα με επίσημα στοιχεία του ΔΕΣΜΗΕ από το Φεβρουάριο του 2009 λειτουργούν στη χώρα 67 αιολικά πάρκα (Α/Π) συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 831MW. Βέβαια, να αναφέρουμε ότι το συγκεκριμένο ποσό διείσδυσης απέχει πολύ από το στόχο που έχει θέσει η Ευρωπαϊκή Ένωση. Ωστόσο, ο τομέας των ΑΠΕ αναπτύσσεται συνεχώς στη χώρα και αυτό θα οδηγήσει σύντομα σε κάλυψη όλο και μεγαλύτερων ποσοστών. Το ερώτημα που τίθεται εδώ, όμως, και χρήζει απάντησης σχετίζεται με το ποιά είναι το αποδεκτό όριο διείσδυσης των ΑΠΕ στο δίκτυο και από τι επηρεάζεται αυτό.

Η σύνδεση μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο πρέπει να γίνεται σύμφωνα με ορισμένους κανονισμούς, ώστε να είναι καλή από τη μία πλευρά η ποιότητα ισχύος που δίνεται στους καταναλωτές και από την άλλη να μην επηρεάζεται η σύνδεση του δικτύου διανομής και των εγκαταστάσεων παραγωγών. Η ποιότητα ισχύος χαρακτηρίζεται με βάση την τήρηση των ορίων που ορίζονται από τους εθνικούς και διεθνείς κανονισμούς.

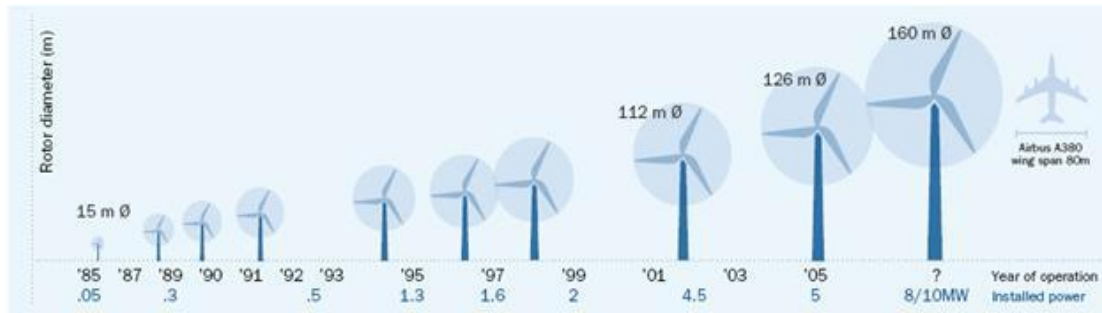
Διακρίνονται τις παρακάτω περιπτώσεις για τους περιορισμούς διείσδυσης:

1. Για αιολικά πάρκα σε ασθενή και μη διασυνδεδεμένα συστήματα οι περιορισμοί σχετίζονται με τα τεχνικά ελάχιστα των συμβατικών μονάδων παραγωγής, καθώς και με περιορισμούς σχετικά με την ευστάθεια του συστήματος (βυθίσεις τάσεις, ικανότητα παραμονής στο δίκτυο σε περίπτωση σφάλματος-fault ride through capability).
2. Για μη διασυνδεδεμένα νησιά, οι περιορισμοί σχετίζονται με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των συμβατικών μονάδων (συνήθως πετρελαϊκές). Πιο συγκεκριμένα, οι μονάδες αυτές δεν επιτρέπεται να υποφορτιστούν κάτω από ένα συγκεκριμένο ποσοστό της ονομαστικής τους ισχύος κυρίως για λόγους φθορών, αυξημένων αναγκών συντήρησης και αντισυμβατικής λειτουργίας. Οι περιορισμοί αυτοί ονομάζονται τεχνικά ελάχιστα των συμβατικών μονάδων παραγωγής.
3. Ακόμη, αναφορά πρέπει να γίνει και στους δυναμικούς περιορισμούς διείσδυσης. Η έντονη διακύμανση της ισχύος εξόδου των Α/Γ σε κλίμακα χρόνου δευτερολέπτων προκαλεί αντίστοιχες μεταβολές στην ισχύ των συμβατικών μονάδων, αφού η ισχύς του φορτίου παραμένει περίπου σταθερή. Αποτέλεσμα των μεταβολών αυτών είναι η πρόκληση διακυμάνσεων στη συχνότητα των αυτόνομων συστημάτων, η οποία ρυθμίζεται από τους ρυθμιστές στροφών του σταθμού. Ωστόσο, ακόμη και σε διασυνδεδεμένα συστήματα είναι δυνατόν να παρατηρηθεί αστάθεια του συστήματος λόγω απώλειας αιολικής παραγωγής και για το λόγο αυτό επιστρατεύονται οι δυναμικοί περιορισμοί του συστήματος που εξασφαλίζουν ότι το δίκτυο θα παραμείνει ευσταθές.

Λόγω όλων των παραπάνω περιορισμών οι Α/Γ κατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να συνεχίζουν τη λειτουργία τους σε περιπτώσεις σφαλμάτων και βυθίσεων τάσης. Επιπλέον, οι νέοι κώδικες απαιτούν οι Α/Γ να παρέχουν υποστήριξη τάσης κατά τη διάρκεια αλλά και μετά το πέρας των σφαλμάτων. Τέλος, οι Α/Γ πρέπει να συμμετέχουν στη ρύθμιση της συχνότητας.

1.5 Τεχνολογίες ανεμογεννητριών

Σκοπός της κατασκευής των ανεμογεννητριών είναι η δέσμευση της κινητικής ενέργειας του ανέμου. Η αιολική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική και μέσω άλλων συστημάτων σε ηλεκτρική. Με το πέρασμα των ετών η τεχνολογία τους εξελίσσεται και έτσι παρουσιάζουν τη δυνατότητα ολοένα μεγαλύτερης παραγωγής ισχύος (ανάλογα αυξάνεται και το μέγεθος τους), όπως φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 1.5.1 Εξέλιξη του μεγέθους και της ονομαστικής ισχύος των Α/Γ [22]

Ανεμογεννήτριες κατασκευάζονται εδώ και πολλούς αιώνες και πέρασε αρκετός καιρός μέχρι να καταλήξει ο άνθρωπος στο σημερινό σχήμα τους. Πλέον, οι δύο βασικές κατηγορίες τους είναι αυτές του κατακόρυφου και οριζόντιου άξονα. Να σημειωθεί ότι σήμερα τείνουν να χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο Α/Γ οριζόντιου άξονα λόγω μεγαλύτερου αεροδυναμικού συντελεστή.



Σχήμα 1.5.2 Ανεμογεννήτριες α) Οριζόντιου άξονα και β) Κατακόρυφου άξονα

Μια ανεμογεννήτρια αποτελείται από τα παρακάτω κύρια μέρη:

1. Το **μηχανικό σύστημα** που περιλαμβάνει τον ανεμοκινητήρα, δηλαδή το μέρος μετατροπής της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική. Αυτό αποτελείται από την έλικα με το σύστημα ελέγχου γωνίας βήματος (pitch control). Επίσης, να αναφερθεί ότι πολλές φορές υπάρχει ανάμεσα στον ανεμοκινητήρα και τη γεννήτρια μια διάταξη μεταφοράς κινήσεως που διαθέτει ένα κιβώτιο ταχυτήτων.

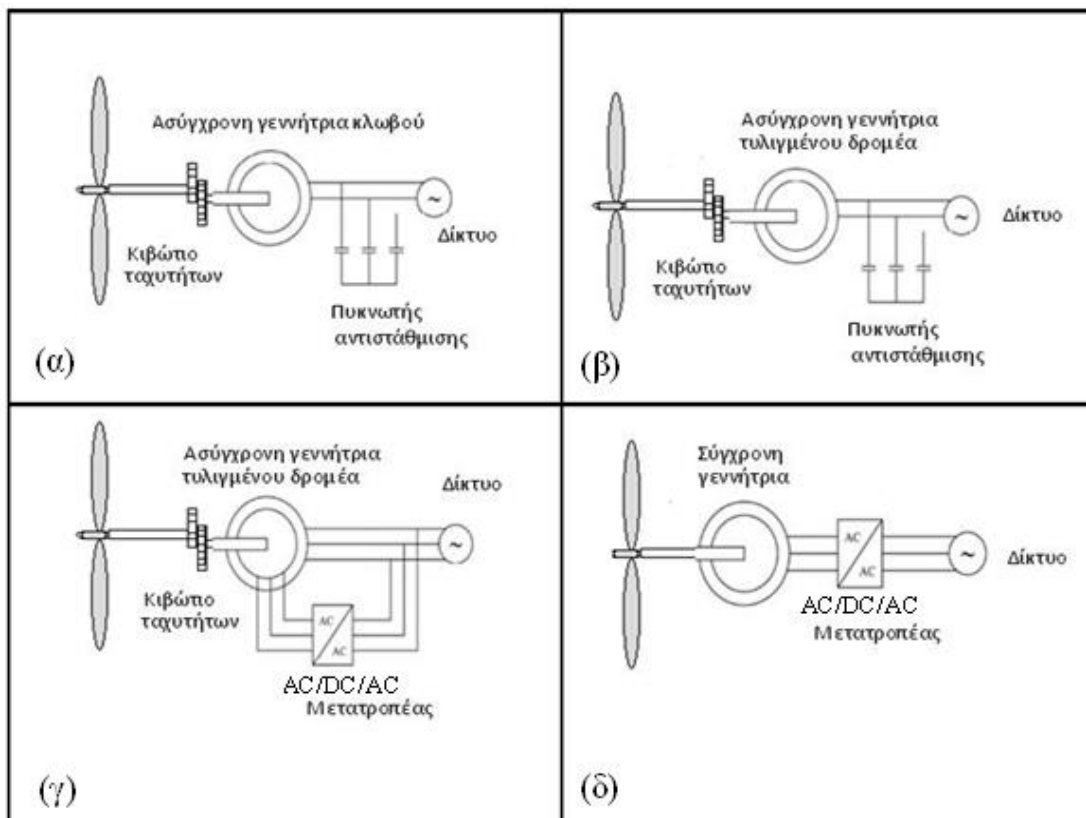
2. Το **ηλεκτρικό σύστημα** που περιλαμβάνει τη γεννήτρια και το μετατροπέα ισχύος (στις σύγχρονες Α/Γ μόνο).
3. Το **σύστημα ελέγχου** που εξασφαλίζει αποδοτική και ασφαλή λειτουργία της Α/Γ στις εκάστοτε συνθήκες ανέμου.

Οι Α/Γ διακρίνονται ανάλογα με τη λειτουργία των στροφών τους :

1. Α/Γ **σταθερών στροφών** (fixed speed) με στενό εύρος ταχύτητας περιστροφής,
2. Α/Γ **μεταβλητών στροφών** με μεγάλο εύρος ταχυτήτων. Ο τύπος αυτός είναι που χρησιμοποιείται ευρύτατα σήμερα, αφού έχει μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση.

1.5.1 Επικρατέστερες διαμορφώσεις ηλεκτρικού μέρους ανεμογεννητριών

1. **Σταθερών στροφών** με **ασύγχρονη** γεννήτρια κλωβού απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο.
2. **Περιορισμένης λειτουργίας μεταβλητών στροφών** με **ασύγχρονη** γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα μεταβλητής αντίστασης απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο.
3. **Μεταβλητών στροφών** με **ασύγχρονη** γεννήτρια διπλής τροφοδότησης.
4. **Μεταβλητών στροφών** με **σύγχρονη** γεννήτρια με τύλιγμα διέγερσης ή μόνιμο μαγνήτη.



Σχήμα 1.5.1.1 Επικρατέστερες διαμορφώσεις ηλεκτρικού μέρους Ανεμογεννητριών (α) Α/Γ σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού, (β) Α/Γ σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα, (γ) Α/Γ μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα διπλής τροφοδότησης, (δ) Α/Γ μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια και μετατροπέα ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ στο στάτη [9].

Κύρια πλεονεκτήματα της **A/Γ σταθερών στροφών** είναι το μικρό κόστος, το μικρό βάρος και η απλότητα κατασκευής. Το μικρό κόστος προκύπτει από το γεγονός ότι δε χρησιμοποιείται μετατροπέας και η γεννήτρια είναι μια απλή ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού. Η απουσία μετατροπέα προσδίδει στη διάταξη αξιοπιστία κατασκευής και μειωμένες ανάγκες συντήρησης. Ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι, ωστόσο, η αδυναμία ρύθμισης στροφών ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου και άρα κάθε μεταβολή στον τελευταίο επιφέρει μεταβολές στη μηχανική ροπή, που μεταφράζονται ως μηχανικές καταπονήσεις. Ακόμη, απαιτείται σύνδεση πυκνωτών προς επίτευξη αντιστάθμισης, αφού λόγω έλλειψης ηλεκτρονικών ισχύος δε ρυθμίζεται η άεργος ισχύς. Σχετικά με την ισχύ εξόδου τους, συνήθως παρουσιάζει έντονη διακύμανση και έτσι αυξάνονται οι εκπομπές flicker. Για όλους τους παραπάνω λόγους οι A/Γ αυτές δεν χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια.

Μια άλλη διαμόρφωση, που χρησιμοποιείται, είναι η **ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα** με δυνατότητα μεταβολής της αντίστασης δρομέα, που συντελεί σε έλεγχο της ηλεκτρικής ροπής. Έτσι, ελέγχεται η γεννήτρια μέσω αλλαγής στροφών κατά τη διάρκεια των ριπών ανέμου. Σαν αποτέλεσμα, περιορίζονται οι μηχανικές καταπονήσεις και βελτιώνεται η ποιότητα ισχύος.

Ωστόσο, ευρύτερη εφαρμογή σήμερα βρίσκουν οι **A/Γ μεταβλητών στροφών**, καθότι έχουν αυξημένη ενεργειακή απόδοση λόγω μέγιστης εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας. Αυτό γίνεται μέσω της μεταβολής στη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής ανάλογα με τον άνεμο. Αυτό, λοιπόν, είναι ένα σαφές πλεονέκτημα των A/Γ αυτών, αφού οδηγούν σε ραγδαία μείωση των μηχανικών καταπονήσεων. Έτσι, η ποιότητα ισχύος, που παρέχεται στο δίκτυο, είναι πολύ υψηλή. Επιπλέον, οι A/Γ μεταβλητών στροφών παρέχουν τη δυνατότητα ρύθμισης του συντελεστή ισχύος με κατάλληλη έγχυση αέργου ισχύος. Για το λόγο αυτό, εναρμονίζονται πλήρως με τα νέα πρότυπα που αναφέρονται στην ποιότητα ισχύος σε αντίθεση με τις A/Γ σταθερών στροφών.

Συνήθως χρησιμοποιούνται με **ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα και διπλή τροφοδότηση** με τον μετατροπέα συνδεδεμένο στο δρομέα. Κατά τη διαμόρφωση αυτή ελέγχονται οι στροφές με κατάλληλη ρύθμιση της συχνότητας των ρευμάτων του δρομέα. Εύκολα, λοιπόν, γίνεται αντιληπτό ότι η διαμόρφωση αυτή συγκεντρώνει πληθώρα πλεονεκτημάτων ιδίως όταν σε αυτά προστεθεί ότι χρησιμοποιείται μια απλή γεννήτρια και ένας φθηνός μετατροπέας. Από την άλλη πλευρά, όμως, υπάρχει το μειονέκτημα ότι ο στάτης συνδέεται απευθείας στο δίκτυο και έτσι απαιτούνται συστήματα προστασίας. Αυτό συμβαίνει, καθώς κάθε διαταραχή θα μεταβιβάζεται μέσω μαγνητικής σύζευξης και έτσι θα κινδυνεύει η διάταξη.

Σχετικά με την τελευταία διαμόρφωση (**μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια**), που αναφέρθηκε παραπάνω, πρέπει να πούμε ότι είναι κατάλληλη για σύνδεση στο δίκτυο, καθώς οι οποιεσδήποτε διαταραχές δύναται να εξομαλυνθούν από το δρομέα. Ακόμη, κατά τη διαμόρφωση αυτή χρησιμοποιούνται συνήθως πολυπολικές γεννήτριες, με αποτέλεσμα να εξαλείφεται το κιβώτιο ταχυτήτων και να μειώνεται με αυτό τον τρόπο το κόστος και το βάρος της διάταξης.

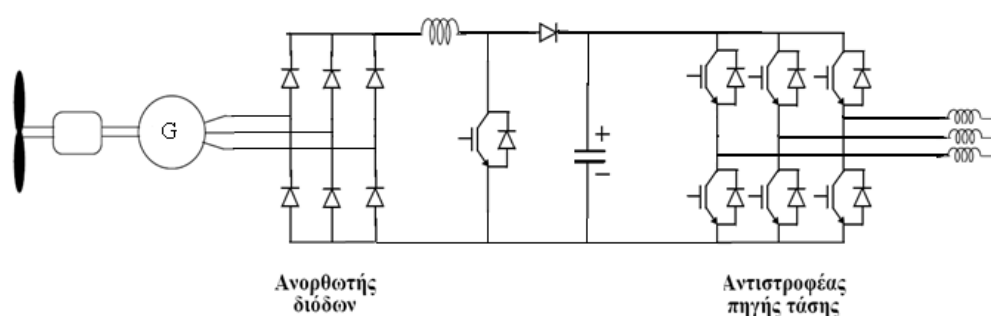
Μειονέκτημα της διαμόρφωσης αυτής είναι η μεγάλη και βαριά γεννήτρια που χρησιμοποιείται, καθώς και το ότι από τον μετατροπέα περνάει το 100% της παραγόμενης

ισχύος. Αυτό συντελεί στην περιορισμένη λειτουργία του συτήματος σε μη φυσιολογικές καταστάσεις και κυρίως στην ικανότητα αδιάλειπτης παροχής ισχύος.

1.5.2 Συνήθειες τοπολογίες μετατροπέων σε συστήματα ανεμογεννητριών

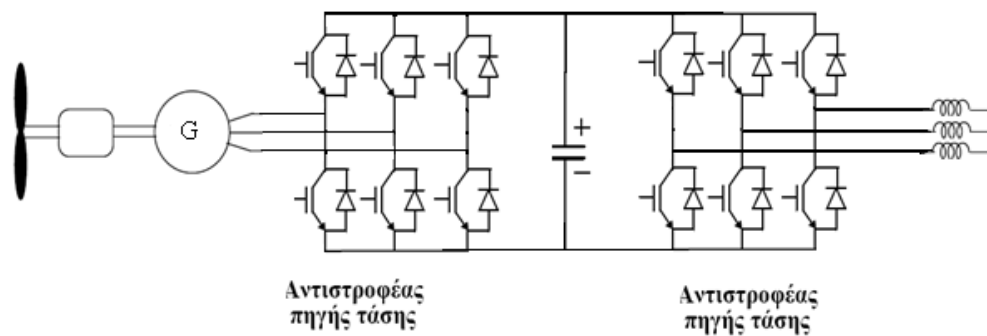
Υπάρχουν διάφοροι τύποι μετατροπέων που χρησιμοποιούνται στη σύνδεση Α/Γ στο δίκτυο. Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν δύο πολύ συνηθισμένοι.

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται μια σύγχρονη γεννήτρια συνδεδεμένη στο δίκτυο μέσω μιας **τριφασικής ανόρθωσης**, ενός **μετατροπέα ΣΡ/ΣΡ** κι ενός **αντιστροφέα**. Ο μετατροπέας ΣΡ/ΣΡ προβαίνει στον έλεγχο στροφών της ανεμογεννήτριας, ώστε να επιτυγχάνεται στην έξοδο η μέγιστη δυνατή ηλεκτρική ισχύς (Maximum Power Point Tracking). Η συνεχής τάση της γεννήτριας ανορθώνεται μέσω του τριφασικού ανορθωτή διόδων και ύστερα ο μετατροπέας ΣΡ/ΣΡ ελέγχει το ρεύμα οδηγώντας την Α/Γ στην καμπύλη βέλτιστης αεροδυναμικής ισχύος.



Σχήμα 1.5.2.1 Σύγχρονη γεννήτρια συνδεδεμένη στο δίκτυο μέσω τριφασικής ανόρθωσης, ενός μετατροπέα ΣΡ/ΣΡ κι ενός αντιστροφέα [9].

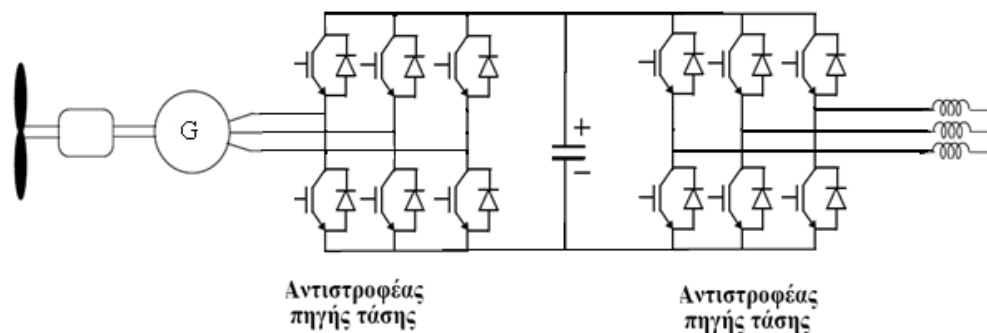
Μια εξίσου συχνά χρησιμοποιούμενη τοπολογία είναι αυτή της σύνδεσης δύο όμοιων μετατροπέων τύπου πηγής τάσης (Voltage Source Inverter-VSI), γνωστή ως **μετατροπέας back-to-back**. Ο μετατροπέας από την πλευρά της γεννήτριας λειτουργεί ως ανορθωτής, ενώ από την πλευρά του δικτύου ως αντιστροφέας. Στη διάταξη αυτή η ροή ισχύος είναι αμφίπλευρη. Προκειμένου να επιτευχθεί βελτιστοποίηση της ισχύος εξόδου θα πρέπει να διατηρείται σταθερή η τάση του πυκνωτή, ενώ παράλληλα θα πρέπει ο έλεγχος του μετατροπέα της γεννήτριας να γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να οδηγείται η γεννήτρια σε ταχύτητες περιστροφής που δίνουν βέλτιστη λειτουργία.



Σχήμα 1.5.2.2 Ασύγχρονη γεννήτρια συνδεδεμένη στο δίκτυο μέσω back – to – back μετατροπέα [9].

1.6 Περιγραφή της υπό μελέτη ανεμογεννήτριας

Η διάταξη που έχει διαμορφωθεί για τη διασύνδεση των ανεμογεννητριών με το δίκτυο είναι η παρακάτω:



Σχήμα 1.6.1 Υπό μελέτη σύστημα ανεμογεννήτριας [9].

Έτσι, λοιπόν, η ροή της ενέργειας περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια:

- Η κινητική ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια του ανεμοκινητήρα.
- Η κινητική ενέργεια του ανεμοκινητήρα μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω της γεννήτριας (AC).
- Από AC μετατρέπεται σε DC μέσω του ανορθωτή.
- Από DC μετατρέπεται σε AC μέσω του αντιστροφέα και αποδίδεται στο δίκτυο.

Η έξοδος της γεννήτριας ανορθώνεται από έναν ανορθωτή, ο οποίος τροφοδοτεί έναν πυκνωτή. Στη συνέχεια τροφοδοτείται ο αντιστροφέας πηγής τάσης, ο οποίος χρησιμοποιεί τεχνική SPWM για την παραγωγή ημιτονοειδούς τάσης. Να σημειωθεί ότι για να παρέχει το σύστημα όσο περισσότερη ενέργεια θα πρέπει ο αντιστροφέας να λειτουργεί με βέλτιστη απόδοση και να εξασφαλίζει ότι η τάση στον πυκνωτή θα είναι περίπου σταθερή. Αυτή,

λοιπόν, η τάση του πυκνωτή αντιστοιχεί σε DC τάση επιθυμητού επιπέδου στους ακροδέκτες του ανορθωτή και έτσι ελέγχεται το ρεύμα που δίνει η γεννήτρια. Συνεπώς, χρειάζεται κατάλληλο σύστημα ελέγχου για το ρεύμα της γεννήτριας, το οποίο υποδιαιρείται σε δύο ελεγκτές για τις δύο πλευρές του back – to – back μετατροπέα.

1.7 Διασύνδεση ανεμογεννητριών στο δίκτυο

Με το πέρασμα των χρόνων η διείσδυση των αιολικών πάρκων(A/Π) στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας των χωρών αυξάνεται σταδιακά, με αποτέλεσμα να έχει προκύψει η ανάγκη θέσπισης κανόνων και προτύπων για την αποφυγή προβλημάτων. Αυτό συμβαίνει, καθώς οι συμβατικοί σταθμοί παράγουν συγκεκριμένη ενέργεια ανάλογα με τη ζήτηση, κάτι που δε συμβαίνει με τα A/Π, στα οποία είναι δύσκολο να προβλεφθεί και να ελεγχθεί η παραγωγή ενέργειας(οφείλεται στην τυχαιότητα του ανέμου). Επίσης, οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής διαθέτουν διάφορα συστήματα αυτομάτου ελέγχου και ρυθμιστές τάσης και στροφών, που βοηθούν στην παροχή ισχύος καλής ποιότητας(σταθερή τάση και συχνότητα).

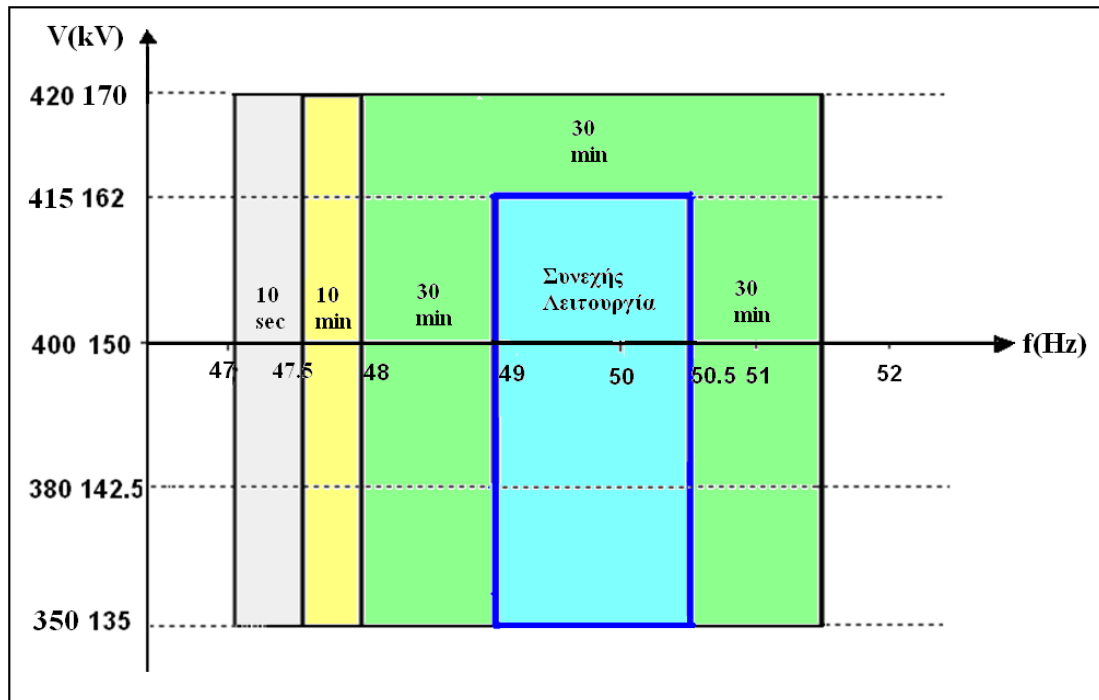
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι διάφορες μεταβολές στην ισχύ εξόδου των A/Γ επιφέρουν μεταβολές στη συχνότητα του δικτύου. Για το λόγο αυτό γινόταν περιορισμός της αιολικής διείσδυσης όσο το σύστημα παρέμενε σε συνθήκες φυσιολογικής λειτουργίας και πολλές φορές σε μεγάλες διαταραχές οι A/Γ αποκόπτονταν από το δίκτυο. Πλέον, όμως, αυτό είναι αδύνατο να συμβεί, αφού η διείσδυση των A/Π είναι τόσο μεγάλη, που ενδεχόμενη αποκοπή τους από το δίκτυο θα οδηγήσει σε μη κάλυψη της ζήτησης ενέργειας. Έτσι, έχουν θεσπιστεί διάφοροι κανονισμοί σύμφωνα με τους οποίους γίνεται δυνατή η συμμετοχή των A/Π στο δίκτυο.

1.7.1 Τεχνικές απαιτήσεις για σύνδεση στο δίκτυο

1.7.1.1 Ελληνικοί κανονισμοί

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκαν οι ελληνικοί κανονισμοί και τα κυριότερα σημεία αυτών παρουσιάζονται παρακάτω:

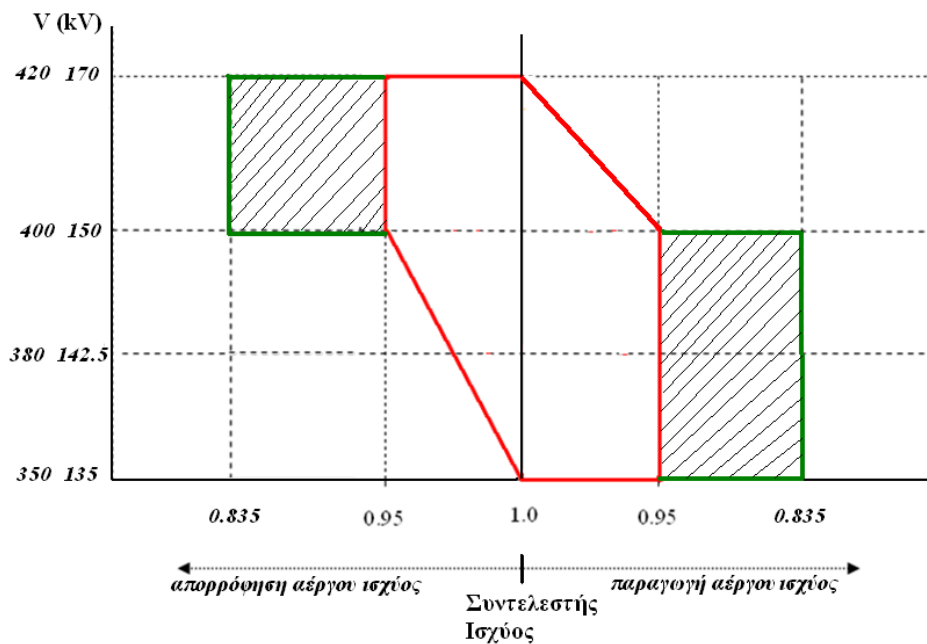
- Οι αιολικοί σταθμοί που συνδέονται στο σύστημα πρέπει να λειτουργούν κανονικά για διακυμάνσεις συχνότητας και τάσης σε συγκεκριμένα εύρη με συγκεκριμένες χρονικές ανοχές, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του διαγράμματος τάσης-συχνότητας του παρακάτω σχήματος:



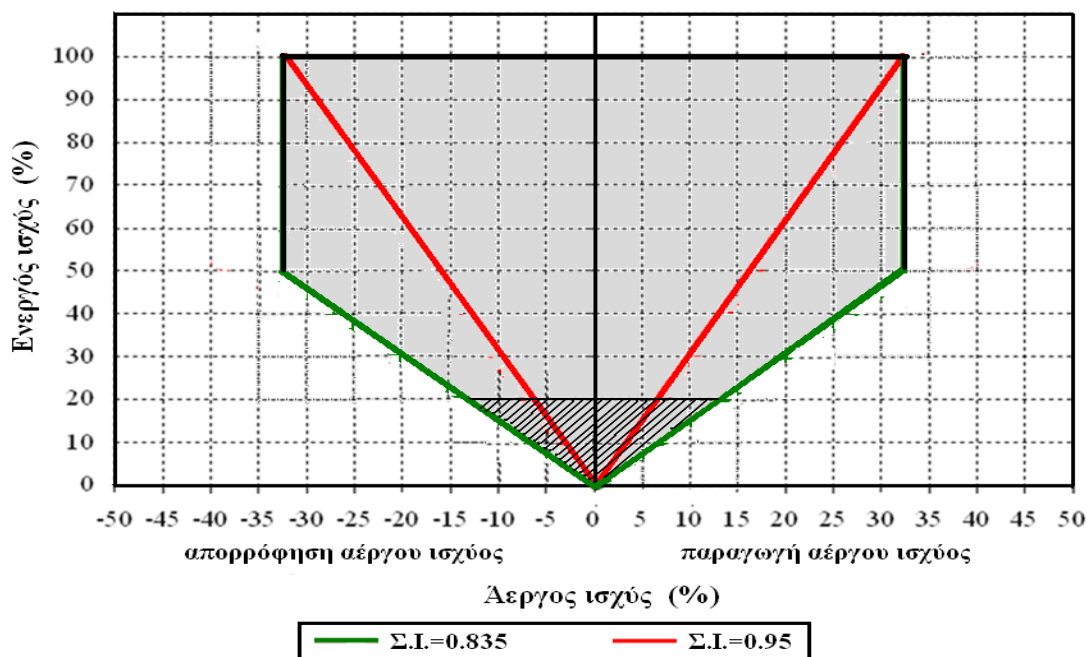
Σχήμα 1.7.1.1 Περιοχή λειτουργίας για συχνότητα και τάση και απαιτούμενες χρονικές ανοχές [16].

Να σημειωθεί ότι σε περίπτωση που η συχνότητα υπερβεί τα 51,5 Hz η αποσύνδεση των Α/Γ πρέπει να γίνει σε 4 στάδια. Κάθε στάδιο της αποσύνδεσης πρέπει να απέχει 0.5s από το προηγούμενο και να αποσυνδέεται εντός αυτού το 25% των ανεμογεννητριών σε λειτουργία.

- Η ελάχιστη απαιτούμενη δυνατότητα ρύθμισης του αιολικού σταθμού καθορίζεται από τα διαγράμματα τάσης – συντελεστή ισχύος και ενεργού – αέργου ισχύος των παρακάτω σχημάτων:



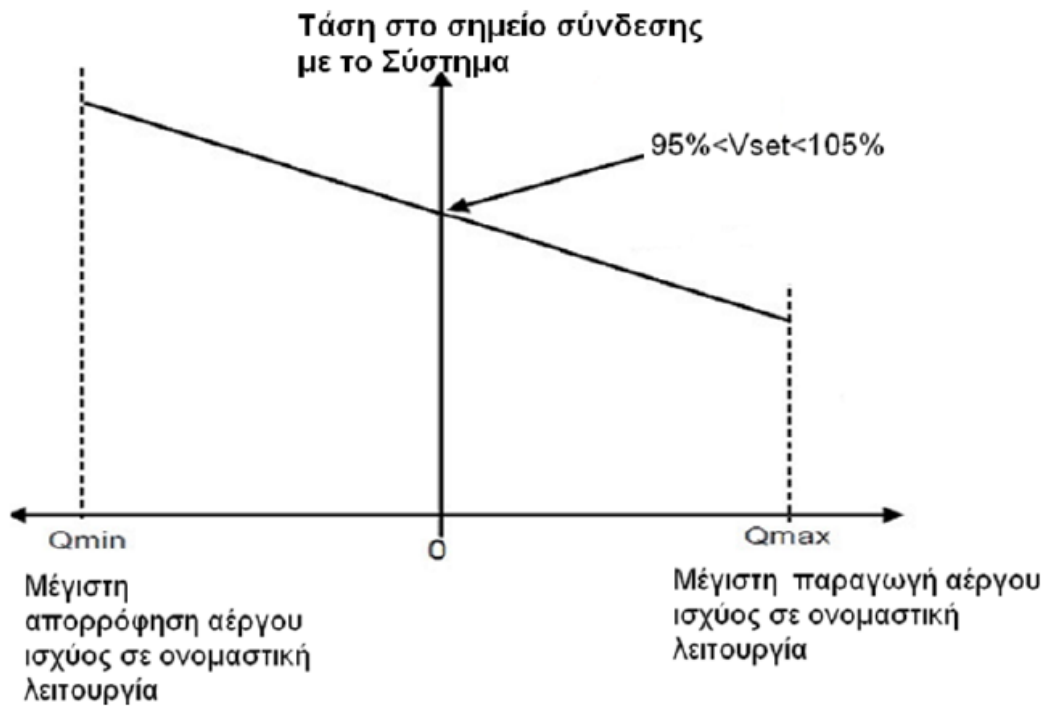
Σχήμα 1.7.1.2 Ελάχιστη υποχρεωτική περιοχή λειτουργίας αιολικού σταθμού, για τάση και συντελεστή ισχύος [16].



Σχήμα 1.7.1.3 Ελάχιστη υποχρεωτική περιοχή λειτουργίας αιολικού σταθμού για ενεργό και άεργο Ισχύ [16].

Στη μη διαγραμμισμένη περιοχή του 1^{ου} σχήματος η λειτουργία του αιολικού σταθμού γίνεται χωρίς την υποχρέωση μείωσης της ενεργού ισχύος (δηλαδή μπορεί να παράγει την ονομαστική του ισχύ). Αντίθετα, στη διαγραμμισμένη περιοχή η ενεργός ισχύς περιορίζεται σύμφωνα με τα προβλεπόμενα του 2^{ου} διαγράμματος.

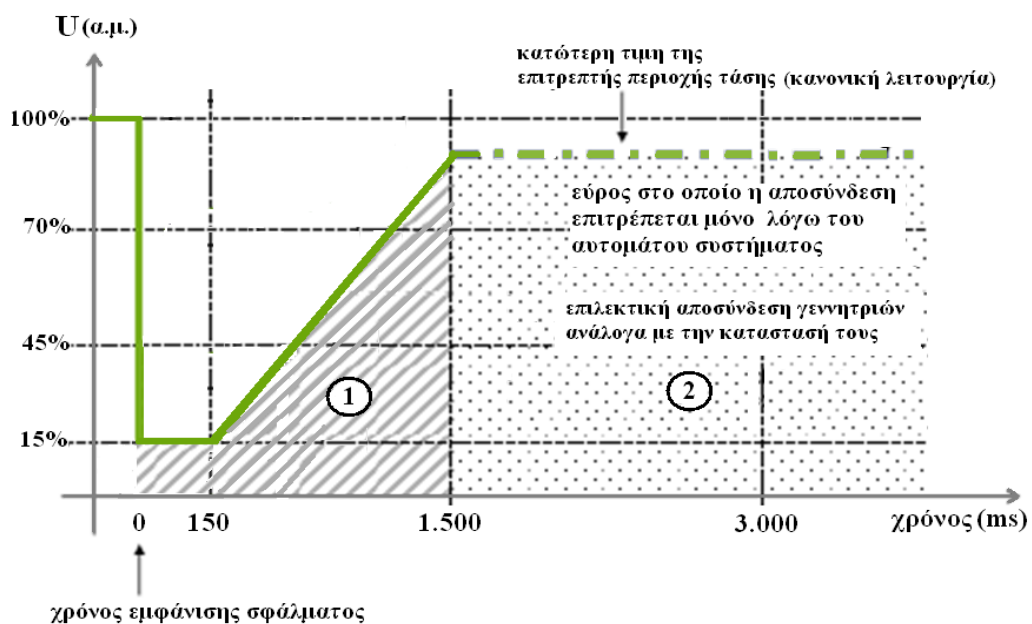
- Ο αιολικός σταθμός πρέπει να λειτουργεί προβαίνοντας σε ρύθμιση της αέργου ισχύος σε σχέση με την τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης ως εξής:



Σχήμα 1.7.1.4 Χαρακτηριστική τάσης – αέργου ισχύος [16].

- Όλα τα προβλεπόμενα από το παρόν Άρθρο αναφέρονται στη συνιστώσα θετικής ακολουθίας της τάσης στο σημείο σύνδεσης του αιολικού σταθμού με το σύστημα.

Καμπύλη τάσης για αδιάλειπτη λειτουργία Α/Γ:



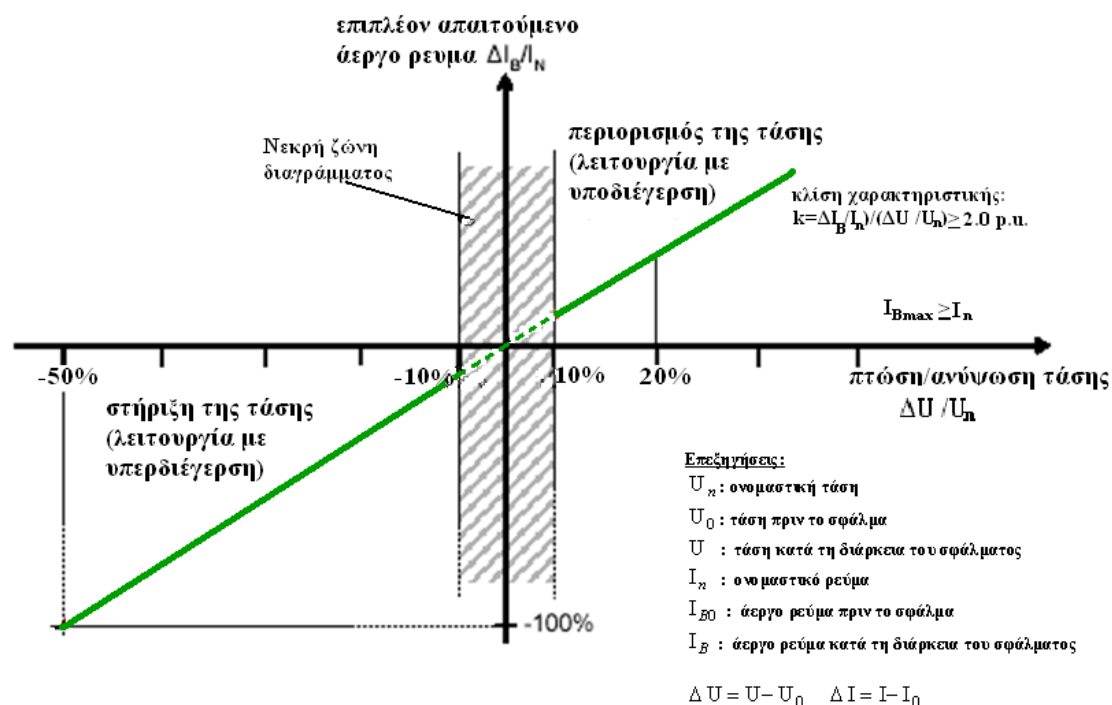
Σχήμα 1.7.1.5 Καμπύλη τάσης για αδιάλειπτη λειτουργία Α/Γ [16].

Συμμετρικές ή ασύμμετρες βυθίσεις τάσης λόγω σφαλμάτων ή διαταραχών του Συστήματος δεν πρέπει να οδηγούν σε αστάθεια ή αποσύνδεση του αιολικού σταθμού από το Σύστημα όταν η τάση στο σημείο σύνδεσης του Αιολικού Σταθμού παίρνει τιμές στην περιοχή πάνω από τη γραμμή του διαγράμματος του παραπάνω σχήματος.

Η περιοχή 1 του διαγράμματος αποτελεί την περιοχή σύντομης αποσύνδεσης της Α/Γ με σκοπό το σύντομο επανασυγχρονισμό τους.

Ωστόσο, για βυθίσεις τάσης διάρκειας μεγαλύτερης των 1.5 δευτερολέπτων και εκτός του επιτρεπτού εύρους διακύμανσης (όταν δηλαδή παραμένει κατάσταση δικτύου με χαμηλή τάση, είτε λόγω μόνιμου σφάλματος είτε λόγω άλλης διαταραχής – περιοχή 2 του σχήματος 6) επιτρέπεται η αυτόματη αποσύνδεση ανεμογεννητριών του αιολικού σταθμού (προστασία απόζευξης). Η αποσύνδεσή τους πρέπει να γίνεται σε 4 στάδια. Κάθε στάδιο της αποσύνδεσης πρέπει να απέχει 0.3s από το προηγούμενο και να αποσυνδέεται εντός αυτού, το 25% των Α/Γ σε λειτουργία. Σε κάθε περίπτωση, ο επανασυγχρονισμός του αιολικού σταθμού επιτρέπεται να πραγματοποιηθεί όταν η τάση στο σημείο σύνδεσης με το Σύστημα έχει επανέλθει σε τιμές μεγαλύτερες των 142.5kV και 380kV, για τα συστήματα μεταφοράς 150kV και 400kV, αντίστοιχα.

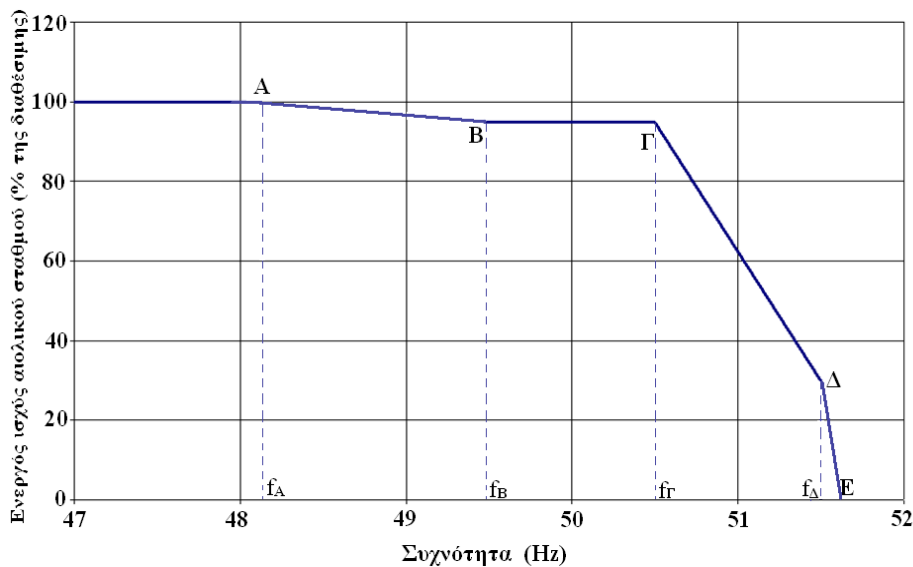
Σχετικά με την υποστήριξη της τάσης του συστήματος ο αιολικός σταθμός θα πρέπει να παρέχει άεργο ρεύμα σύμφωνα με το ακόλουθο διάγραμμα:



Σχήμα 1.7.1.6 Άεργο ρεύμα εξόδου κατά τη διάρκεια μεγάλων μεταβολών της τάσης [16].

Η στήριξη της τάσης πρέπει να εκκινεί εντός 20ms και σε περιπτώσεις βυθίσεως άνω του 50% θα πρέπει να έχει συντελεστεί σε 70ms μετά την αναγνώριση του σφάλματος.

Επιπλέον, ο αιολικός σταθμός θα πρέπει να μπορεί να ρυθμίζει την παραγωγή ενεργού ισχύος του ανάλογα με τη συχνότητα όπως ορίζει το παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.7.1.7 Καμπύλη συχνότητας-ενεργού ισχύος [16].

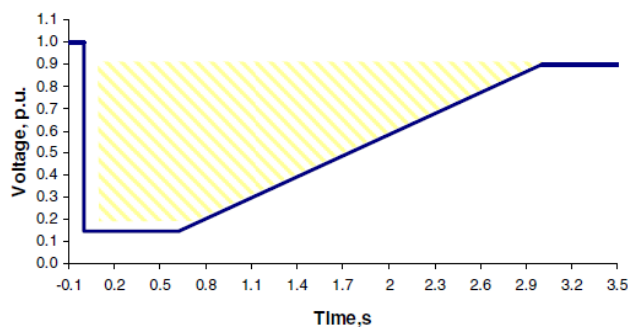
1.7.1.2 Κανονισμοί άλλων χωρών

Για την πληρότητα του συγκεκριμένου κεφαλαίου ακολουθεί συνοπτική αναφορά στα σημαντικότερα στοιχεία κανονισμών, που συναντώνται σε άλλες χώρες, όπως αυτά διαμορφώνονται από τους αντίστοιχους διαχειριστές.

Ιρλανδικοί κανονισμοί

Σύμφωνα με το διαχειριστή του ιρλανδικού συστήματος, τα παρακάτω θέματα είναι αυτά που χρήζουν προσοχής και για αυτά λοιπόν έχουν αναπτυχθεί τεχνικές απαιτήσεις:

Σχετικά με τη λειτουργία κατά τη διάρκεια σφαλμάτων τάσης, προκειμένου να διατηρείται το επίπεδο δυναμικής ευστάθειας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, λαμβάνεται υπ' όψιν το παρακάτω διάγραμμα:

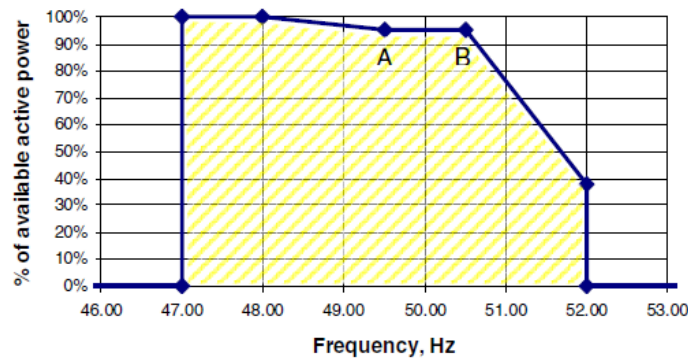


Σχήμα 1.7.1.2.1 Ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας αιολικών πάρκων [17].

Από το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνεται ότι ένα αιολικό πάρκο θα πρέπει να παραμένει συνδεδεμένο στη γραμμή κατά τη διάρκεια σφαλμάτων τάσεις για όσο η μετρηθείσα τάση στο ζυγό υψηλής τάσης του μετασχηματιστή σύνδεσης στο δίκτυο παραμένει πάνω από τη μπλε γραμμή.

Σύμφωνα με τους κανονισμούς για τη λειτουργία σε σφάλματα συχνότητας, ένα αιολικό πάρκο θα πρέπει να έχει την ικανότητα να επιτελεί δύο λειτουργίες:

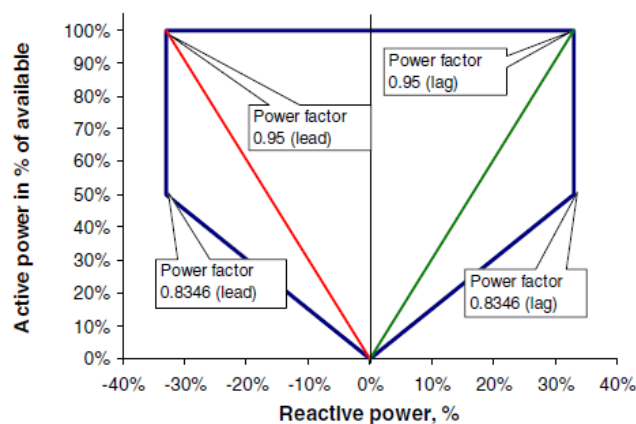
- α) να λειτουργεί κανονικά για συχνότητες από 49.5 Hz ως 50.5 Hz και
 - β) να παραμένει συνδεδεμένο στο σύστημα για συχνότητες στο εύρος 47.5 Hz – 52.0 Hz.
- Φυσικά ανάλογα με κάθε διακύμανση της συχνότητας το αιολικό πάρκο πρέπει να ρυθμίζει την ενεργό ισχύ, που αποδίδει στο σύστημα. Τα παραπάνω συνοψίζονται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 1.7.1.2.2 Απόκριση συχνότητας του αιολικού πάρκου [17].

Οι αιολικοί σταθμοί θα πρέπει να παραμένουν συνδεδεμένοι στο σύστημα αποδίδοντας τη μέγιστη διαθέσιμη ενεργό ισχύ ή την περιορισμένη ανάλογα με την τάση στην κανονική λειτουργία αλλά και σε συνθήκες διακύμανσης της τάσης, όταν η τελευταία είναι μεταξύ συγκεκριμένων ορίων. Τα όρια αυτά ποικίλλουν ανάλογα με το σύστημα (π.χ. για σύστημα 110 kV το αποδεκτό εύρος διακυμάνσεων είναι 99 kV – 123 kV). Ο ελεγκτής τάσης του συστήματος θα πρέπει να ρυθμίζει την τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης με συνεχή μεταβολή της αέργου ισχύος.

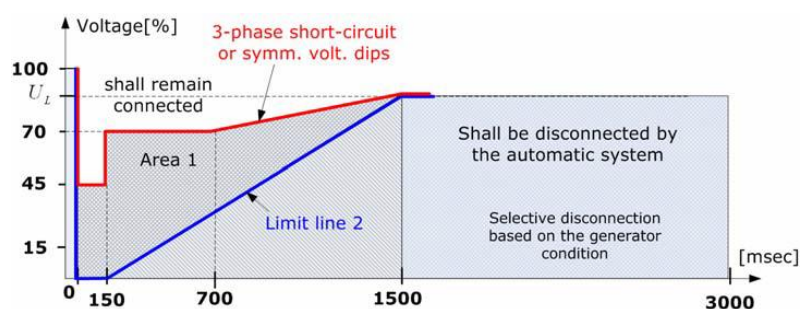
Στα παραπάνω αναφερθέντα αποδεκτά όρια ο αιολικός σταθμός θα πρέπει να λειτουργεί με το συντελεστή ισχύος να ακολουθεί το παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 1.7.1.2.3 Απόκριση αέργου ισχύος [17].

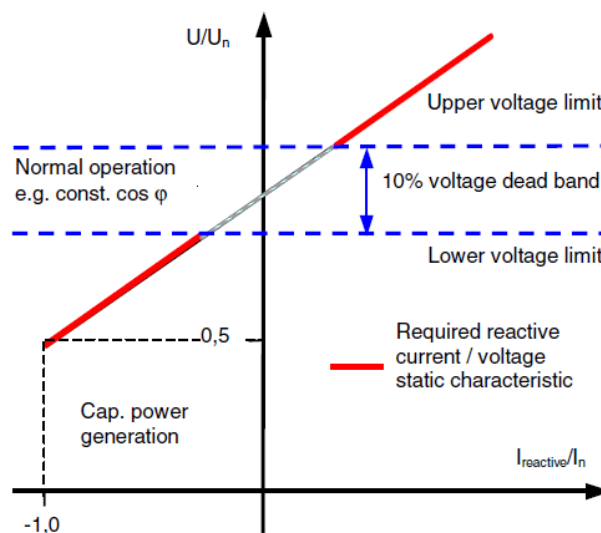
Γερμανικοί κανονισμοί

Αντίστοιχα, ο διαχειριστής του γερμανικού συστήματος έχει θεσπίσει τεχνικές απαιτήσεις, που ανταποκρίνονται στις ανάγκες του ίδιου συστήματος. Σχετικά με τις απαιτήσεις για αδιάλειπτη λειτουργία, οι τάσεις ακολουθούν το παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 1.7.1.2.4 Όρια τάσης για αποσύνδεση των μονάδων στην περίπτωση σφαλμάτων στο δίκτυο [18].

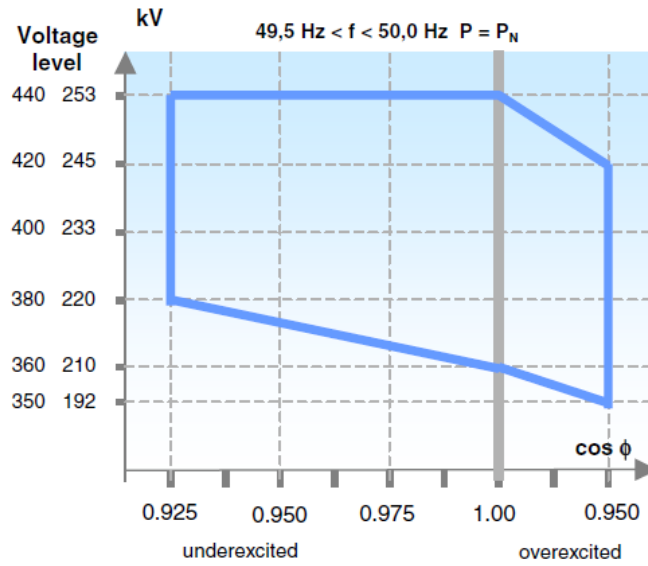
Όλες οι μονάδες παραγωγής θα πρέπει να υποστηρίζουν την τάση του δικτύου με εγχεόμενη άεργο ισχύ κατά τη διάρκεια σφαλμάτων τάσεως. Στην περίπτωση αυτή, ο έλεγχος τάσης θα πρέπει να λειτουργεί σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα μέσα σε διάστημα 20 msec από την αναγνώριση του σφάλματος. Η μονάδα θα πρέπει να παρέχει άεργο ρεύμα στην πλευρά χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή ισοδύναμη με τουλάχιστον 2% του ονομαστικού ρεύματος για κάθε ποσοστιαία μονάδα της πτώσης τάσης.



Σχήμα 1.7.1.2.5 Απαιτήση υποστήριξης τάσης κατά τη διάρκεια σφαλμάτων [19].

Να σημειωθεί πως αφού η τάση επιστρέψει στα επιθυμητά επίπεδα (dead band), η υποστήριξη της τάσης θα πρέπει να συνεχίσει να υφίσταται για άλλα 500 msec σύμφωνα με το γερμανικό διαχειριστή.

Επιπρόσθετα, οι γερμανικοί κανονισμοί περιέχουν πληροφορίες σχετικά με το συντελεστή ισχύος σε διάφορες τάσεις.

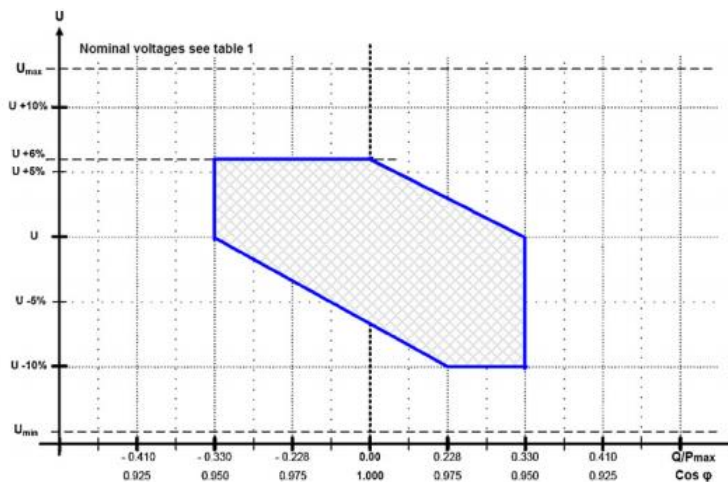


Σχήμα 1.7.1.2.6 Τεχνικές απαιτήσεις συντελεστού ισχύος [19].

Δανικοί κανονισμοί

Τέλος, παρατίθενται τους κυριότερους κανονισμούς της Δανίας, όπως προβλέπονται από τον αντίστοιχο διαχειριστή του εν λόγω συστήματος.

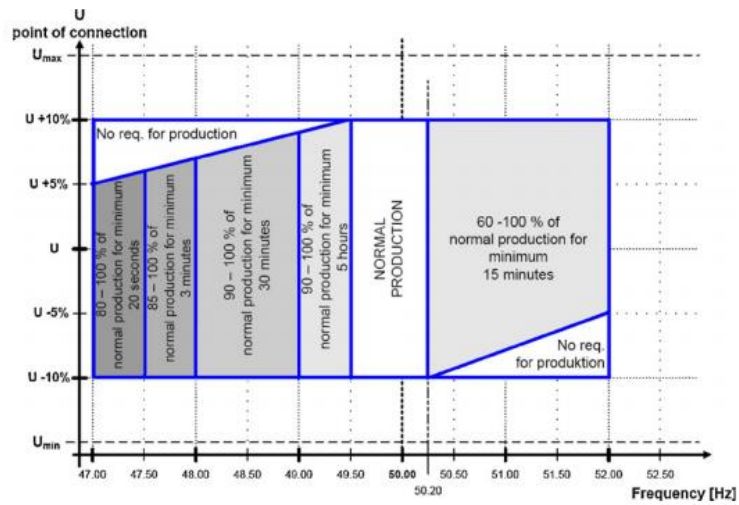
Αρχικά, παρουσιάζεται η απαίτηση για τη ρύθμιση τάσης:



Σχήμα 1.7.1.2.7 Ρύθμιση τάσης [5].

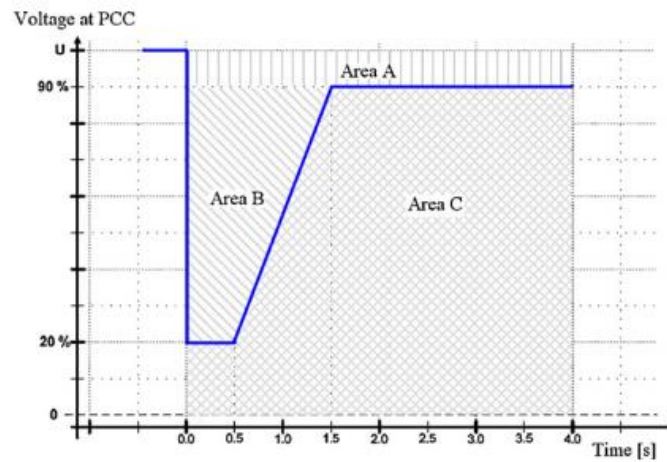
Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα τάσης – συχνότητας, στο οποίο διακρίνεται η περιοχή κανονικής λειτουργίας, καθώς και διάφορες περιοχές με συγκεκριμένα ποσοστά παροχής

ηλεκτρικής ισχύος εξαρτώμενα από τη συχνότητα που επικρατεί στο σύστημα την εκάστοτε στιγμή.



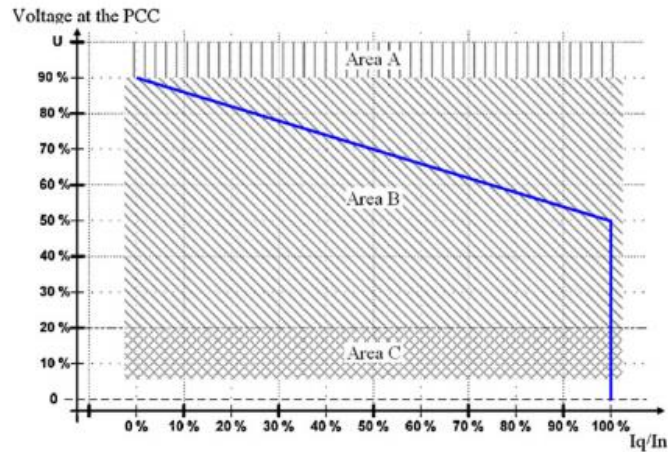
Σχήμα 1.7.1.2.8 Περιοχή κανονικής λειτουργίας [5].

Ακόμη, ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία, το οποίο δεν θα μπορούσε να παραληφθεί είναι η ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας, η οποία παρατίθεται παρακάτω:



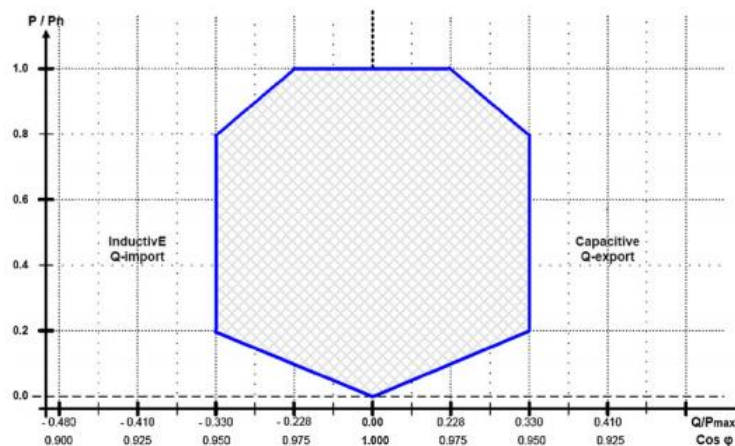
Σχήμα 1.7.1.2.9 Ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας [5].

Επιλέον, για τις περιπτώσεις πτώσης τάσης προβλέπεται η υποστήριξη του συστήματος μέσω έγχυσης αέργου ισχύος, η οποία φαίνεται παρακάτω σχηματικά.



Σχήμα 1.7.1.2.10 Απαίτηση υποστήριξης αέργου ισχύος [5].

Προφανώς, βέβαια, κατά την έγχυση αέργου ισχύος πρέπει να πληρούνται κάποιες προδιαγραφές για το συντελεστή ισχύος, ώστε να μην ξεπερνάει συγκεκριμένα όρια. Αυτή η απαίτηση διατυπώνεται στο ακόλουθο διάγραμμα:



Σχήμα 1.7.1.2.11 Απαίτηση αέργου ισχύος και συντελεστού ισχύος [5].

1.7.1.3 Επιλογή των κανονισμών που θα ληφθούν υπ' όψιν

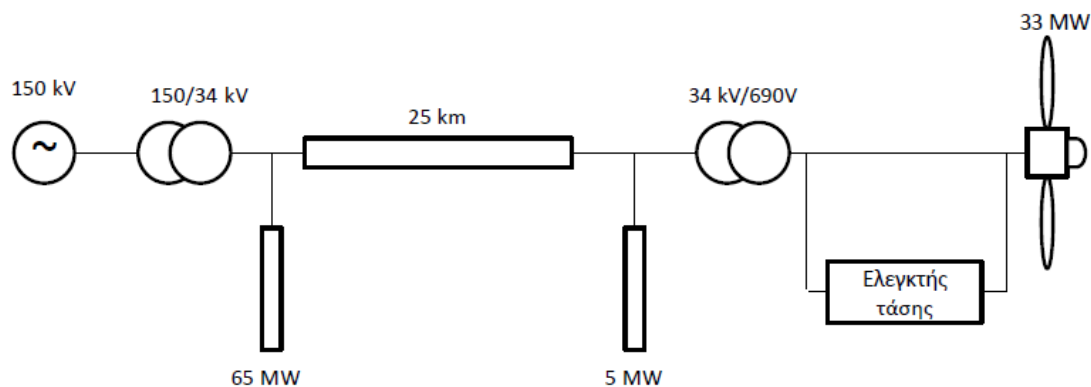
Η αναφορά στους παραπάνω κανονισμούς κάθε άλλο παρά τυχαία ήταν. Η Ιρλανδία επιλέχθηκε καθώς είναι μια χώρα με μεγάλες προοπτικές στην εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας και παράλληλα είναι ένα νησιωτικό σύστημα (άρα υψηλού ενδιαφέροντος), ενώ η Γερμανία είναι μια χώρα με μεγάλη διείσδυση αιολικής ενέργειας. Ακόμη, οι σκανδιναβικές χώρες έχουν το πλεονέκτημα υψηλών αιολικών δυναμικών και για το λόγο αυτό αναπτύσσονται ραγδαία στο χώρο της αιολικής ενέργειας. Τέλος, η Ελλάδα είναι μια χώρα, η οποία θα μπορούσε να βασιστεί σε μεγάλο βαθμό στην αιολική ενέργεια για κάλυψη σημαντικού ποσοστού των ενεργειακών αναγκών της. Για το λόγο αυτό και δεδομένου ότι παρατηρούνται κοινά σημεία στις ελληνικές τεχνικές απαιτήσεις με αυτές άλλων χωρών, θα ληφθούν υπ' όψιν οι ελληνικοί κανονισμοί όπου αυτό απαιτηθεί στην υπόλοιπη εργασία.

2 Μοντελοποίηση Α/Γ και αιολικού πάρκου

2.1 Δυναμικό μοντέλο αιολικού πάρκου

Γενική περιγραφή συστήματος

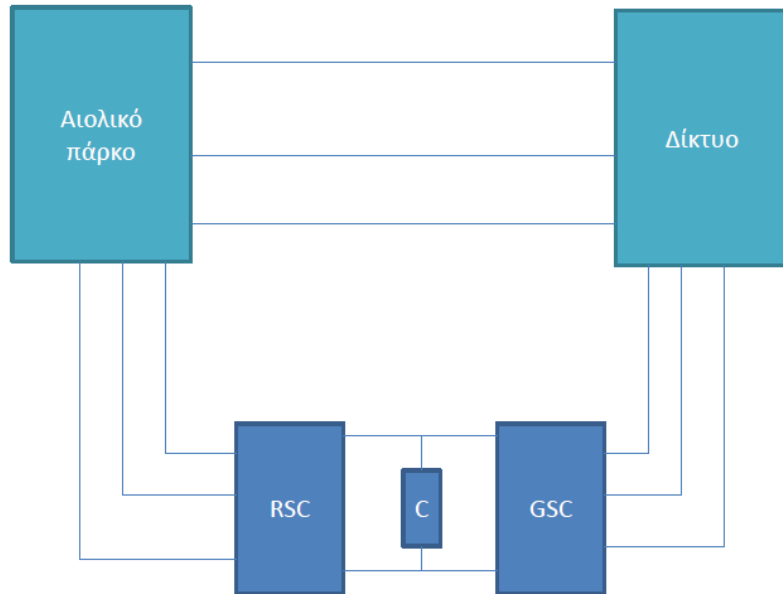
Το σύστημα της παρούσας εργασίας προσομοιώνει ένα αιολικό πάρκο συνολικής ισχύος 33 MW (12 Α/Γ*2.75 MW) συνδεδεμένο στη χαμηλή τάση ενός δικτύου. Το μοντέλο, που περιλαμβάνει τις Α/Γ, τους τριφασικούς μετασχηματιστές, τους μετατροπείς, τα καλώδια και τον υποσταθμό υψηλής τάσης, φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 2.1.1 Υπό μελέτη σύστημα στο περιβάλλον Matlab/Simulink

Όπως φαίνεται, το μοντέλο συνδέει τις Α/Γ μέσω μετασχηματιστή στη μέση τάση(34kV) και στη συνέχεια χρησιμοποιεί γραμμή συνολικού μήκους 25 km για τη σύνδεση του στον υποσταθμό υψηλής τάσης (150kV).

Στις επόμενες ενότητες θα περιγραφούν αναλυτικά όλα τα υποσυστήματα της ανεμογεννήτριας (μηχανικό και ηλεκτρικό μέρος) μαζί με το μετατροπέα και τους ελεγκτές αυτού. Να σημειωθεί ότι το μοντέλο είναι πραγματικού και διακριτού χρόνου, δηλαδή μελετώνται σε αυτό οι στιγμιαίες τιμές και όχι μόνο οι μέσες επιτρέποντας τη λειτουργία των συγκεκριμένων ελεγκτών. Το σύστημα προσομοίωσης παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.1.2 Σύστημα προσομοίωσης αιολικού πάρκου συνδεδεμένου στο δίκτυο με back – to – back μετατροπέα.

2.2 Αεροδυναμικό μέρος ανεμογεννήτριας

Η παρακάτω ιδιαίτερα γνωστή μαθηματική εξίσωση δίνει τη σχέση ανάμεσα στην ταχύτητα του ανέμου και τη μηχανική ενέργεια:

$$P_{wt} = \frac{\rho}{2} A_{wt} C_p(\lambda, \theta) V_w^3 \quad (2.1)$$

όπου P_{wt} η μηχανική ενέργεια ύστερα από μετατροπή της αντίστοιχης κινητικής του ανέμου, ρ η πυκνότητα του αέρα, C_p ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος, λ ο λόγος ταχύτητας ακροπερυγίου, θ η γωνία βήματος, A_{wt} η επιφάνεια που καλύπτεται από την περιστροφή των ακροπερυγίων.

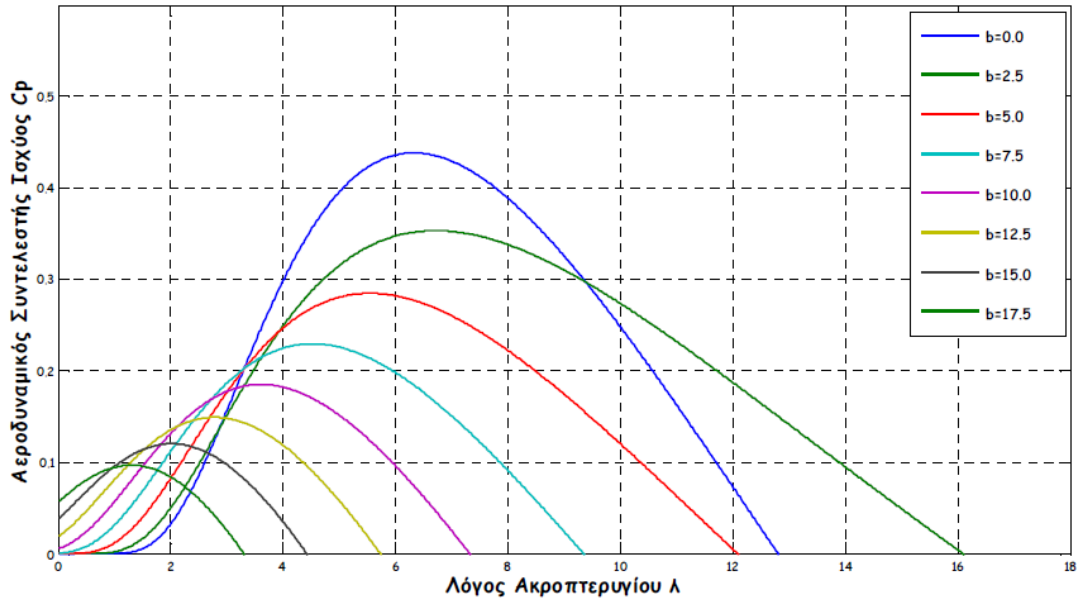
Για τον αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος να αναφέρουμε ότι, όπως φαίνεται άλλωστε, είναι συνάρτηση των λ, θ και για κάθε ταχύτητα ανέμου πρέπει η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα να παίρνει τιμές που βελτιστοποιούν τα λ, θ ώστε να έχουμε μέγιστη παραγωγή ισχύος από την ανεμογεννήτρια. Για δεδομένες τιμές των λ, θ ο C_p υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον παρακάτω προσεγγιστικό τύπο:

$$C_p(\lambda, \theta) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} 0.4\theta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (2.2)$$

όπου για το λ_i ισχύει η σχέση

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\theta} - \frac{0.035}{\theta^3 + 1} \quad (2.3)$$

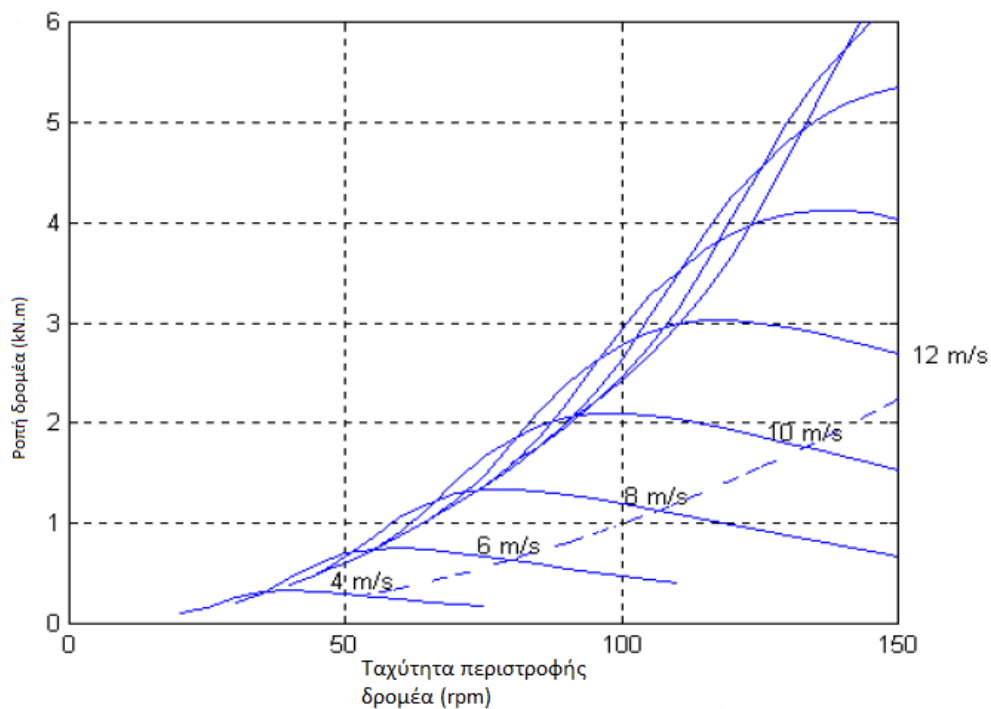
Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις αυτές μπορούμε να κατασκευάσουμε το διάγραμμα του λόγου ταχύτητας ακροπερυγίου λ με το συντελεστή ισχύος C_p για διάφορες τιμές του β .



Σχήμα 2.2.1 Διάγραμμα λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου λ με το συντελεστή ισχύος C_p για διάφορες τιμές του β [22].

Εύκολα παρατηρεί κανείς ότι η μέγιστη τιμή του συντελεστή προκύπτει για $\beta=0$ και είναι ίση με $C_{p,opt}=0.4382$. Εδώ αξίζει να αναφερθεί ότι η τιμή αυτή απέχει από τη μέγιστη θεωρητική, η οποία είναι ίση με $C_{p,max}=0.593$ (γνωστή και ως όριο του Betz).

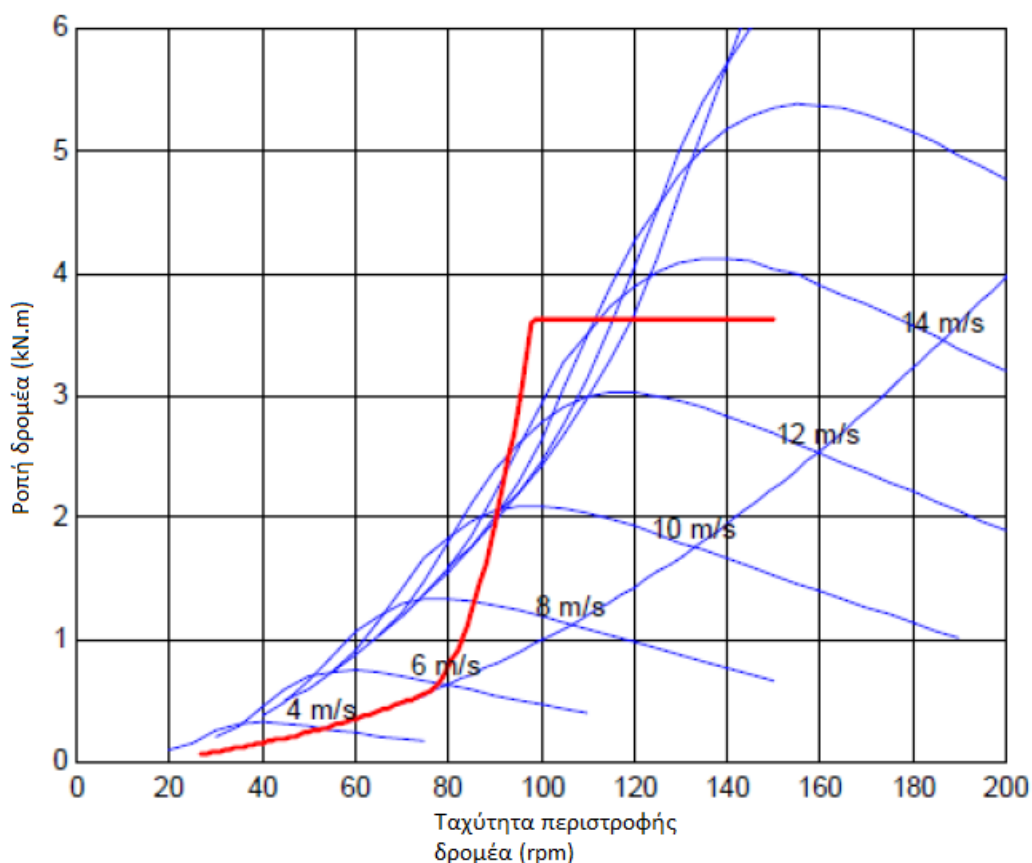
Με βάση όσα παρουσιάστηκαν μέχρι τώρα σημαντικό είναι να αναφερθούν οι χαρακτηριστικές ροπές – στρωφών (αντίστοιχα ισχύος-στρωφών καθώς $P_m=T_m\omega R$), οι οποίες προκύπτουν για βέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος και διάφορες ταχύτητες περιστροφής δρομέα.



Σχήμα 2.2.2 Οι αεροδυναμικές καμπύλες και η βέλτιστη καμπύλη αυτών για χαμηλές ισχύεις(ιδανική) [9].

Στην παραπάνω ιδανική καμπύλη η μέγιστη ισχύς εμφανίζεται στα σημεία όπου το γινόμενο της ροπής με τις στροφές γίνεται μέγιστο. Συνεπώς, τα σημεία αυτά δίνουν τη βέλτιστη καμπύλη ροπής-στροφών (διακεκομμένη γραμμή). Η καμπύλη αυτή έχει εφαρμογή στις χαμηλές ισχύεις ,όπου δεν υπάρχει ανάγκη προστασίας του συστήματος.

Αντίθετα, στις υψηλές ισχύεις εφαρμόζεται μια άλλη καμπύλη λόγω της ανάγκης του συστήματος για περιορισμό των στροφών, ώστε να μην υπάρχει επιτάχυνση αυτού. Έτσι, ακολουθείται η κόκκινη χαρακτηριστική του επόμενου σχήματος, η οποία αποτελείται από το 1^ο τμήμα με χαμηλή κλίση και λειτουργία στη βέλτιστη παραγωγή ισχύος και το 2^ο με μεγάλη κλίση και λειτουργία σε στροφές λιγότερες από τις ονομαστικές.



Σχήμα 2.2.3 Οι αεροδυναμικές καμπύλες και η βέλτιστη καμπύλη αυτών για υψηλές ισχύεις(μη ιδανική) [9].

2.2.1 Μοντελοποίηση αεροδυναμικού μέρους

Χρησιμοποιώντας τις προαναφερθείσες εξισώσεις δύναται κανείς να κατασκευάσει το παρακάτω μοντέλο.



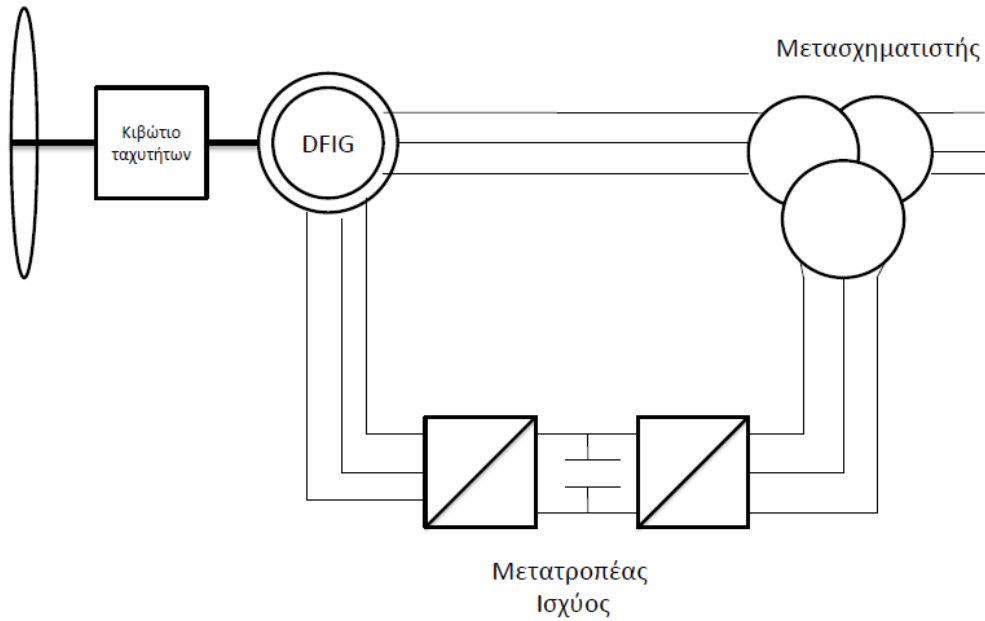
Σχήμα 2.2.1.1 Μοντελοποίηση αεροδυναμικού μέρους

Εισόδους στο μοντέλο αποτελούν η ταχύτητα του ανέμου και η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής. Χρησιμοποιώντας τις τιμές αυτές υπολογίζεται η τιμή της ταχύτητας ακροπερυγίου λ και εν συνεχεία ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος. Τέλος, υπολογίζεται η αεροδυναμική ισχύς της μηχανής και άρα η ροπή, που αποτελεί και την έξοδο αυτού του υποσυστήματος.

2.3 Ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης

Η ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης χρησιμοποιεί μηχανή με δακτυλιοφόρο δρομέα (συνδέεται ηλεκτρικά με το περιβάλλον με αντιστάσεις διαμέσου δακτυλίων ολίσθησης και ψυκτρών), όπου τα τυλίγματα του δρομέα είναι συνδεδεμένα σε έναν ac/dc/ac μετατροπέα ισχύος με μεταβλητή συχνότητα. Η γωνιακή ταχύτητα είναι ανάλογη της διαφοράς της συχνότητας του στάτη ($f_{\text{δίκτυου}}$) και της συχνότητας του δρομέα ($f_{\text{μετατροπέα}}$). Άρα, λοιπόν, το εύρος της ταχύτητας σχετίζεται με το μέγεθος του μετατροπέα, το οποίο έχει τυπική τιμή στο 30% της ονομαστικής ισχύος της γεννήτριας. Φυσικά, ο όρος «διπλή τροφοδότηση» αναφέρεται στο γεγονός ότι η τάση στο στάτη εφαρμόζεται από το δίκτυο και η τάση στο δρομέα από το μετατροπέα ισχύος. Στο σύστημα αυτό, τόσο στη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας όσο και κατά τη διάρκεια σφαλμάτων οι αποκρίσεις της γεννήτριας καθορίζονται από το μετατροπέα και τους ελεγκτές του.

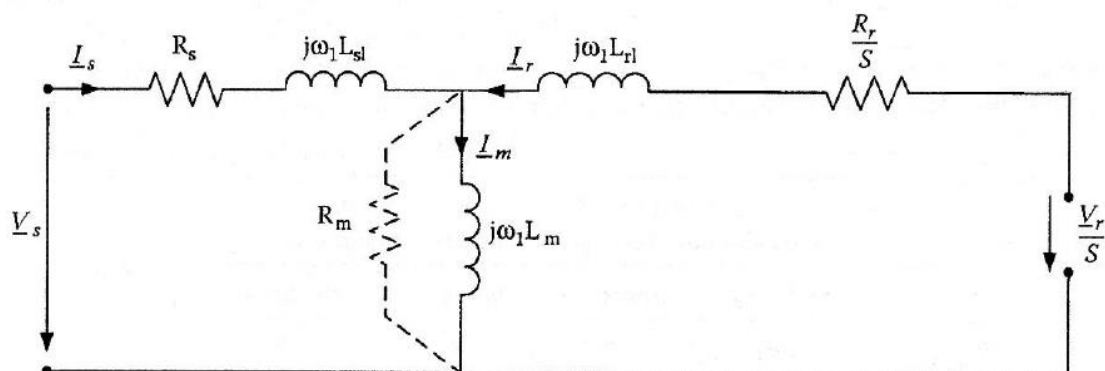
Ένα σχηματικό παράδειγμα της ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 2.3.1 Σχηματικό παράδειγμα της Α/Γ, που χρησιμοποιείται στην εργασία αυτή

Το σύστημα αυτό συγκεντρώνει πληθώρα πλεονεκτημάτων. Αρχικά, έχει γίνει ιδιαίτερα δημοφιλές τα τελευταία χρόνια, καθώς ο μετατροπέας χειρίζεται ένα μόνο κλάσμα (περίπου 30%) της συνολικής ισχύος. Σαν αποτέλεσμα, ο μετατροπέας είναι μικρότερου μεγέθους και έτσι οι απώλειες και το κόστος μειώνονται κατά πολύ σε σύγκριση με ένα σύστημα που χειρίζεται το σύνολο της ισχύος. Επιπλέον, έχει την ικανότητα ανεξάρτητου ελέγχου της ενεργού και αέργου ισχύος μέσω του ρεύματος του δρομέα. Ακόμη, η DFIG μπορεί να παράγει άεργο ισχύ, η οποία διαμοιράζεται στο στάτη μέσω του grid side converter. Γενικά, όμως, ο grid side converter λειτουργεί σε μοναδιαίο συντελεστή ισχύος και δεν περιλαμβάνεται στην άεργο ισχύ που ανταλλάσσεται ανάμεσα στην Α/Γ και το δίκτυο. Τέλος, στην περίπτωση σύνδεσης με ασθενές δίκτυο η γεννήτρια διπλής τροφοδότησης ρυθμίζεται ώστε να παράγει άεργο ισχύ και με τον τρόπο αυτό παίρνει μέρος στον έλεγχο της τάσης.

Το ισοδύναμο κύκλωμα της DFIG, λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες μαγνήτισης, είναι το εξής:



Σχήμα 2.3.2 Ισοδύναμο κύκλωμα ασύγχρονης γεννήτριας διπλής τροφοδότησης

Να σημειωθεί ότι στην ανάλυση, που θα γίνει παρακάτω, αγνοούνται οι απώλειες πυρήνα. Επιπλέον, παρατηρείται ότι από το παραπάνω κύκλωμα αγνοώντας την R_m και

βραχυκυκλώνοντας το δρομέα προκύπτει $V_r=0$ και άρα έχουμε το ισοδύναμο κύκλωμα ασύγχρονης γεννήτριας βραχυκυκλωμένου δρομέα.

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τα κυκλώματα του στάτη και του δρομέα είναι οι παρακάτω:

$$(R_s + j\omega_1 L_{s1})\bar{I}_s - \bar{V}_s = \bar{E}_1 \quad (2.4) \text{ για ταχύτητα } \omega_1$$

$$(R_r + js\omega_1 L_{r1})\bar{I}_r - \bar{V}_r = \bar{E}_2 \quad (2.5) \text{ για ταχύτητα } \omega_2 = s\omega_1$$

Πολλαπλασιάζοντας τη δεύτερη εξίσωση με το λόγο τυλιγμάτων στάτη-δρομέα K_{sr} προκύπτει:

$$(R_r + js\omega_1 L_{r1})\bar{I}_r - \bar{V}_r = \frac{\bar{E}_2}{K_{sr}} \quad (2.6) \text{ όπου } R_s - \text{αντίσταση στάτη}$$

R_r - αντίσταση δρομέα

L_{s1} - αυτεπαγωγή σκέδασης στάτη

L_{r1} - αυτεπαγωγή σκέδασης δρομέα

L_m - αυτεπαγωγή μαγνήτισης

Χρησιμοποιώντας τις παρακάτω σχέσεις:

$$\bar{E}_2 = s\bar{E}_1 K_{sr} \quad (2.7)$$

$$R_r = R_r^r K_{sr}^2 \quad (2.8)$$

$$L_{r1} = L_{r1}^r K_{sr}^2 \quad (2.9)$$

$$\bar{V}_r = \bar{V}_r^r K_{sr} \quad (2.10)$$

$$\bar{I}_r = \frac{\bar{I}_r^r}{K_{sr}} \quad (2.11)$$

και διαιρώντας τη σχέση 2.6 με την ολίσηση s παίρνουμε:

$$\left(\frac{R_s}{s} + j\omega_1 L_{r1}\right)\bar{I}_r - \frac{\bar{V}_r}{s} = \frac{s\bar{E}_1}{s} = \bar{E}_1 \quad (2.12)$$

Με τον τρόπο αυτό τα μεγέθη του δρομέα έχουν αναχθεί στο πεδίο του στάτη. Τέλος, η ΗΕΔ E_1 μπορεί πλέον να προκύψει από το διανυσματικό άθροισμα των ρευμάτων I_s και I_r ως εξής:

$$E_1 = -j\omega_1 L_m (\bar{I}_s + \bar{I}_r) = -j\omega_1 L_m \bar{I}_m \quad (2.13)$$

Επομένως, οι τελικές εξισώσεις είναι:

$$V_s = R_s \bar{I}_s + j\omega_1 L_{s1} \bar{I}_s + j\omega_1 L_m \bar{I}_m \quad (2.14)$$

$$\frac{\bar{V}_r}{s} = \frac{R_s}{s} \bar{I}_r + j\omega_1 L_{r1} \bar{I}_r + j\omega_1 L_m \bar{I}_m \quad (2.15)$$

Οι εξισώσεις των ροών διακένου ορίζονται ως εξής:

$$\lambda_m = L_m (\bar{I}_s + \bar{I}_r) \quad (2.16)$$

$$\lambda_s = L_s \bar{I}_s + L_m \bar{I}_r \quad (2.17)$$

$$\lambda_r = L_r \bar{I}_r + L_m \bar{I}_s \quad (2.18)$$

Με $L_s = L_{s1} + L_m$ και $L_r = L_{r1} + L_m$ προκύπτει από τα παράπανω ζεύγη εξισώσεων:

$$V_s = R_s \bar{I}_s + j\omega_1 \lambda_s \quad (2.19)$$

$$\frac{\bar{V}_r}{s} = \frac{R_s}{s} \bar{I}_r + j\omega_1 \lambda_r \quad (2.20)$$

Ακόμη, η συνολική ενεργός ισχύς της μηχανής είναι:

$$P_s + P_r = 3\text{Re}(\bar{V}_s \bar{I}_s^*) + 3\text{Re}(\bar{V}_r \bar{I}_r^*) \quad (2.21)$$

και η συνολική άεργος ισχύς της είναι:

$$Q_s + Q_r = 3\text{Im}(\bar{V}_s \bar{I}_s^*) + 3\text{Re}\left(\frac{\bar{V}_r \bar{I}_r^*}{s}\right) = 3\omega_1 (L_{s1} I_s^2 + L_{r1} I_r^2 + L_m I_m^2) \quad (2.22)$$

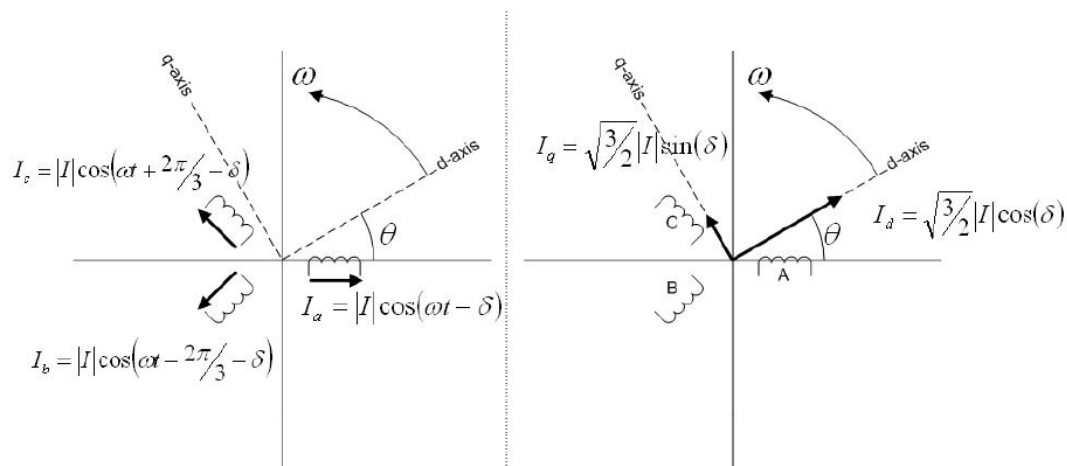
Στο σημείο αυτό παρατηρούμε από την έκφραση της άεργου ισχύος ότι ο μαγνητισμός της γεννήτριας γίνεται τόσο από το στάτη όσο και από το δρομέα, όπως υποστηρίξαμε νωρίτερα.

2.3.1 Μοντελοποίηση ασύγχρονης γεννήτριας διπλής τροφοδότησης

Η μοντελοποίηση της γεννήτριας υλοποιήθηκε στο Matlab/Simulink και αφορά στη λειτουργία της γεννήτριας με τη βοήθεια ενός d-q πλαισίου (αγνοώντας τη συνιστώσα μηδενικής ακολουθίας).

Οι εξισώσεις που περιγράφουν το μοντέλο είναι οι παρακάτω:

$$\begin{bmatrix} V_q \\ V_d \\ V_o \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 120) & \cos(\theta + 120) \\ \sin\theta & \sin(\theta - 120) & \sin(\theta + 120) \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$



Σχήμα 2.3.1.1 Μετασχηματισμός από το abc στο dq και αντίστροφα

Κατά τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η ανάλυση του πραγματικού τριφασικού συστήματος σε δύο άξονες, d και q, κάθετους μεταξύ τους. Ο τρίτος άξονας, 0, παραλείπεται συνήθως στο διανυσματικό έλεγχο, αφού στη συμμετρική λειτουργία έχει μηδενικές τιμές.

Οι τάσεις, λοιπόν, στο d – q πλαίσιο περιγράφονται από τις σχέσεις:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \psi_{ds} - \omega_e \psi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \psi_{qs} - \omega_e \psi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \psi_{dr} - (\omega_e - \omega_r) \psi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \psi_{qr} - (\omega_e - \omega_r) \psi_{dr} \end{cases} \quad (2.24)$$

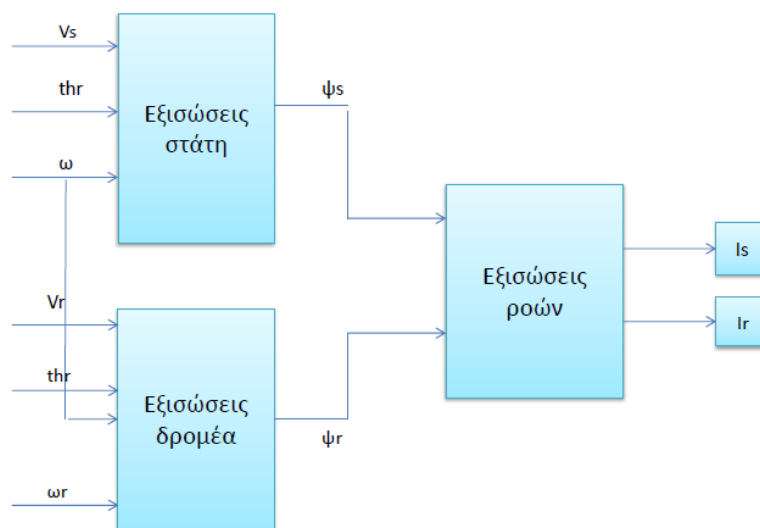
όπου

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \psi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \psi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \psi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (2.25)$$

Επιπλέον, οι σχέσεις ρευμάτων-τάσεων είναι:

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_{qr} \\ V_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + SL_s & \omega_e L_s & SL_m & \omega_e L_m \\ -\omega_e L_s & R_s + SL_s & -\omega_e L_m & SL_m \\ SL_m & (\omega_e - \omega_r) L_m & R_r + SL_r & (\omega_e - \omega_r) L_r \\ -(\omega_e - \omega_r) L_m & SL_m & -(\omega_e - \omega_r) L_r & R_r + SL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{qs} \\ I_{ds} \\ I_{qr} \\ I_{dr} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Τέλος, η ροπή υπολογίζεται με τη βοήθεια της εξίσωσης $T_e = -P \frac{M}{L_s} (\psi_{qs} I_{dr} - \psi_{ds} I_{qr})$ (2.27), όπου P είναι ο αριθμός των πόλων.

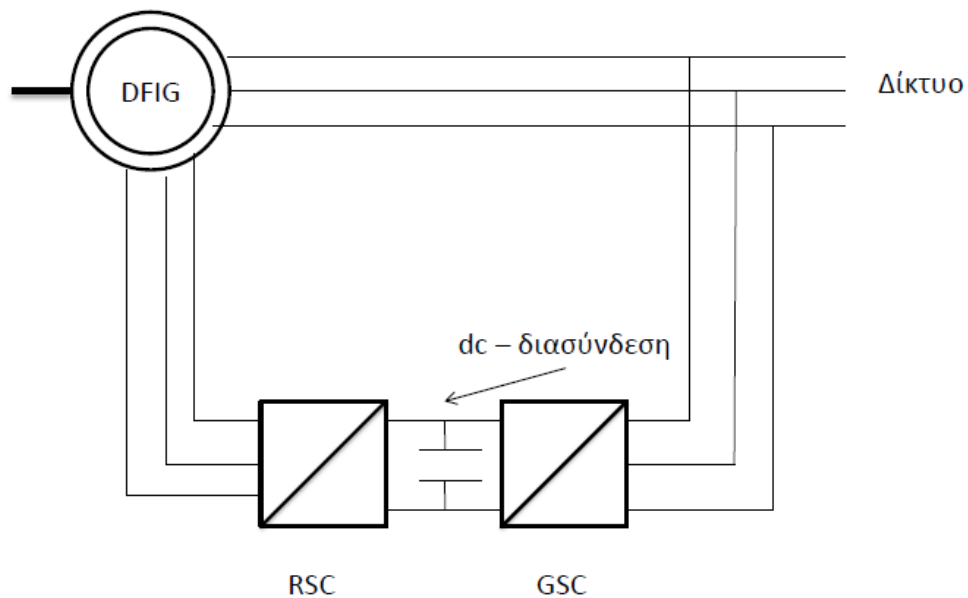


Σχήμα 2.3.1.2 Ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης

2.4 Μετατροπέας back – to – back

Ο back – to – back μετατροπέας αποτελείται από ένα μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα (rotor side converter) κι ένα μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου (grid side converter), οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι πλάτη – με – πλάτη (back – to – back). Επίσης, ανάμεσα στους μετατροπείς υπάρχει ένας dc – πυκνωτής με στόχο να κρατάει σε χαμηλά επίπεδα τις μεταβολές της τάσης στη dc-διασύνδεση. Με τον rotor side converter επιτυγχάνουμε τον ανεξάρτητο έλεγχο της ενεργού και της αέργου ισχύος, ενώ με τον grid side converter εξασφαλίζεται η λειτουργία με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, δηλαδή έχουμε μηδενική άεργο ισχύ (λόγω σταθερής τάσης στη dc-διασύνδεση).

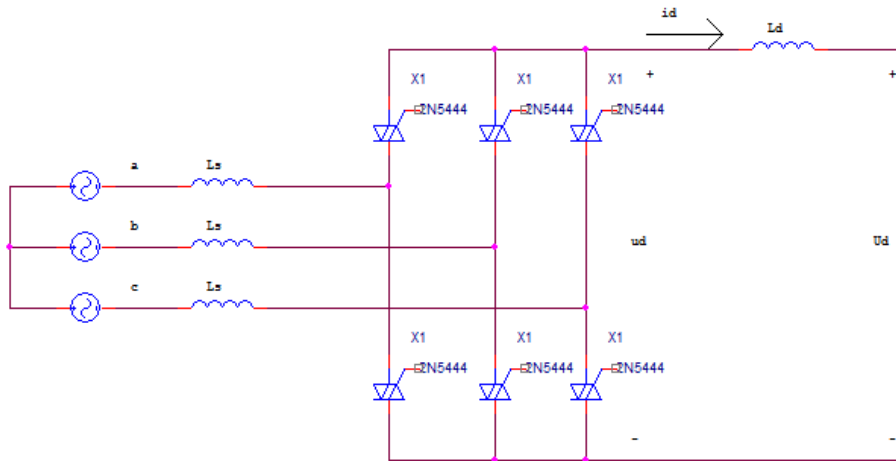
Το πλεονέκτημα του μετατροπέα αυτού είναι η αμφίδρομη ροή ισχύος, δηλαδή το γεγονός ότι σε μια υπερσύγχρονη κατάσταση η ροή ρέει από το δρομέα προς το δίκτυο, ενώ σε μια υποσύγχρονη κατάσταση έχουμε ροή προς την αντίθετη κατεύθυνση. Να σημειωθεί ότι και στις δύο περιπτώσεις ο στάτης τροφοδοτεί το δίκτυο με ενέργεια.



Σχήμα 2.4.1 Σχηματική παράσταση ενός back – to – back μετατροπέα συνδεδεμένο σε μια DFIG

2.4.1 Τριφασική ανορθωτική γέφυρα

Η τριφασική ανορθωτική γέφυρα παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.



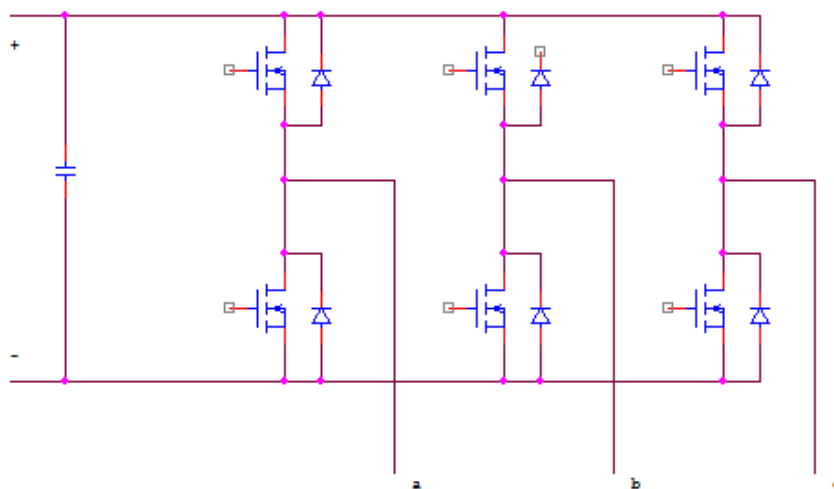
Σχήμα 2.4.1.1 Τριφασική ανορθωτική γέφυρα

Τα θυρίστορ του κυκλώματος έχουν αριθμηθεί σύμφωνα με τη σειρά αγωγής τους. Τα θυρίστορ D_1, D_3 και D_5 χρησιμοποιούνται για την ανόρθωση του θετικού μέρους των πηγών εισόδου της ανόρθωσης και τα θυρίστορ D_4, D_6 και D_2 για την ανόρθωση του αρνητικού μέρους. Αξίζει να σημειωθεί ότι η τάση εξόδου έχει έξι παλμούς για κάθε κύκλο λειτουργίας.

Ακόμη, η μέση τιμή της τάσης εξόδου δίνεται από την σχέση $V_{dc} = \frac{3\sqrt{6}V_m}{\pi} \cos\alpha$ (2.28) όπου V_m = rms τιμή της τάσης εισόδου και α =γωνία έναυσης.

2.4.2 Τριφασικός αντιστροφέας πηγής τάσης

Η τοπολογία ενός τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης είναι η ακόλουθη.



Σχήμα 2.4.2.1 Τριφασικός αντιστροφέας πηγής τάσης

Στην περίπτωση του αντιστροφέα θεωρείται ότι τα IGBT χρησιμοποιούνται ως διακόπτες που βρίσκονται είτε σε κατάσταση αγωγής είτε σε κατάσταση αποκοπής. Επίσης, οι διόδοι χρησιμοποιούνται ως ασφάλειες, καθώς υπάρχουν περιπτώσεις όπου εμφανίζεται ρεύμα αντίθετης φοράς από το ρεύμα των IGBT, το οποίο διοχετεύεται σε αυτές.

Η λειτουργία του αντιστροφέα για μια περίοδο της τάσης εξόδου διαιρείται σε έξι διαστήματα, σε καθένα από τα οποία άγουν δύο μόνο από τους διακόπτες. Κατά τον τρόπο αυτό συνδέεται η dc τάση εισόδου στα άκρα του φορτίου και δημιουργείται ένας θετικός παλμός τάσης με πλάτος V και εύρος ίσο με τη χρονική διάρκεια αγωγής των διακοπών. Η τάση εξόδου του αντιστροφέα αποτελείται από τη βασική αρμονική συνιστώσα και ανώτερες αρμονικές των οποίων οι συχνότητες βρίσκονται πλησίον της βασικής αρμονικής συνιστώσας. Η εξάλειψη ή η μείωση αυτών των ανώτερων αρμονικών επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση ενός φίλτρου μεταξύ της εξόδου του αντιστροφέα και του φορτίου. Το μέγεθος, το βάρος και το κόστος του εξαρτώνται από το πλάτος και τη συχνότητα της βασικής αρμονικής συνιστώσας και μπορούν να ελαττωθούν κατά πολύ με την τεχνική της ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών (SPWM).

Σύμφωνα με την SPWM τεχνική, για τον τριφασικό αντιστροφέα χρησιμοποιούνται τρεις ημιτονοειδείς κυματομορφές αναφοράς και μια τριγωνική κυματομορφή φορέα. Το πλάτος της κυματομορφής αναφοράς είναι μεταβλητό σε σχέση με το πλάτος της κυματομορφής φορέα, το οποίο παραμένει σταθερό. Τα σημεία τομής μεταξύ των κυματομορφών αναφοράς και της κυματομορφής φορέα ορίζουν τις κυματομορφές των παλμών έναυσης των IGBTs του αντιστροφέα.

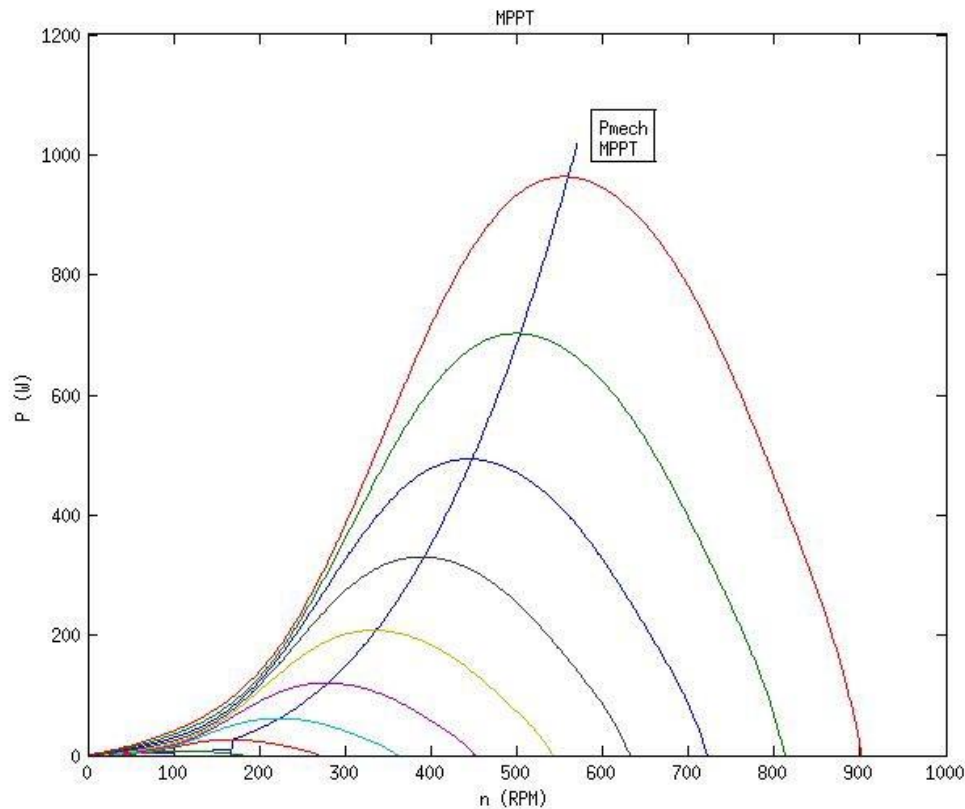
Επί της ουσίας με την τεχνική SPWM επιτυγχάνεται τη μετατόπιση της επικρατούσας ανώτερης αρμονικής σε υψηλότερη συχνότητα από αυτή της βασικής αρμονικής. Το πλάτος και η τάξη της επικρατούσας αρμονικής είναι:

$$\begin{cases} V_{AB} = 0.27V_{dc} \\ d = F_{nc} - 2 \\ F_{nc} = \frac{F_c}{F_r} \end{cases} \quad (2.29)$$

όπου F_{nc} είναι η ανηγμένη συχνότητα του φορέα και V_{dc} η τάση εισόδου του αντιστροφέα, δηλαδή η τάση της dc διασύνδεσης.

2.5 Σύστημα ελέγχου παρακολούθησης του σημείου παροχής μέγιστης ισχύος

Μία από τις λειτουργίες του συστήματος είναι η δυνατότητα ανεύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος (maximum power point tracking-MPPT), που γίνεται μέσω των ελεγκτών, οι οποίοι ρυθμίζουν τις στροφές της Α/Γ. Παρακάτω παρουσιάζεται η ιδανική καμπύλη που θα πρέπει να ακολουθεί το σύστημα.



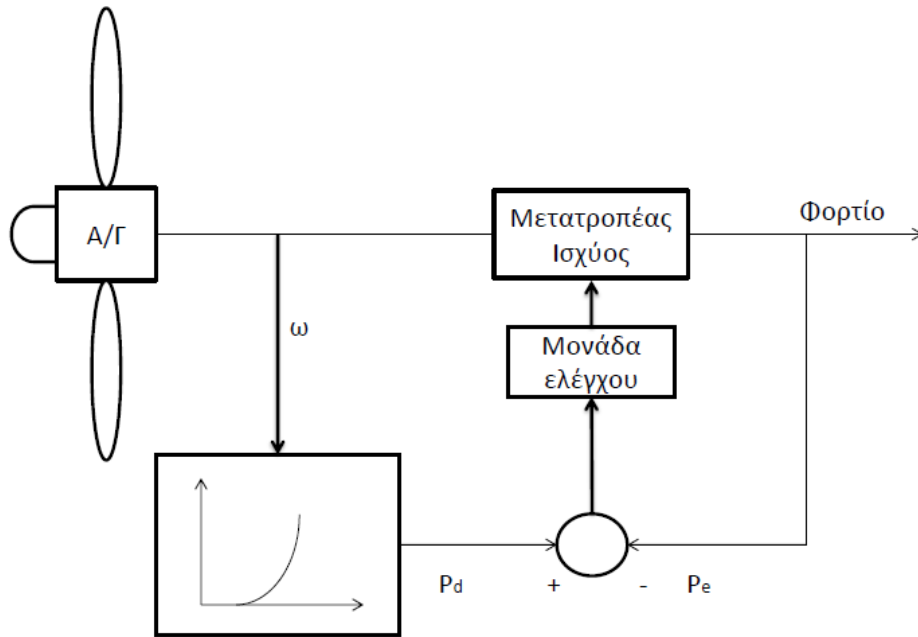
Σχήμα 2.5.1 Ιδανική αεροδυναμική καμπύλη [3].

Ο ελεγκτής αυτός προβαίνει σε έλεγχο των στροφών της ανεμογεννήτριας, ώστε το σύστημα να λειτουργεί για κάθε ταχύτητα ανέμου στο $C_{p,max}$. Κατά τον τρόπο αυτό ο ελεγκτής οδηγεί το σύστημα επάνω στην καμπύλη P_{mech} .

Η Α/Γ απορροφά τη μέγιστη αιολική ισχύ σε δεδομένη ταχύτητα ανέμου αν και μόνο αν το γινόμενο ροπής-στροφών μεγιστοποιείται. Όλα αυτά τα σημεία είναι που αποτελούν την ιδανική καμπύλη, στην οποία ο ελεγκτής οδηγεί τη λειτουργία της Α/Γ.

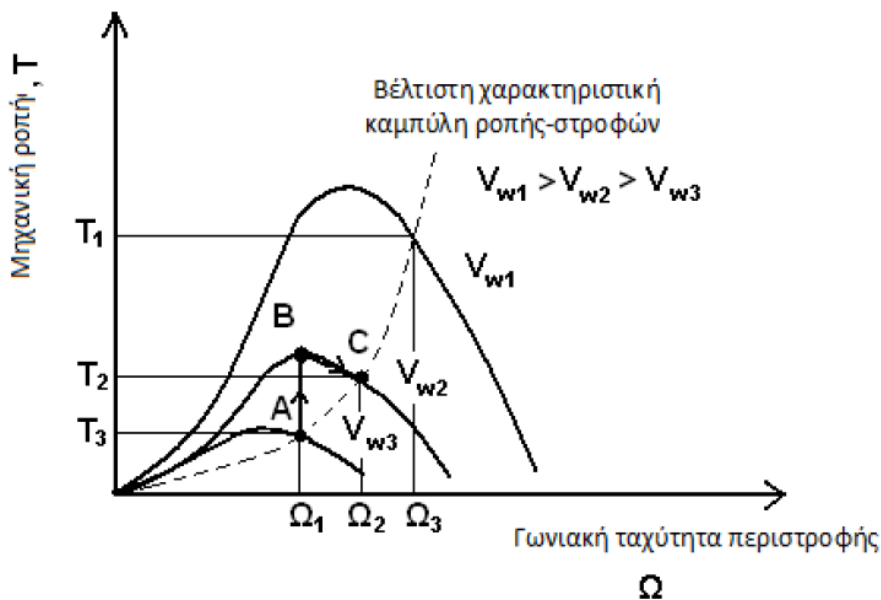
Ο MPPT ελεγκτής λειτουργεί ελέγχοντας τις στροφές της Α/Γ, έτσι ώστε για κάθε ταχύτητα ανέμου το σύστημα να έχει το μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή $C_{p,max}$ κοντά στο 0.5. Άρα, λοιπόν, για κάθε διαφορετική ταχύτητα ανέμου (δηλαδή για σημεία αριστερά ή δεξιά της καμπύλης μέγιστης ισχύος) ο ελεγκτής αναλαμβάνει δράση και οδηγεί το σύστημα σε σημεία επάνω στη μέγιστη καμπύλη.

Πιο αναλυτικά, η λειτουργία του συστήματος βασίζεται στη δεδομένη χαρακτηριστική καμπύλη. Σχηματικά, η εν λόγω λειτουργία φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 2.5.2 Λειτουργία MPPT ελέγχου βασισμένη σε δεδομένη χαρακτηριστική καμπύλη

Για την επίτευξη του στόχου, σε κάθε χρονική στιγμή το σύστημα «βλέπει» την ενεργό ισχύ και την αντιστοιχίζει μέσω της χαρακτηριστικής καμπύλης σε δεδομένη ταχύτητα περιστροφής. Στη συνέχεια, ο ελεγκτής αναλαμβάνει δράση και δίνει εντολή για ταχύτητα περιστροφής, που εξασφαλίζει μέγιστη τιμή ροπής στο σύστημα. Για να γίνει πιο κατανοητή η διαδικασία αναφέρουμε ένα παράδειγμα.

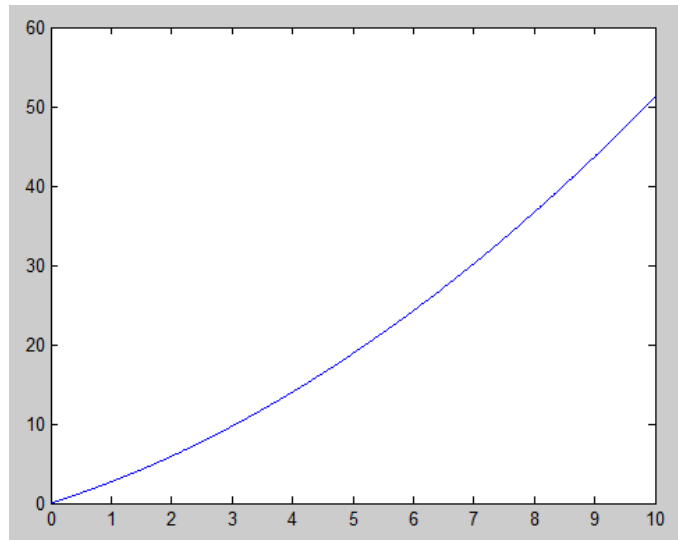


Σχήμα 2.5.3 Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής – στροφών – Παράδειγμα MPPT λειτουργίας [9].

Έστω πως ο άνεμος πνέει με ταχύτητα V_{w3} και η ροπή της γεννήτριας T_g ισορροπεί με αυτή του κινητήρα T_m στο σημείο A. Σε κάποια χρονική στιγμή ο άνεμος αλλάζει την ταχύτητα του σε V_{w2} και η T_m περνάει στο σημείο B, αλλά η T_g διατηρείται στο σημείο A. Η ταχύτητα

της γεννήτριας αυξάνεται σύμφωνα με τη διαφορά ($T_m - T_g$) μέχρις ότου οι δύο ροπές γίνουν ίσες. Ο έλεγχος βέλτιστης ροπής φροντίζει να προσαρμόσει το φορτίο της γεννήτριας έτσι ώστε η T_g να ακολουθήσει τη χαρακτηριστική βέλτιστης ροπής μέχρις ότου επέλθει νέα ισορροπία του συστήματος στο σημείο C.

Η καμπύλη που χρησιμοποιήθηκε στο προσομοιωμένο μοντέλο είναι η παρακάτω:



Σχήμα 2.5.4 Δεδομένη χαρακτηριστική καμπύλη που εισήχθη στο μοντέλο μας

3 *Σύστημα ελέγχου*

3.1 Γενική περιγραφή του συστήματος

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η DFIG συνδέεται από την πλευρά του δρομέα στο δίκτυο μέσω μετατροπέα ισχύος back – to – back. Ο μετατροπέας αυτός παρέχει τη δυνατότητα αμφίπλευρης ροής ισχύος και επί της ουσίας διαιρείται σε δύο μέρη, τον μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα (rotor side converter) και τον μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου (grid side converter). Να σημειωθεί ότι οι δύο υπομετατροπείς συνδέονται μέσω ενός πυκνωτή (dc – διασύνδεση), ο οποίος λειτουργεί σαν αποθήκη ενέργειας για να παραμένει σταθερή η τάση της συνεχούς σύνδεσης.

Ως προς τον έλεγχο, η ροή ισχύος ελέγχεται από τον αντιστροφέα, ώστε η τάση του πυκνωτή να διατηρείται σταθερή. Παράλληλα, ο ανορθωτής προβαίνει στον έλεγχο της ενεργού και αέργου ισχύος.

3.2 Διανυσματικός έλεγχος – Δυναμικές Εξισώσεις

Οι κλασσικοί στατικοί μετατροπείς επιτυγχάνουν έλεγχο της ταχύτητας των ηλεκτρικών μηχανών μέσω της συχνότητας και της τάσης ή του ρεύματος τροφοδοσίας. Ο έλεγχος αυτός είναι γνωστός ως βαθμωτός έλεγχος και είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός όταν δεν απασχολεί η δυναμική απόκριση. Ωστόσο, μειονέκτημα του ελέγχου αυτού είναι ότι η ροπή και η μαγνητική ροή ελέγχονται μέσω της τάσης ή του ρεύματος από κοινού χωρίς να υπάρχει η δυνατότητα ανεξάρτητου ελέγχου της ροπής από το πεδίο. Εφόσον, λοιπόν, δεν μπορούν να μεταβληθούν ξεχωριστά όπως απαιτεί σε κάθε χρονική στιγμή η δυναμική κατάσταση, αυτό οδηγεί σε αργή δυναμική απόκριση.

Αντίθετα με το βαθμωτό έλεγχο, ο διανυσματικός έλεγχος επιτρέπει την ξεχωριστή μεταβολή των δύο μεγεθών με αποτέλεσμα να έχει πολύ καλύτερη δυναμική απόκριση. Πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μηχανής είναι ότι ο έλεγχος της βασίζεται στην τεχνική του διανυσματικού ελέγχου και άρα επιτρέπει την απόζευξη ελέγχου ενεργού και αέργου ισχύος.

Ο διανυσματικός έλεγχος έχει τη βάση του στις μηχανές συνεχούς ρεύματος και αυτό γιατί σε μια τέτοια μηχανή το πεδίο του στάτη και του δρομέα είναι κάθετα μεταξύ τους. Σαν αποτέλεσμα, επιτρέπεται η απόζευξη του ελέγχου ενεργού και αέργου ισχύος. Αντιθέτως, στις ασύγχρονες μηχανές υπάρχει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα και η τεχνική του διανυσματικού ελέγχου δεν είναι άμεσα εφαρμόσιμη. Ωστόσο, προκειμένου να καταστεί εφικτή η χρήση του, χρησιμοποιείται ο μετασχηματισμός του Park, ο οποίος απλοποιεί τις εξισώσεις της μηχανής επαγωγής. Αυτό που επιτυγχάνει ο μετασχηματισμός είναι η διατήρηση της καθετότητας ανάμεσα στα πεδία στάτη και δρομέα προκειμένου να εμφανίζεται σταθερή ροή διακένου.

3.3 Η αναπαράσταση των δύο αξόνων

Στις ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσομένου ρεύματος όλα τα μεγέθη είναι χρονικά μεταβαλλόμενα και παρίστανται ως διανύσματα χώρου και χρόνου στο μιγαδικό επίπεδο. Τα διανύσματα αυτά μπορούν είτε να είναι στρεφόμενα είτε στατικά ανάλογα με το σύστημα αναφοράς αξόνων που χρησιμοποιείται. Για το λόγο αυτό, η αναπαράσταση των δύο αξόνων ή, όπως ευρύτερα είναι γνωστή, ο μετασχηματισμός Park είναι ιδιαίτερα χρήσιμος καθότι

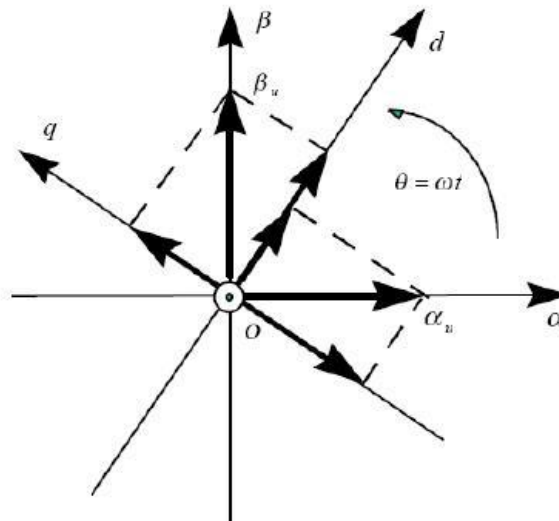
μετασχηματίζει το τριφασικό σύστημα σε διφασικό και επιπλέον όλα τα χρονικά μεταβαλλόμενα μεγέθη δύνανται να μετατραπούν σε χρονικά αμετάβλητα με την επιλογή κατάλληλου πλαισίου αναφοράς. Ο μετασχηματισμός Park γίνεται με τον πολλαπλασιασμό των εξισώσεων με τη μήτρα μετασχηματισμού:

$$\Pi = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 120) & \cos(\theta + 120) \\ \sin\theta & \sin(\theta - 120) & \sin(\theta + 120) \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

δηλαδή

$$\begin{bmatrix} V_q \\ V_d \\ V_o \end{bmatrix} = \Pi \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η ανάλυση του πραγματικού τριφασικού συστήματος σε δύο άξονες, d και q, κάθετους μεταξύ τους. Επίσης, προκύπτει και ένας τρίτος άξονας, 0, γνωστός ως ομοπολική συνιστώσα ή συνιστώσα μηδενικής ακολουθίας, ο οποίος για συμμετρική λειτουργία έχει μηδενική τιμή και έτσι παραλείπεται συνήθως από το διανυσματικό έλεγχο. Ο άξονας d ονομάζεται ευθύς άξονας (direct axis), ενώ ο άξονας q ονομάζεται εγκάρσιος άξονας (quadrature axis). Επιπλέον, ο άξονας q προηγείται του d κατά 90° μοίρες, ενώ ο άξονας 0 είναι κάθετος στο επίπεδο των άλλων δύο.



Σχήμα 3.3.1 Σχηματική αναπαράσταση των αξόνων d και q πλαισίου αναφοράς με αυθαίρετη ταχύτητα περιστροφής [23].

Να σημειωθεί ότι ο συντελεστής 2/3 στη μήτρα είναι αυθαίρετος και η επιλογή του σημαίνει ότι το πλάτος του χωρικού διανύσματος είναι ίσο με το πλάτος του φασικού μεγέθους. Αν, λοιπόν, χρησιμοποιηθεί το $\frac{\sqrt{2}}{3}$ τότε παραμένουν ίσες οι RMS ποσότητες. Αν, από την άλλη πλευρά, χρησιμοποιηθεί το $\sqrt{\frac{2}{3}}$ παραμένει ίση η ισχύς τόσο στο πλαίσιο d – q όσο και στο πλαίσιο abc.

Η γωνία $\theta = \int_0^t \omega(\tau) d\tau + \theta(0)$, που φαίνεται στο μετασχηματισμό, είναι η γωνία του άξονα d του νέου συστήματος με τον άξονα a του τριφασικού συστήματος. Η γωνία $\theta(0)$ είναι η αρχική γωνία, η οποία λαμβάνεται ίση με μηδέν χωρίς βλάβη της γενικότητας και ω η

αυθαίρετη γωνιακή ταχύτητα του περιστρεφόμενου πλαισίου. Αν η ω είναι σταθερή, τότε $\theta = \omega t$.

Εφαρμόζοντας τον πίνακα μετασχηματισμού προκύπτουν οι κάτωθι εξισώσεις:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \psi_{ds} - \omega \psi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \psi_{qs} - \omega \psi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \psi_{dr} - (\omega - \omega_r) \psi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \psi_{qr} - (\omega - \omega_r) \psi_{dr} \end{cases} \quad (3.3)$$

Οι τέσσερις αυτές εξισώσεις περιγράφουν τη λειτουργία της μηχανής και είναι εξισώσεις με τα μεγέθη ανηγμένα σε ένα περιστρεφόμενο με αυθαίρετη ταχύτητα ω πλαίσιο αναφοράς.

Οι σχέσεις των ρευμάτων με τις ροές είναι οι παρακάτω:

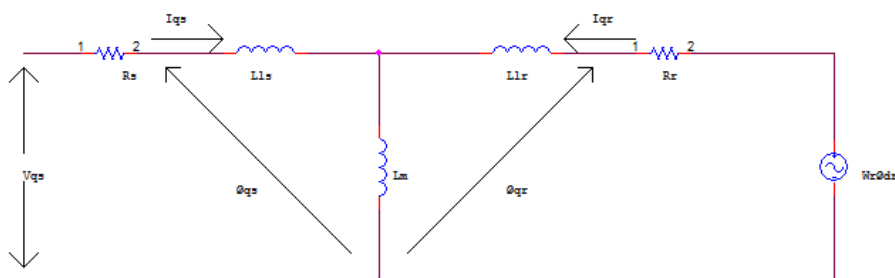
$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \psi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \psi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \psi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (3.4)$$

όπου $L_s = L_{sl} + M$ η αυτεπαγωγή του στάτη
 $L_r = L_{rl} + M$ η αυτεπαγωγή του δρομέα

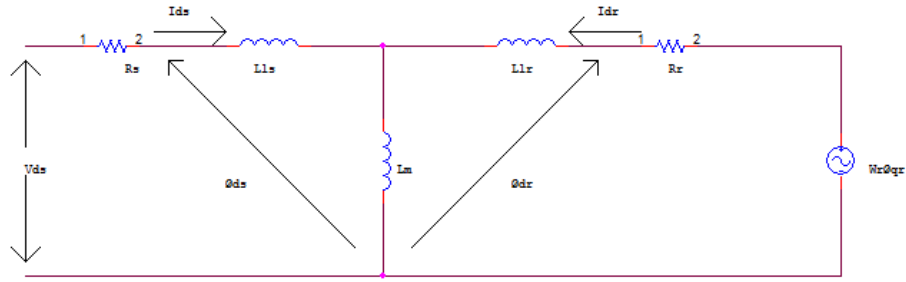
Δυναμικό μοντέλο σε στατό πλαίσιο αναφοράς

Αν στις εξισώσεις θέσουμε $\omega = 0$, τότε το πλαίσιο αναφοράς γίνεται στατό και οι εξισώσεις μετατρέπονται ως εξής:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \psi_{ds} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \psi_{qs} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \psi_{dr} - \omega_r \psi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \psi_{qr} - \omega_r \psi_{dr} \end{cases} \quad (3.5)$$



Σχήμα 3.3.2 Ισοδύναμο κύκλωμα DFIG στον q άξονα



Σχήμα 3.3.3 Ισοδύναμο κύκλωμα DFIG στον d άξονα

Ο μετασχηματισμός σε στατό πλαίσιο αναφοράς έχει επικρατήσει ως μετασχηματισμός Clarke και οι d – q συνιστώσες ως συνιστώσες α – β.

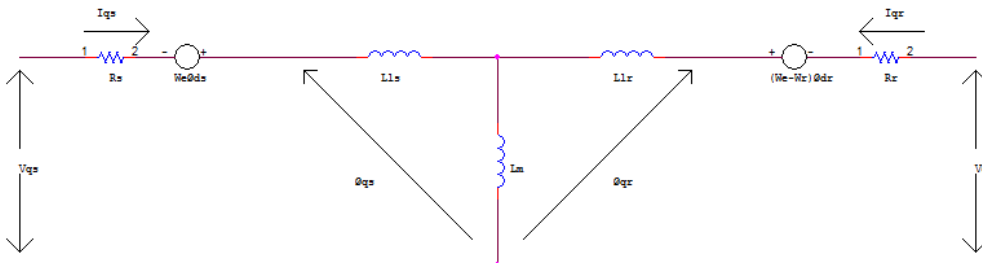
Η μαθηματική έκφραση για τη ροπή είναι τώρα:

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) (\psi_{ds} I_{qs} - \psi_{qs} I_{ds}) \quad (3.6)$$

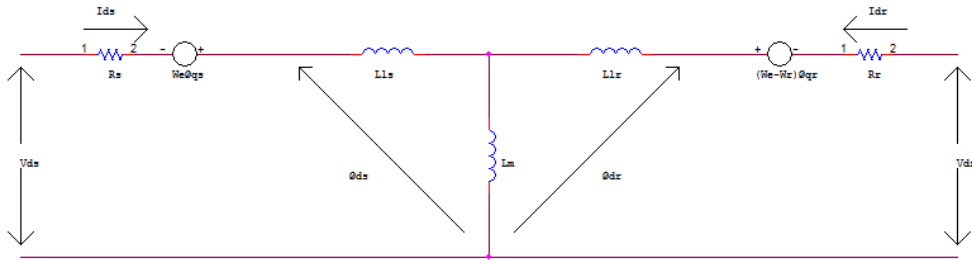
Δυναμικό μοντέλο σε σύγχρονα περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς

Στην περίπτωση αυτή το πλαίσιο περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα ω_e και το σύστημα των εξισώσεων μετατρέπεται ως εξής:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \psi_{ds} - \omega_e \psi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \psi_{qs} + \omega_e \psi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \psi_{dr} - (\omega_e - \omega_r) \psi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \psi_{qr} + (\omega_e - \omega_r) \psi_{dr} \end{cases} \quad (3.7)$$



Σχήμα 3.3.4 Ισοδύναμο κύκλωμα DFIG στον q άξονα



Σχήμα 3.3.5 Ισοδύναμο κύκλωμα DFIG στον d άξονα

Οι εκφράσεις των πεπλεγμένων ροών με όρους ρευμάτων είναι:

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_{qs} = L_{ls}I_{qs} + L_m(I_{qs} + I_{qr}) \\ \psi_{qr} = L_{lr}I_{qr} + L_m(I_{qs} + I_{qr}) \\ \psi_{qm} = L_m(I_{qs} + I_{qr}) \\ \psi_{ds} = L_{ls}I_{ds} + L_m(I_{ds} + I_{dr}) \\ \psi_{dr} = L_{lr}I_{dr} + L_m(I_{ds} + I_{dr}) \\ \psi_{dm} = L_m(I_{ds} + I_{dr}) \end{array} \right\} \quad (3.8)$$

Η ταχύτητα του δρομέα είναι ω_r και δεν μπορεί να θεωρηθεί σταθερή. Επιπλέον, επηρεάζει τις ροπές σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$T_e - T_m = \frac{2}{p} J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (3.9)$$

όπου T_m είναι η μηχανική ροπή και J η αδράνεια του δρομέα.

Επίσης, σε αυτή την περίπτωση η ηλεκτρομαγνητική ροπή είναι:

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{p}{2} \right) (\psi_{dr}I_{qr} - \psi_{qr}I_{dr}) \quad (3.10)$$

Η ισχύς στο d – q πλαίσιο

Η ισχύς στο d – q πλαίσιο προκύπτει με τη χρήση των μετασχηματισμών και άρα:

$$P_{dq} = \frac{3}{2} (V_d I_d + V_q I_q) \quad (3.11), \text{ ενεργός ισχύς}$$

$$Q_{dq} = \frac{3}{2} (V_q I_d - V_d I_q) \quad (3.12), \text{ άεργος ισχύς}$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις παρατηρούμε ότι η ισχύς παραμένει ανεξάρτητη της περιστροφής του πλαισίου.

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω εξισώσεις εξάγεται η ισχύς για το στάτη και το δρομέα μιας μηχανής:

$$P_s = \frac{3}{2}(V_{ds}I_{ds} + V_{qs}I_{qs}) \quad (3.13)$$

$$Q_s = \frac{3}{2}(V_{qs}I_{ds} - V_{ds}I_{qs}) \quad (3.14)$$

$$P_r = \frac{3}{2}(V_{dr}I_{dr} + V_{qr}I_{qr}) \quad (3.15)$$

$$Q_r = \frac{3}{2}(V_{qs}I_{ds} - V_{ds}I_{qs}) \quad (3.16)$$

Συνολικά, λοιπόν, η ισχύς της μηχανής είναι:

$$P_{tot} = P_s + P_r \quad (3.17)$$

$$Q_{tot} = Q_s + Q_r \quad (3.18)$$

3.4 Έλεγχος της ασύγχρονης γεννήτριας διπλής τροφοδότησης

3.4.1 Έλεγχος από την πλευρά του δρομέα

Ο έλεγχος από την πλευρά του δρομέα επιτελεί τόσο τον έλεγχο της ενεργού ισχύος όσο και τον έλεγχο της αέργου ισχύος. Ο έλεγχος των ισχυών αυτών δε γίνεται άμεσα, αλλά μέσω του ρεύματος του δρομέα.

Ο μετατροπέας στην πλευρά του δρομέα λειτουργεί σε ένα d – q πλαίσιο προσανατολισμένο ως προς τη ροή του στάτη και άρα λοιπόν το ρεύμα λαμβάνει δύο συνιστώσες, μία κάθετη και μία παράλληλη στη ροή του στάτη.

Έλεγχος ενεργού ισχύος

Σύμφωνα με την ανάλυση που έγινε παραπάνω η σχέση της τάσης του ευθύ άξονα είναι:

$$V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_e \psi_{qs} \quad (3.19) \text{ και γίνεται } V_{ds} = R_s I_{ds} \quad (3.20).$$

$$\text{Δεδομένου ότι η } R_s \text{ είναι πολύ μικρή προκύπτει ότι } V_{ds} = 0. \quad (3.21)$$

$$\text{Επιπλέον, ισχύει ότι : } I_{qs} = -\frac{L_m}{L_s} I_{qr} \quad (3.22)$$

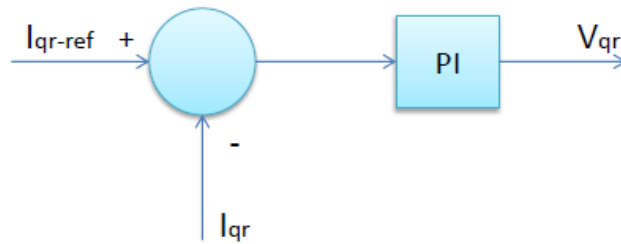
$$I_{ds} = \frac{\psi_{ds} - L_m I_{dr}}{L_s} \quad (3.23)$$

Τελικά, η ενεργός υπολογίζεται μέσω της σχέσης :

$$P_s = \frac{3}{2}(V_{ds}I_{ds} + V_{qs}I_{qs}) \xrightarrow{R_s \cong 0} P_s = \frac{3}{2}(V_{qs}I_{qs}) = -\frac{3}{2}V_{qs} \frac{L_m}{L_s} I_{qr} \quad (3.24)$$

Έτσι, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η ενεργός ισχύς είναι ανάλογη της q συνιστώσας του ρεύματος του δρομέα. Συνεπώς, ελέγχεται η ενεργός ισχύς P μέσω της αναλογίας αυτής.

Πιο συγκεκριμένα, στο μοντέλο, που χρησιμοποιήσαμε για τις διάφορες προσομοιώσεις, ο έλεγχος γίνεται με τη βοήθεια ενός PI ελεγκτή.



Σχήμα 3.4.1.1 Έλεγχος ενεργού ισχύος P

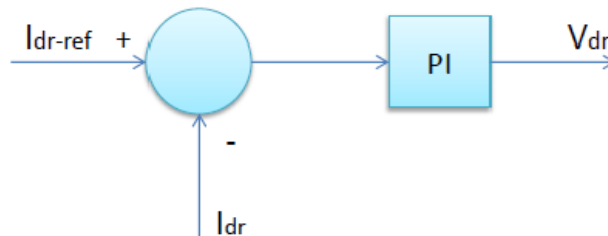
Για τη λειτουργία του ο ελεγκτής αυτός λαμβάνει ένα σημείο αναφοράς του ρεύματος, το οποίο προκύπτει από το αντίστοιχο σημείο αναφοράς της ηλεκτρικής ισχύος σε σύγκριση με την πραγματική της τιμή βάσει της ταχύτητας του δρομέα. Τα κέρδη του PI ελεγκτή έχουν ρυθμιστεί εμπειρικά με αλληπάλληλες δοκιμές.
(Εκτενέστερη αναφορά στον PI ελεγκτή θα γίνει σε επόμενη υποπαράγραφο.)

Έλεγχος αέργου ισχύος

Αντίστοιχα, η αέργος ισχύς υπολογίζεται μέσω της παρακάτω σχέσης :

$$Q_s = \frac{3}{2}(V_{qs}I_{ds} - V_{ds}I_{qs}) \xrightarrow{R_s \cong 0} Q_s = \frac{3}{2}(V_{qs}I_{ds}) = \frac{3}{2}V_{qs} \frac{\lambda_{ds} - L_m I_{dr}}{L_s} \quad (3.25)$$

Όπως και πριν παρατίθεται το ανάλογο διάγραμμα για τον έλεγχο της αέργου ισχύος:



Σχήμα 3.4.1.1 Έλεγχος αέργου ισχύος Q

3.4.2 Έλεγχος από την πλευρά του δικτύου

Η χρήση του διανυσματικού ελέγχου και σε αυτό το σημείο κρίνεται απαραίτητη, καθότι προσφέρει τη δυνατότητα ελέγχου της αέργου ισχύος και με αυτό τον τρόπο η DFIG συνεισφέρει στην ευστάθεια του δικτύου, στο οποίο ανήκει.

Στόχος του μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου είναι ο έλεγχος της τάσης στη dc – διασύνδεση, ώστε να παραμένει σταθερή σε μία τιμή ανεξάρτητα από τη ροή της ισχύος. Αυτή η λειτουργία εξασφαλίζει με τη σειρά της μηδενική μεταφορά αέργου ισχύος και άρα μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Και πάλι στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται ο εν λόγω έλεγχος, καθώς ο μετατροπέας μέσω της q συνιστώσας του ρεύματος του δικτύου ελέγχει την τάση της dc – διασύνδεσης και μέσω της d συνιστώσας ρυθμίζει την άεργο ισχύ.

Προκείμενου να αναλυθεί μαθηματικά το θέμα χρησιμοποιείται και πάλι το στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς ως προς το στάτη. Έτσι, οι εξισώσεις τάσεως του στάτη (αγνοώντας τα μεταβατικά φαινόμενα) είναι:

$$V_{ds} = R_s I_{ds} - \omega_e \psi_{qs} \quad (3.26)$$

$$V_{qs} = R_s I_{qs} + \omega_e \psi_{ds} \quad (3.27)$$

Λόγω του πλαισίου, που έχει επιλεγθεί, είναι $\psi_{qs} = 0$ (3.28). Δηλαδή:

$$V_{ds} = R_s I_{ds} \quad (3.29)$$

$$V_{qs} = R_s I_{qs} + \omega_e \psi_{ds} \quad (3.30)$$

Τέλος, θεωρώντας αμελητέες τις πτώσεις τάσης, έχουμε:

$$V_{ds} = 0 \quad (3.31)$$

$$V_{qs} = \omega_e \psi_{ds} \quad (3.32)$$

Σύμφωνα με όσα έχουν ειπωθεί για τον έλεγχο μέχρι τώρα ο μετατροπέας από την πλευρά του δικτύου διαχειρίζεται ενεργό ισχύ και αυτό σημαίνει ότι η συνολική άεργος ισχύς της μηχανής διαχειρίζεται από στο στάτη:

$$Q_s = \frac{3}{2} (V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs}) = \frac{3}{2} \omega_e \psi_{ds} I_{ds} = -\frac{3}{2} \omega_e \psi_{ds} I_{dr} \quad (3.33)$$

Συνοπώς, συμπεραίνεται ότι η άεργος ισχύς της μηχανής είναι ανάλογη της συνιστώσας d του ρεύματος του δρομέα και άρα ελέγχεται μέσω αυτής.

Σχετικά με την τάση της dc – διασύνδεσης, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ελέγχεται μέσω της συνιστώσας q του ρεύματος του δρομέα. Έστω ότι συμβολίζεται με I_{os} το ρεύμα, που διαπερνάει τον πυκνωτή, με κατεύθυνση το στάτη και με I_{or} το ρεύμα από τον πυκνωτή προς το δρομέα. Τότε συνολικά το ρεύμα της dc – διασύνδεσης (πυκνωτής) είναι:

$$\frac{dV_{dc}}{dt} C = I_{os} - I_{or} \quad (3.34)$$

Ακόμη, η ισχύς από το τριφασικό στο συνεχές είναι $V_{dc}I_{os} = \frac{3}{2}(V_{ds}I_{ds} + V_{qs}I_{qs}) = \frac{3}{2}V_{qs}I_{qs}$ (3.35).

Τώρα, για το μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου ισχύει:

$$V_{qs} = \frac{m}{2\sqrt{2}}V_{dc} \quad (3.36)$$

Τελικά, προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$I_{os} = \frac{3}{4\sqrt{2}}mI_{qs} \quad (3.37)$$

$$\frac{dV_{dc}}{dt} C = \frac{3}{4\sqrt{2}}mI_{qs} - I_{or} \quad (3.38)$$

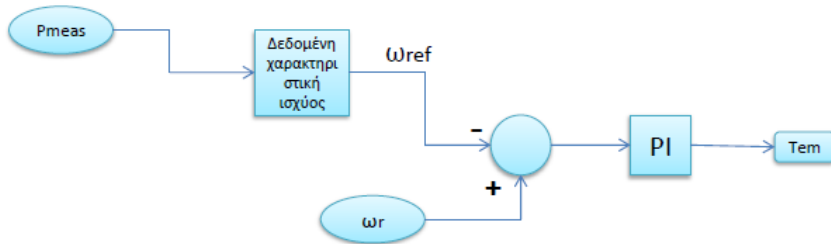
Αρα, με βάση τα παραπάνω προκύπτει και μαθηματικά ο έλεγχος της τάσης της dc – διασύνδεσης μέσω της συνιστώσας q του ρεύματος του δρομέα.

3.5 Ανεύρεση του σημείου παροχής μέγιστης ισχύος

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα το σύστημα ανεύρεσης μέγιστης ισχύος, που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία, βασίζεται στη δεδομένη χαρακτηριστική καμπύλη. Τέτοια συστήματα ελέγχου χρησιμοποιούνται συχνά, καθώς είναι συστήματα χαμηλής πολυπλοκότητας. Η μειωμένη πολυπλοκότητα οφείλεται στο ότι η χρήση δεδομένων καμπυλών προσδίδει λειτουργία με ντετερμινιστικό τρόπο. Ωστόσο, σημαντικό είναι να αναφέρουμε ότι ένα τέτοιο σύστημα είναι ευάλωτο σε ανακρίβειες, που προκύπτουν λόγω γήρανσης και σφαλμάτων στους αρχικούς υπολογισμούς.

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο ελέγχου, η χαρακτηριστική μέγιστης ισχύος βρίσκεται αποθηκευμένη κάπου στο μοντέλο. Ανά πάσα στιγμή μετράται η ταχύτητα περιστροφής του συστήματος και επιπλέον η ενεργός ισχύς (P_{meas}), που αποδίδει το σύστημα. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται η P_{meas} για να υπολογιστεί η ταχύτητα περιστροφής, με την οποία θα έπρεπε να στρέφεται μέσω της χαρακτηριστικής καμπύλης. Έπειτα, συγκρίνονται οι δύο ταχύτητες και η διαφορά τους χρησιμοποιείται ως εντολή (λόγος κατάτμησης) στον PI ελεγκτή. Τέλος, ο PI ελεγκτής έχει ως έξοδο μια εντολή ροπής, η οποία αντιστοιχεί πλέον στη βέλτιστη.

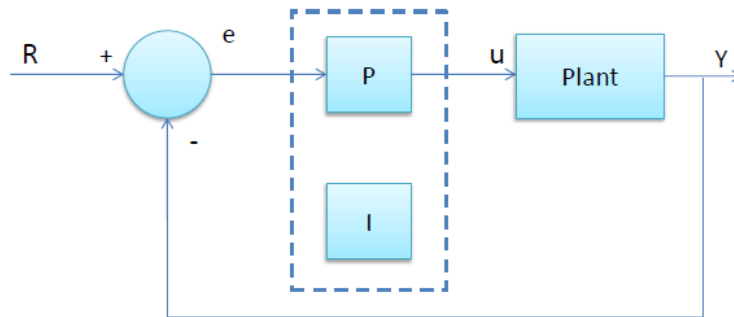
Για την προσομοίωση του συστήματος χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο Matlab/Simulink. Το πλήρες διάγραμμα ροής του συστήματος ελέγχου με χαρακτηριστική καμπύλη φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 3.5.1 Ανεύρεση σημείου παροχής μέγιστης ισχύος

Αναλογικός – Ολοκληρωτικός ελεγκτής (PI controller)

Κάθε PI ελεγκτής αποτελείται από το συνδυασμό δύο παραγόντων, τον αναλογικό και τον ολοκληρωτικό. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μεγάλη ταχύτητα απόκρισης και επιπλέον εξαλείφεται το σφάλμα σταθερής κατάστασης.



Σχήμα 3.4.2.1 PI ελεγκτής

Η συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή είναι η ακόλουθη:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (3.39)$$

όπου k_p : αναλογικό κέρδος
 k_i : ολοκληρωτικό κέρδος

Από το σχήμα, που παρατίθεται παραπάνω, παρατηρείται ότι ο PI ελεγκτής είναι ένα σύστημα κλειστού βρόχου. Το σήμα e ορίζει το σφάλμα, που προκύπτει από τη διαφορά της εισόδου R και της εξόδου Y . Έτσι, το σήμα αυτό στέλνεται στον ελεγκτή και ο τελευταίος υπολογίζει το ολοκλήρωμα της συνάρτησης μεταφοράς. Ο εν λόγω ελεγκτής χρησιμοποιείται, καθώς:

- α) η αναλογική παράμετρος οδηγεί σε ελάττωση του χρόνου απόκρισης
- β) η ολοκληρωτική παράμετρος εξαλείφει το μόνιμο σφάλμα, που εμφανίζεται.

Συνδυάζοντας τα δύο παραπάνω χαρακτηριστικά εμφανίζεται το επιθυμητό αποτέλεσμα και αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιείται ο συγκεκριμένος ελεγκτής.

3.6 Παράμετροι συστήματος

- Τα χαρακτηριστικά των Α/Γ που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα.

| Χαρακτηριστικά Α/Γ | Τιμή |
|---|---------|
| Ονομαστική ταχύτητα ανέμου $V_{w,nom}$ | 11 m/s |
| Μέγιστος αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος $C_{p,max}$ | 0.5 |
| Βέλτιστος λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου λ_{opt} | 9.9495 |
| Ονομαστική ισχύς P_{nom} | 2.75 MW |
| Ταχύτητα ανέμου ένταξης $V_{w,cut-in}$ | 5 m/s |
| Ονομαστική ταχύτητα ανέμου $V_{w, rated}$ | 15 m/s |
| Ταχύτητα ανέμου αποκοπής $V_{w,cut-out}$ | 30 m/s |
| Σταθερά αδράνειας H | 4.32 s |
| Διάμετρος έλικας R | 116 m |
| Ονομαστική τάση λειτουργίας V_s | 960 V |
| Αριθμός πόλων P | 6 |

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών

| Χαρακτηριστικά δικτύου | Τιμή |
|--|---------------------------------|
| Αντίσταση τυλιγμάτων M/Σ | 0.01 pu |
| Αυτεπαγωγή τυλιγμάτων M/Σ | 0.06 pu |
| Αντίσταση γραμμής θετικής και μηδενικής ακολουθίας | 0.1913 Ohms/km , 0.4834 Ohms/km |
| Επαγωγή γραμμής θετικής και μηδενικής ακολουθίας | 0.001 H/km, 0.003 H/km |
| Μήκος γραμμής | 25 km |
| Συχνότητα λειτουργίας | 50 Hz |

Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά δικτύου

- Οι παράμετροι της DFIG είναι:

$$R_s = 0.0098 \text{ pu} \quad (3.40)$$

$$R_r = 0.013 \text{ pu} \quad (3.41)$$

$$X_m = 7.39 \text{ pu} \quad (3.42)$$

$$X_s = 0.196 \text{ pu} \quad (3.43)$$

$$X_r = 0.22 \text{ pu} \quad (3.44)$$

- Τα κέρδη των PI ελεγκτών που χρησιμοποιήθηκαν στον έλεγχο της ενεργού και της αέργου ισχύος του back – to – back μετατροπέα είναι:

$$K_p = 10 \quad (3.45)$$

$$K_i = 50 \quad (3.46)$$

- Τα κέρδη του PI ελεγκτή που χρησιμοποιήθηκε στην ανεύρεση του σημείου παροχής μέγιστης ισχύος είναι:

$$K_p = 3 \quad (3.47)$$

$$K_i = 0.6 \quad (3.48)$$

- Τα κέρδη των PI ελεγκτών που χρησιμοποιήθηκαν στον έλεγχο της τάσης της dc – διασύνδεσης του back – to – back μετατροπέα είναι:

$$K_p = 0.39 \quad (3.49)$$

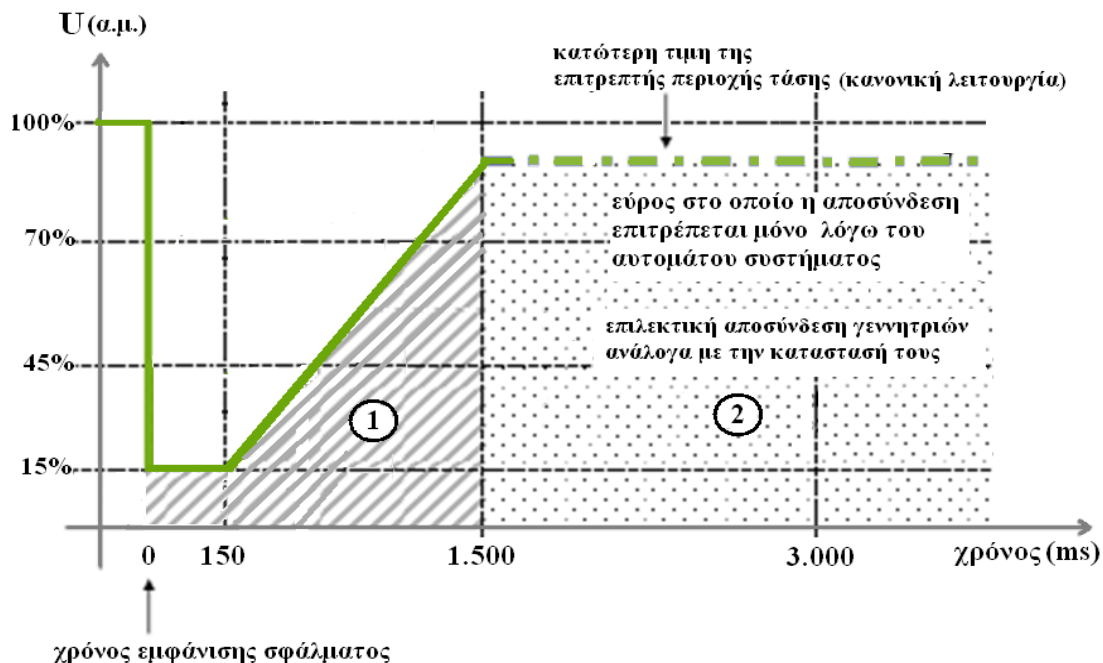
$$K_i = 38 \quad (3.50)$$

4

Αποτελέσματα προσομοίωσης

συστήματος

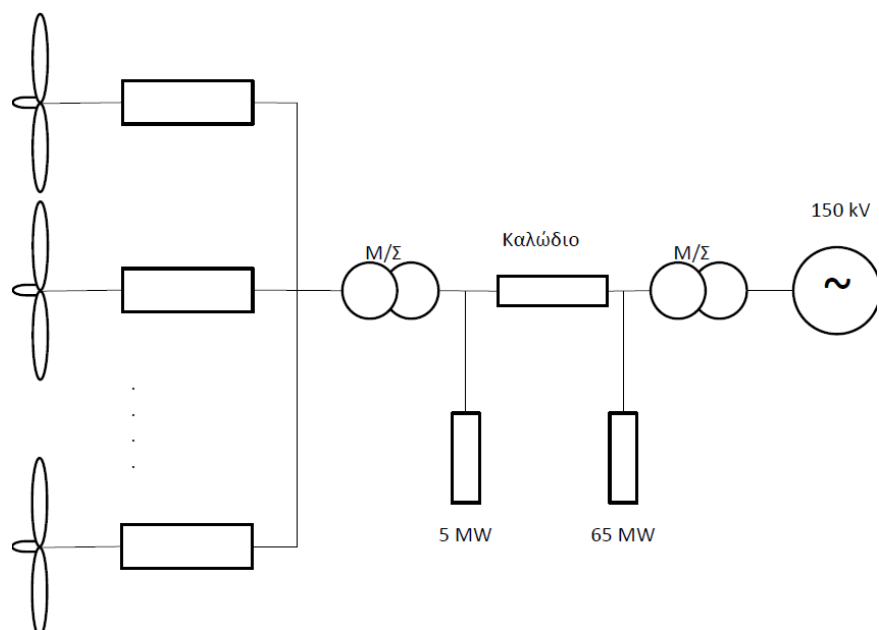
Όπως έχει αναφερθεί και νωρίτερα στην εργασία, η διείσδυση της αιολικής ενέργειας ολοένα και αυξάνεται με το πέρασμα των χρόνων. Στο παρελθόν, λόγω της μικρής διείσδυσης αιολικής ενέργειας κατά τη διάρκεια σφαλμάτων ακολουθούνταν η τεχνική της αποσύνδεσης των Α/Γ για την προστασία τους. Ευνόητο είναι, λοιπόν, ότι οι Α/Γ εκείνη την εποχή δεν συνέβαλλαν στη στήριξη τάσης και συχνότητας του δικτύου. Για να επιτευχθεί, όμως, μεγάλη διείσδυση αιολικής ενέργειας, που είναι και το ζητούμενο σήμερα, θα πρέπει οι Α/Γ να μην αποσυνδέονται. Αυτό συμβαίνει γιατί θα πρέπει να παρέχουν στο δίκτυο ενεργό και άεργο ισχύ προκειμένου να υποστηρίξουν το δίκτυο, όπως άλλωστε κάνουν και οι συμβατικοί σταθμοί ισχύος. Έτσι, στη σημερινή εποχή οι διάφοροι διαχειριστές απαιτούν την ικανότητα αδιάλλειπτης παροχής ισχύος ώστε να παραμένουν οι Α/Γ συνδεδεμένες. Σε προηγούμενο κεφάλαιο έγινε αναφορά στους τεχνικούς περιορισμούς ορισμένων χωρών και παρατηρήθηκαν οι διαφορές, που έχουν μεταξύ τους. Σύμφωνα με τους ελληνικούς περιορισμούς, η αποσύνδεση μιας Α/Γ ακολουθεί την παρακάτω καμπύλη:



Σχήμα 4.1 Καμπύλη τάσης για αδιάλλειπτη λειτουργία Α/Γ [16].

Στις επόμενες υποενότητες θα παρουσιαστούν ορισμένες περιπτώσεις λειτουργίας και θα εξεταστεί κατά πόσον οι Α/Γ ακολουθούν τους τεχνικούς περιορισμούς.

Πρώτα, όμως, θα δοθεί μια επεξήγηση του δικτύου στο οποίο έγινε η προσομοίωση. Μια απλοποιημένη εικόνα του είναι η παρακάτω:

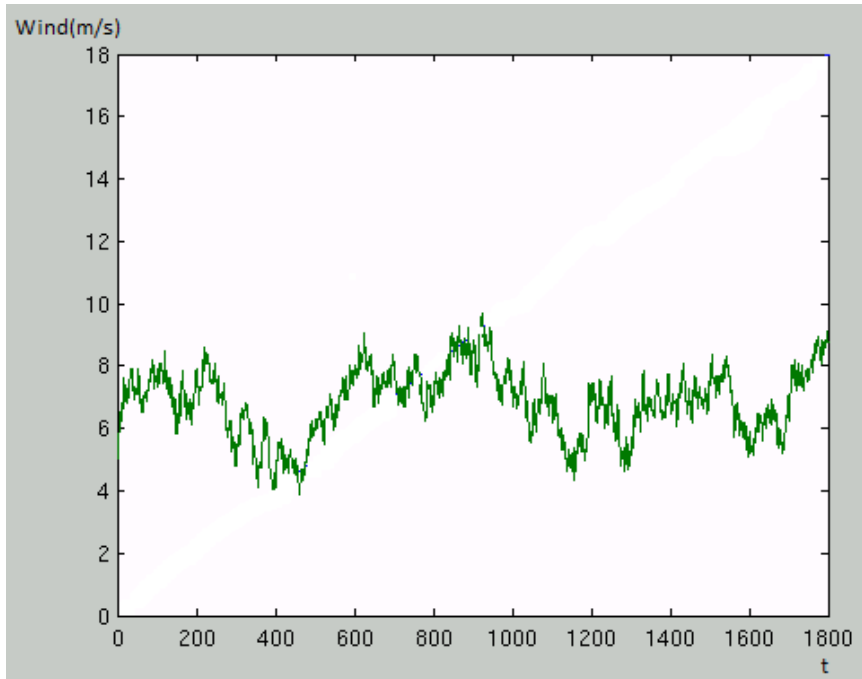


Σχήμα 4.2 Δίκτυο προσομοίωσης

Το δίκτυο, όπως φαίνεται, αποτελείται από ‘άπειρο ζυγό’ των 150 kV, Μ/Σ 150 kV/34 kV, γραμμή μεταφοράς 34 kV, Μ/Σ ανεμογεννήτριας και το Α/Π. Τα σφάλματα, που θα πραγματοποιηθούν, είναι μόνο απλά τριφασικά. Θεωρείται ότι το σφάλμα συμβαίνει κάπου στο ζυγό των 150 kV, με αποτέλεσμα να προκαλεί μειωμένα επίπεδα τάσης στο Μ/Σ 150 kV/34 kV. Κατά τη διάρκεια των σφαλμάτων όλες οι Α/Γ λειτουργούν σε ονομαστική ισχύ.

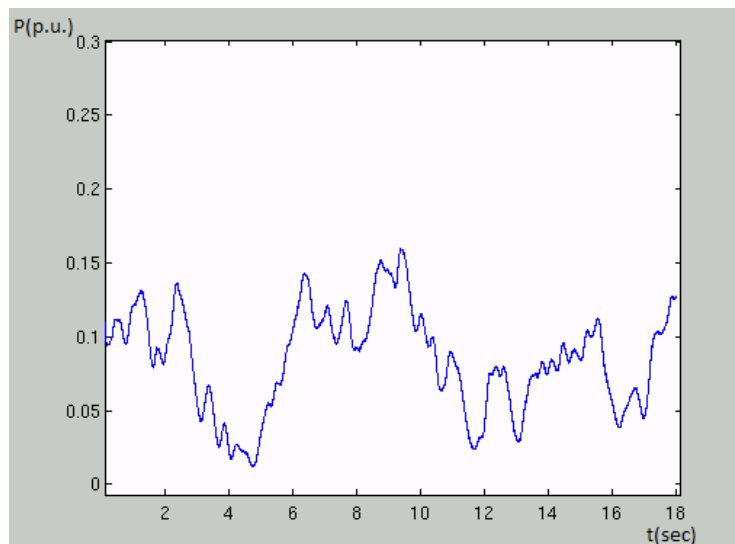
4.1 Κανονική λειτουργία

Για να διαπιστωθεί η κανονική λειτουργία του αιολικού πάρκου εισάγεται στο σύστημα η παρακάτω ανεμοσειρά και παρατηρούνται διάφορα μεγέθη:



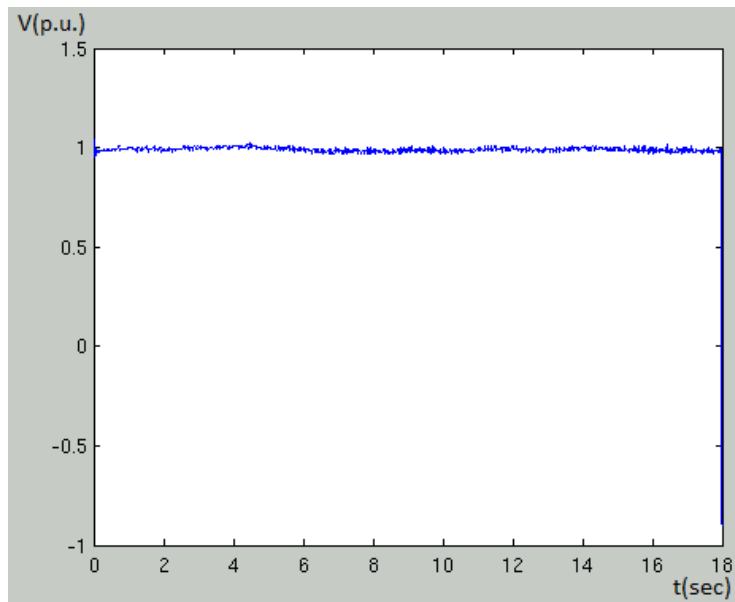
Σχήμα 4.1.1 Χρονοσειρά ανέμου για τη διαπίστωση κανονικής λειτουργίας του συστήματος

Το πρώτο μέγεθος που πρέπει να παρατηρηθεί είναι η ενεργός ισχύς που αποδίδει το σύστημα στο δίκτυο.

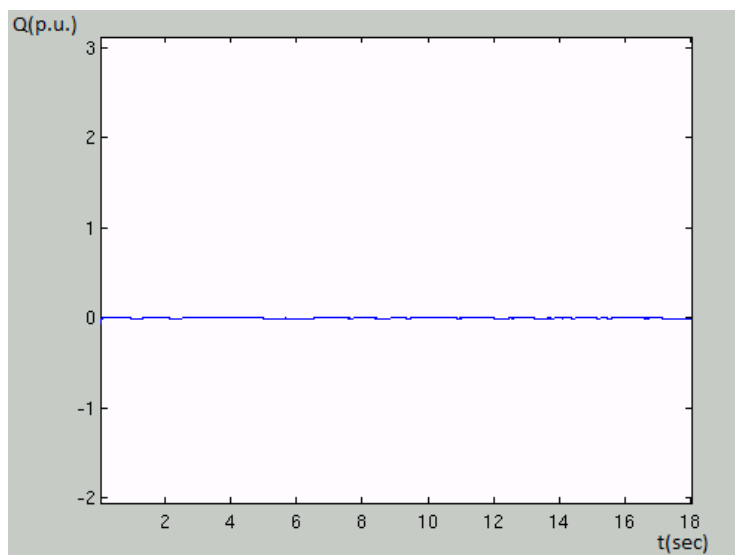


Σχήμα 4.1.2 Ενεργός ισχύς συστήματος

Παρατηρώντας την ανεμοσειρά και την κυματομορφή της ενεργού ισχύος φαίνεται ότι η δεύτερη ακολουθεί τις διαδοχικές εναλλαγές του ανέμου με μεγάλη ακρίβεια. Αυτό, φυσικά, υποδεικνύει την καλή λειτουργία του MPPT συστήματος.

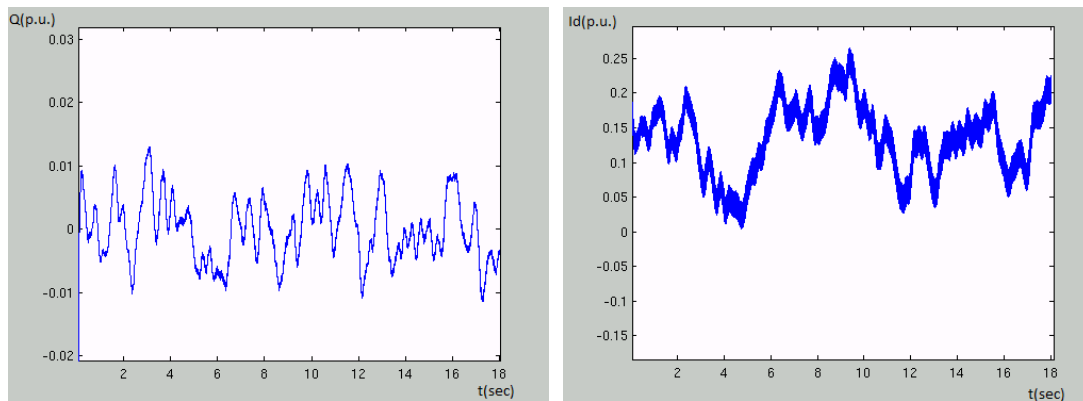


Σχήμα 4.1.3 Τάση στάτη



Σχήμα 4.1.4 Άεργος ισχύς

Παρατηρείται, επιπλέον, ότι η άεργος ισχύς είναι περίπου μηδενική ανά πάσα στιγμή. Αν επιλεγθεί να πραγματοποιηθεί μια εστίαση, ώστε να παρατηρηθεί η σχέση της με την I_d συνιστώσα έχουμε το παρακάτω αποτέλεσμα:



Σχήμα 4.1.5 Άεργος ισχύς και I_d συνιστώσα ρεύματος

Προφανώς, με τόσο μικρή άεργο ισχύ ο συντελεστής ισχύος θα πρέπει να είναι αρκετά κοντά στη μονάδα (επιθυμητή τιμή).

4.2 Διαταραχές της τάσης

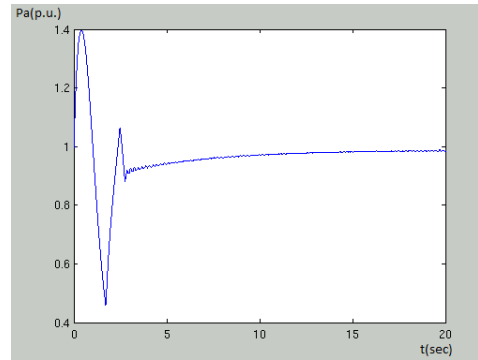
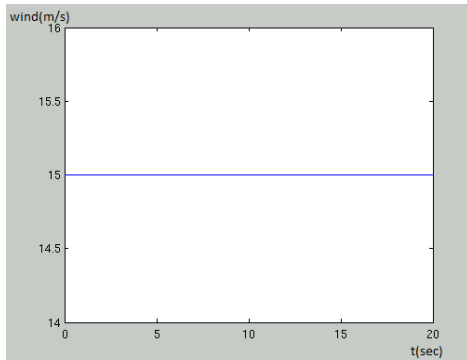
Οι βυθίσεις της τάσης είναι ένα από τα θέματα ποιότητας ισχύος, που αφορούν στα αιολικά πάρκα. Ως βύθιση τάσης ορίζεται μια ξαφνική μείωση της τάσης σε ένα σημείο του ηλεκτρικού δικτύου, η οποία διαρκεί από μισό κύκλο έως ένα λεπτό. Η μείωση αυτή της τάσης μπορεί να κυμαίνεται από 10% - 90% της ονομαστικής τιμής. Ευνόητο είναι, λοιπόν, ότι με τόσο μεγάλη διαταραχή επηρεάζεται η ποιότητα ισχύος, που προσφέρεται στο δίκτυο. Για το λόγο αυτό, οι Α/Γ αποσυνδέονται από το δίκτυο όταν η τάση πέφτει κάτω από το 80% - 90% της ονομαστικής τιμής. Υπάρχουν διάφοροι λόγοι δημιουργίας μιας βύθισης τάσης και ορισμένοι από αυτούς είναι: κυρίως βραχυκυκλώματα κάπου στο δίκτυο και σφάλματα γείωσης, αλλά και επιπλέον διακοπτικές λειτουργίες σχετιζόμενες με προσωρινή αποσύνδεση φορτίου, ροή υψηλών ρευμάτων που προκαλούνται από την εκκίνηση μεγάλου κινητήρα, ρεύματα προερχόμενα από τον κορεσμό μετασχηματιστών. Τα σφάλματα αυτά μπορεί είτε να συμβούν κοντά στο αιολικό πάρκο είτε μακριά. Σε κάθε περίπτωση, όμως, προκαλούν την αντίστοιχη διαταραχή στο σημείο σύνδεσης της Α/Γ.

Τέλος, κάτι σημαντικό γύρω από τις βυθίσεις τάσης, που πρέπει να αναφερθεί, είναι τα οικονομικά θέματα που έχουν ως συνέπεια. Πιο συγκεκριμένα, οι διαταραχές αυτές περιλαμβάνουν κόστη όπως η απώλεια παραγωγής ή ζημιά στον εξοπλισμό. Προφανώς, οι οικονομικές συνέπειες εξαρτώνται από την ευαισθησία του εξοπλισμού, τα χαρακτηριστικά της κάθε βύθισης και την οικονομική αξία των αιολικών πάρκων.

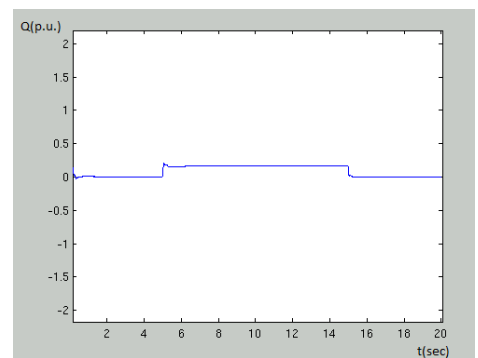
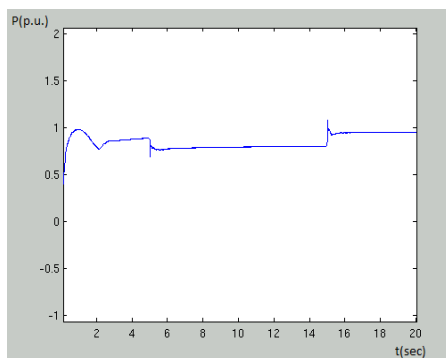
Στις επόμενες υποπαραγράφους εξετάζονται τρεις περιπτώσεις συμμετρικών τριφασικών σφαλμάτων.

4.2.1 Βύθιση της τάσης κατά 30% για 10 sec (περίπτωση λειτουργίας 1)

Η πρώτη διαταραχή τάσης, στην οποία θα υποβληθεί το σύστημα, είναι βύθιση τάσης κατά 30% στην ονομαστική τιμή για 10 δευτερόλεπτα. Κατά το σφάλμα η ταχύτητα ανέμου είναι σταθερή στα 15 m/s.

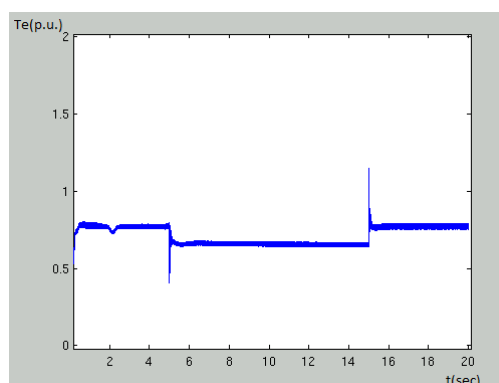


Σχήμα 4.2.1.1 Ταχύτητα ανέμου και αεροδυναμική ισχύς κατά τη διάρκεια της βύθισης τάσης

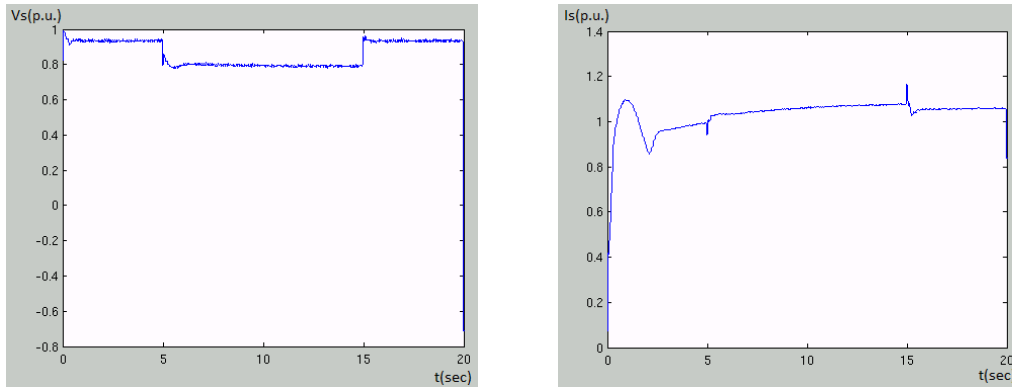


Σχήμα 4.2.1.2 Ενεργός και άεργος ισχύς κατά τη βύθιση της τάσης

Εμφανίζονται δύο κορυφές στην ενεργό ισχύ στις στιγμές του μεταβατικού φαινομένου. Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της άεργου ισχύος κατά τη διάρκεια της βύθισης τάσης. Αυτό συμβαίνει, καθώς το σύστημα ελέγχου προσπαθεί να υποστηρίξει την τάση του δικτύου.



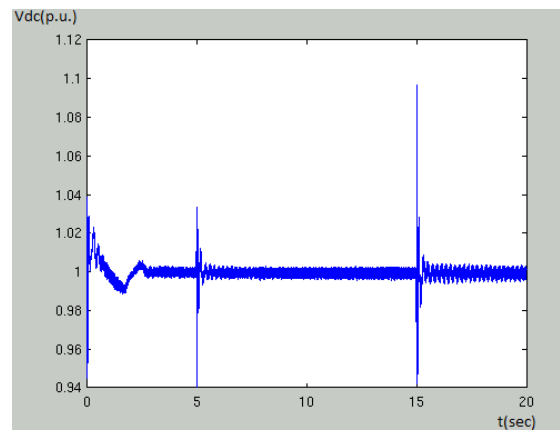
Σχήμα 4.2.1.3 Ηλεκτρομαγνητική ισχύς κατά τη βύθιση τάσης



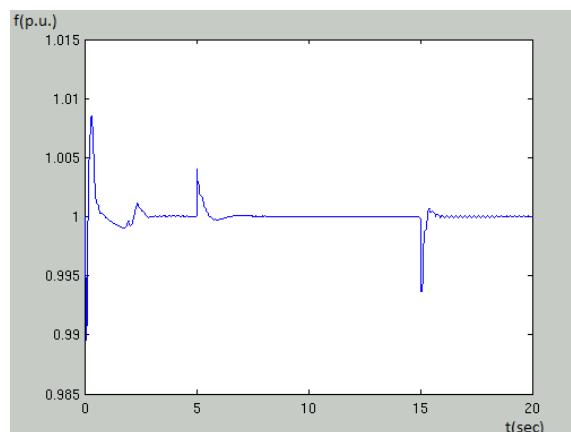
Σχήμα 4.2.1.4 Τάση και ρεύμα στάτη κατά τη βύθιση τάσης

Στις κυματομορφές αυτές είναι προφανής η λειτουργία του συστήματος ελέγχου. Πιο συγκεκριμένα, φαίνεται η μείωση της τάσης και αντίστοιχα η αύξηση του ρεύματος μέσω του οποίου ελέγχεται η αύξηση της αέργου ισχύος.

Επιπλέον, παρουσιάζεται η τάση της dc – διασύνδεσης, η οποία παραμένει σταθερή παρά την αύξηση της αέργου ισχύος και άρα δε μεταβάλλεται ο συντελεστής ισχύος.



Σχήμα 4.2.1.6 Τάση της dc – διασύνδεσης κατά τη βύθιση τάσης

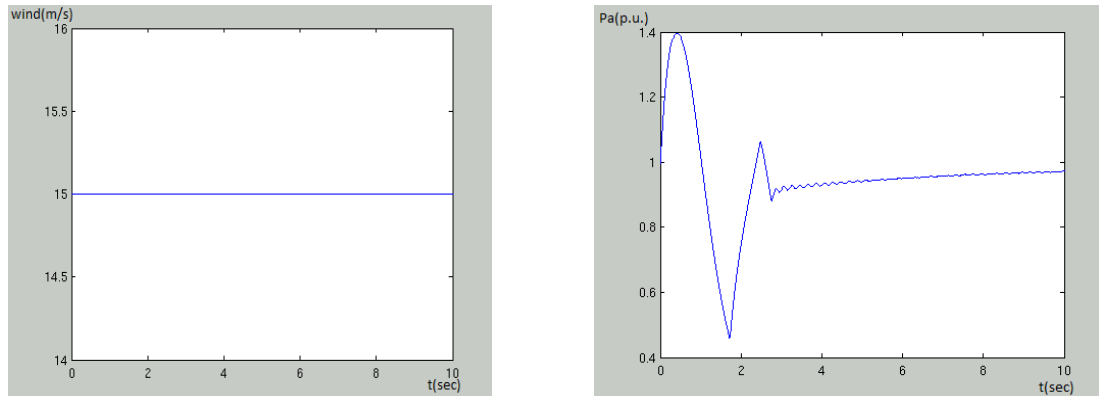


Σχήμα 4.2.1.7 Συχνότητα κατά τη βύθιση τάσης, όπως μετρείται από το σύστημα ελέγχου

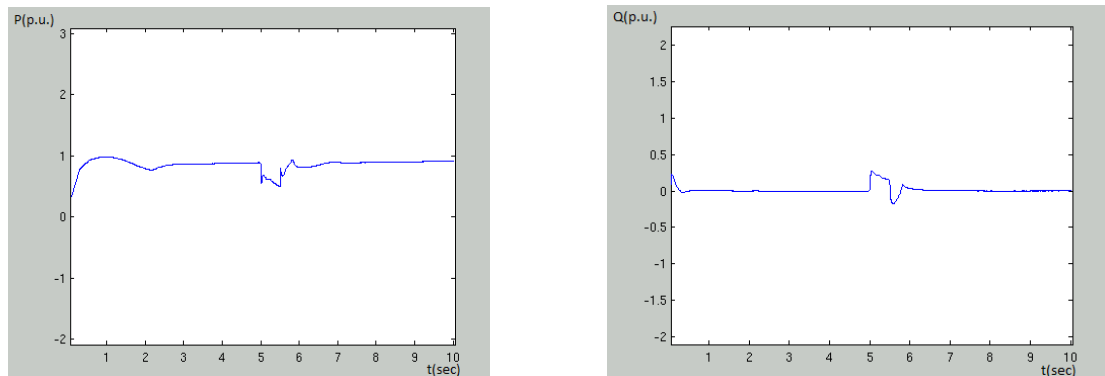
Τέλος, η συχνότητα δεν επηρεάζεται από το σφάλμα του δικτύου και αυτό είναι το επιθυμητό.

4.2.2 Βύθιση της τάσης κατά 50% για 0.5 sec (περίπτωση λειτουργίας 2)

Στην υποπαράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μιας βύθισης τάσης κατά 50% για χρόνο 0.5 δευτερολέπτου. Τα μεγέθη που ακολουθούν είναι τα ίδια με της προηγούμενης υποπαραγράφου.

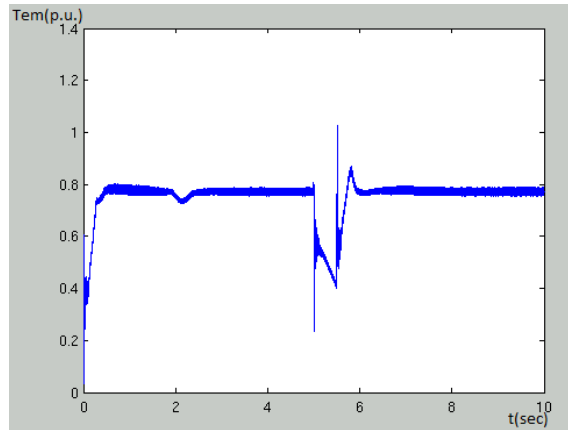


Σχήμα 4.2.2.1 Ταχύτητα ανέμου και αεροδυναμική ισχύς κατά τη διάρκεια της βύθισης τάσης



Σχήμα 4.2.2.2 Ενεργός και άεργος ισχύς κατά τη βύθιση της τάσης

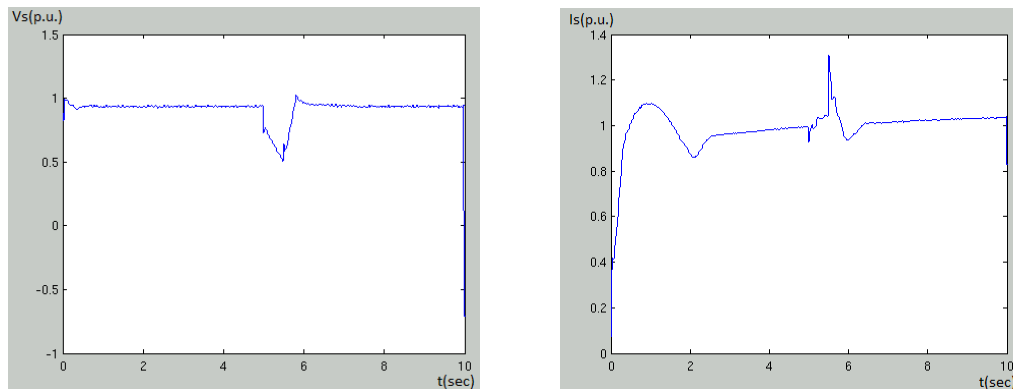
Και στο σημείο αυτό φαίνεται η έγχυση αέργου ισχύος, που είναι αποτέλεσμα λειτουργίας του συστήματος ελέγχου για την εξισορρόπηση του σφάλματος με ταυτόχρονη μείωση της ενεργού ισχύος. Να σημειωθεί ότι δεν είναι επιθυμητή η απώλεια ενεργού ισχύος, ωστόσο σε σφάλματα τόσο μεγάλης κλίμακας (75 kV μείωση τάσης) είναι αδύνατο ένα σύστημα σαν αυτό της παρούσας εργασίας (33 MW) να εξισορροπήσει το εν λόγω σφάλμα.



Σχήμα 4.2.2.3 Ηλεκτρομαγνητική ισχύς κατά τη βύθιση τάσης

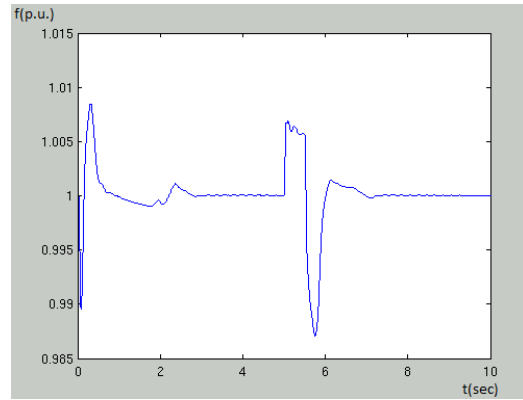
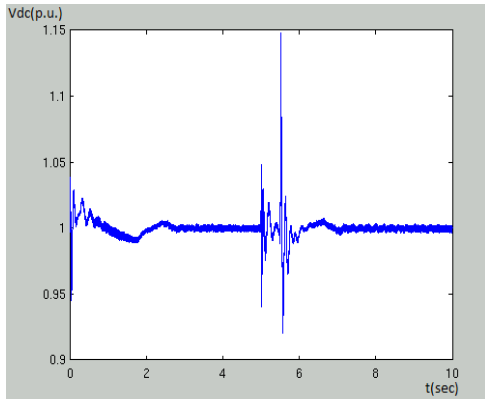
Όπως είναι αναμενόμενο η ηλεκτρομαγνητική ισχύς ακολουθεί την πτώση τάσης και ανάλογα μειώνεται και αυτή.

Παρακάτω παρατηρείται η πτώση τάσης στο στάτη, η οποία όμως λόγω της λειτουργίας του συστήματος ελέγχου (έγχυση αέργου ισχύος και γι' αυτό άλλωστε είναι αυξημένο το ρεύμα κατά το σφάλμα) είναι περιορισμένη. Με άλλα λόγια, κατά τη διάρκεια του σφάλματος ανέρχεται στο 70% της αρχικής σε αντίθεση με το 50% που ορίζεται από το δίκτυο.

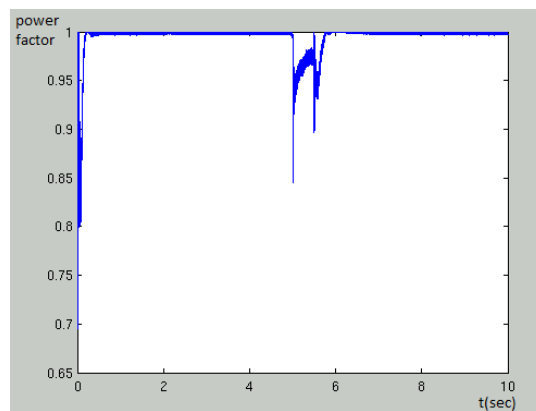


Σχήμα 4.2.2.4 Τάση και ρεύμα στάτη κατά τη βύθιση τάσης

Η συχνότητα και η τάση της dc – διασύνδεσης παραμένουν σταθερές και έτσι ο συντελεστής ισχύος (Εικόνα 4.2.2.7) είναι μοναδιαίος παρά τη μεταβολή που συντελείται στην τάση του δικτύου.

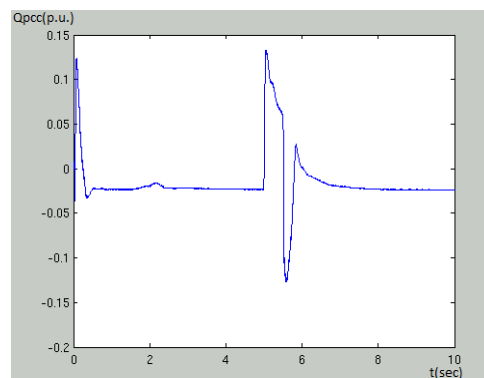
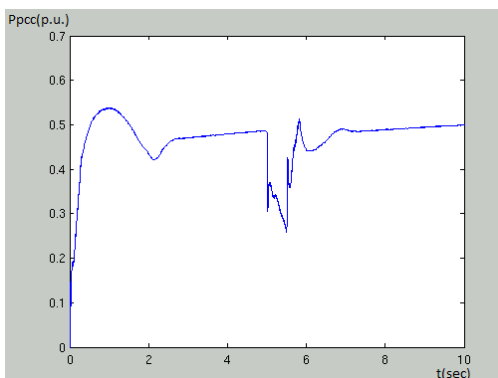


Σχήμα 4.2.2.6 Τάση της dc – διασύνδεσης και συχνότητα κατά τη βύθιση τάσης

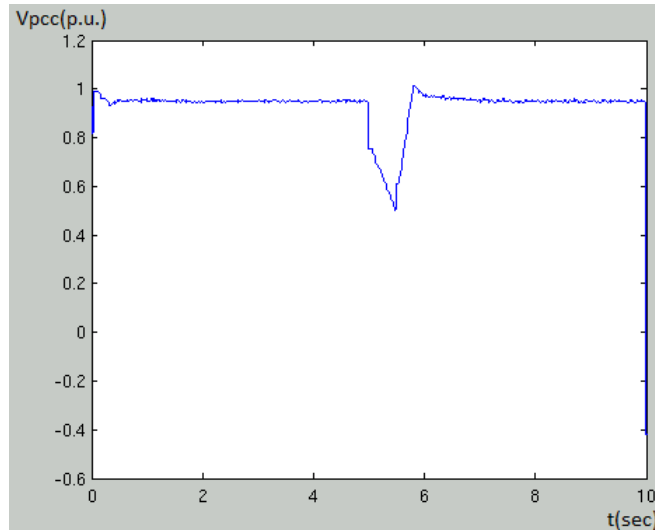


Σχήμα 4.2.2.7 Συντελεστής ισχύος κατά τη βύθιση τάσης

Τέλος, παρουσιάζονται κυματομορφές που αναφέρονται στο σημείο κοινής σύνδεσης, διότι είναι σημείο υψηλής σημασίας για τη λειτουργία των δικτύων.



Σχήμα 4.2.2.7 Ενεργός και άεργος ισχύς του σημείου κοινής σύνδεσης κατά τη βύθιση τάσης

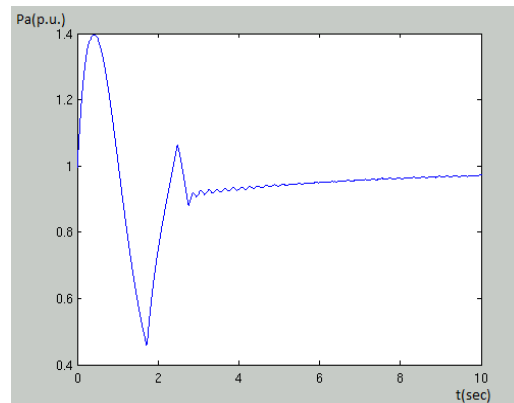
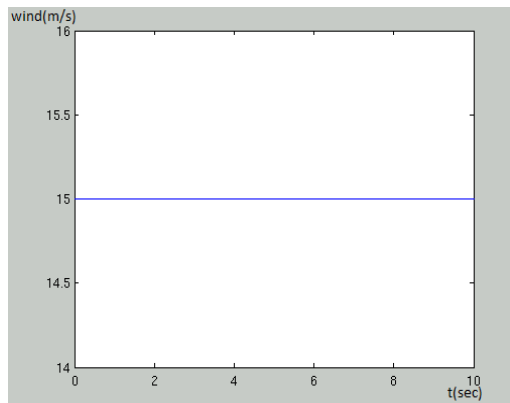


Σχήμα 4.2.2.8 Τάση σημείου κοινής σύνδεσης κατά τη βύθιση τάσης

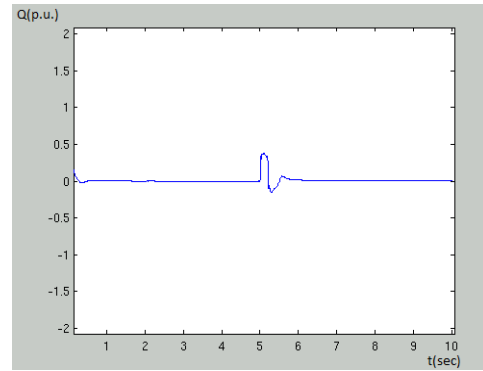
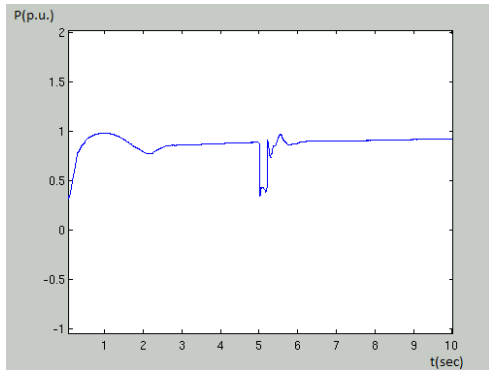
Στο σημείο αυτό του δικτύου η διόρθωση του σφάλματος είναι μικρότερη και αυτό γιατί το δίκτυο είναι πιο ισχυρό (το σημείο κοινής σύνδεσης βρίσκεται πιο κοντά στο σφάλμα).

4.2.3 Βύθιση της τάσης κατά 85% για 0.2 sec (περίπτωση λειτουργίας 3)

Η τελευταία διαταραχή, που εφαρμόζεται στο δίκτυο, είναι βύθιση τάσης κατά 85% για 0.2 sec. Οι κυματομορφές, που παρουσιάζονται, είναι αντίστοιχες των προηγούμενων υποπαραγράφων και παρατηρείται ανάλογη λειτουργία του συστήματος ελέγχου.

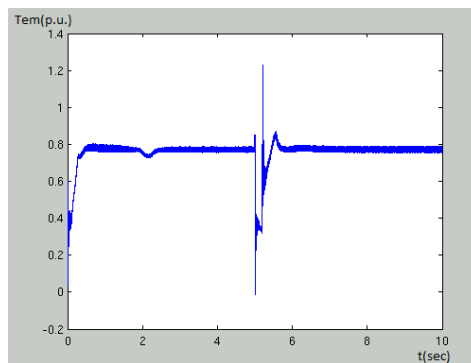


Σχήμα 4.2.3.1 Ταχύτητα ανέμου και αεροδυναμική ισχύς κατά τη διάρκεια της βύθισης τάσης



Σχήμα 4.2.3.2 Ενεργός και άεργος ισχύς κατά τη βύθιση της τάσης

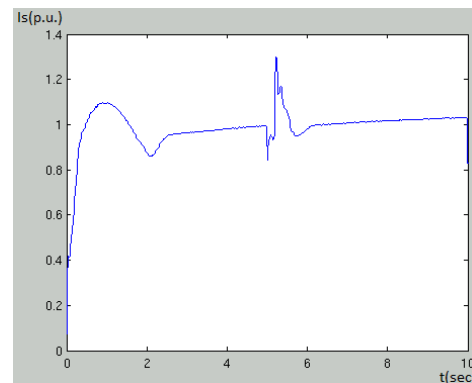
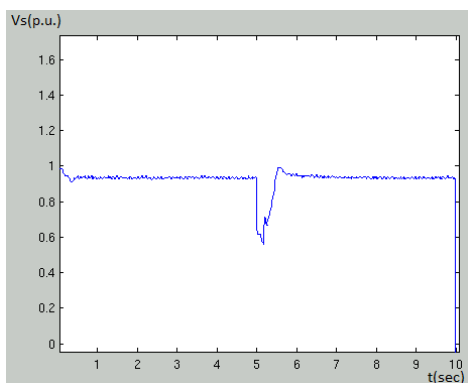
Δυστυχώς και εδώ λόγω της τόσο μεγάλης πτώσης τάσης και μολονότι λαμβάνει χώρα υψηλή έγχυση αέργου ισχύος, η ενεργός ισχύς μειώνεται πολύ (στο 35% της ονομαστικής τιμής).



Σχήμα 4.2.3.3 Ηλεκτρομαγνητική ισχύς κατά τη βύθιση τάσης

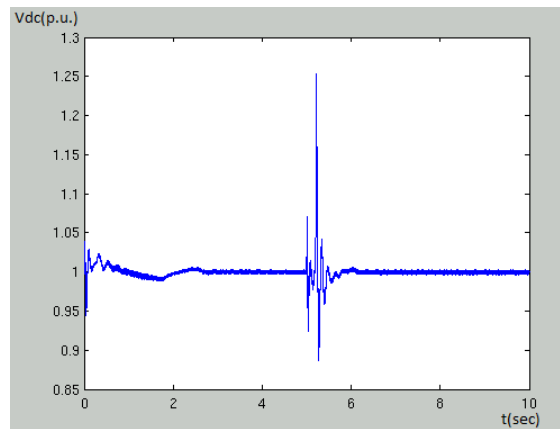
Αντίστοιχα, μειώνεται η ηλεκτρομαγνητική ισχύς.

Εν τούτοις, το σύστημα λειτουργεί πολύ ικανοποιητικά δεδομένου ότι η τάση διορθώνεται κατά 35% ανεξάρτητα από το γεγονός ότι το δίκτυο είναι πολύ ισχυρό συγκρινόμενο με το Α/Π.



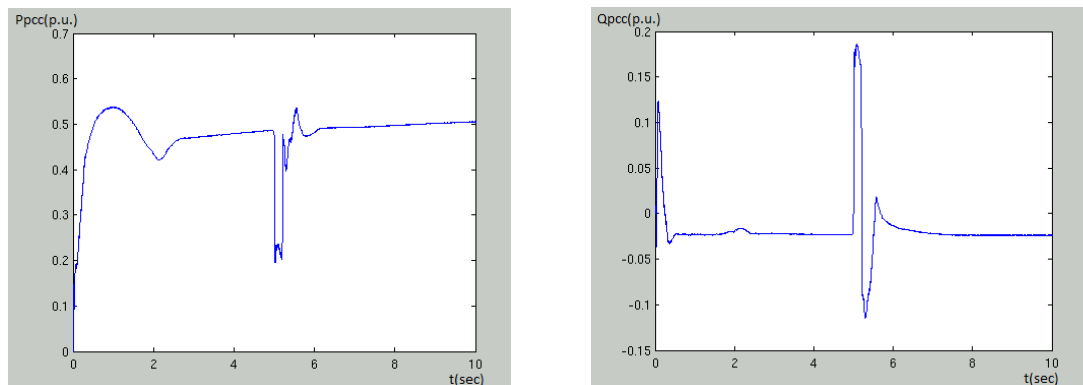
Σχήμα 4.2.3.4 Τάση και ρεύμα στάτη κατά τη βύθιση τάσης

Παρατηρώντας και τις υπόλοιπες σχετιζόμενες κυματομορφές φαίνεται η καλή λειτουργία του συστήματος ελέγχου, όπως για παράδειγμα η τάση της dc – διασύνδεσης παραμένει ανεπηρέαστη μολονότι συμβαίνει πτώση τάσης στο σύστημα.



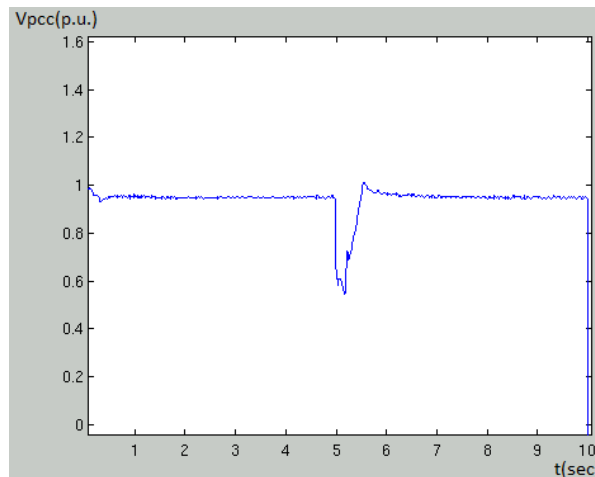
Σχήμα 4.2.3.6 Τάση της dc – διασύνδεσης

Επιπλέον, είναι εμφανής η αντιστάθμιση που προσπαθεί να επιτύχει το σύστημα στο σημείο κοινής σύνδεσης εγχύοντας άεργο ισχύ.



Σχήμα 4.2.3.7 Ενεργός και άεργος ισχύς του σημείου κοινής σύνδεσης κατά τη βύθιση τάσης

Η προσπάθεια αυτή αντικατοπτρίζεται και στην τάση του σημείου κοινής σύνδεσης παρακάτω.



Σχήμα 4.2.3.8 Τάση σημείου κοινής σύνδεσης κατά τη βύθιση τάσης

Συμπέρασμα

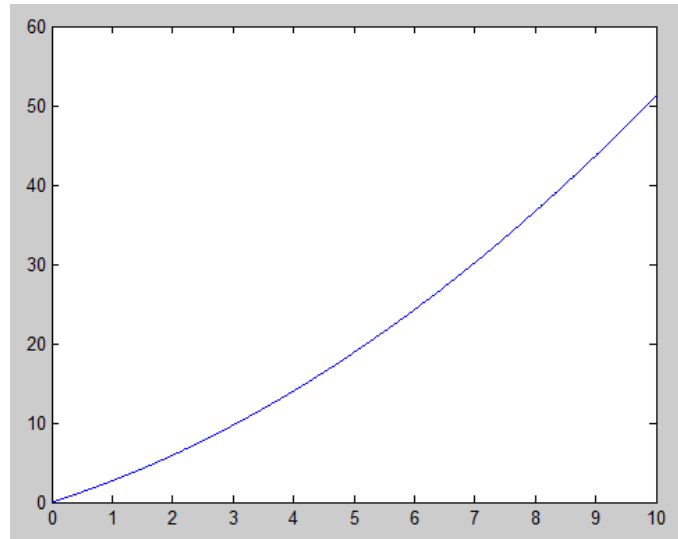
Οι προσομοιώσεις που διενεργήθηκαν αποδεικνύουν ότι η τάση, το ρεύμα και οι ισχείς παρουσιάζουν μεταβολές (σε ορισμένες περιπτώσεις πολύ έντονες) κατά τη διάρκεια των σφαλμάτων. Μάλιστα, το ρεύμα παρουσιάζει τιμή υπερδιπλάσια της ονομαστικής του. Εξ' αιτίας, λοιπόν, αυτών των ακραίων μεταβολών συνηθιζόταν μέχρι πρόσφατα η αποσύνδεση των Α/Γ από το δίκτυο. Πλέον, όμως, λόγω της μεγάλης διείσδυσης τους αυτό δεν είναι δυνατό και έτσι πρέπει να προλαμβάνονται μέτρα για την ασφάλεια των Α/Γ και του μετατροπέα. Παράδειγμα τέτοιων μέτρων είναι η χρήση μιας αντίστασης (crowbar) για τη διαχέτευση των υψηλών ρευμάτων.

4.3 Περιπτώσεις λειτουργίας για επίδειξη του MPPT

Στις επόμενες υποπαραγράφους θα πραγματοποιηθούν δύο περιπτώσεις λειτουργίας για την ανάδειξη του MPPT. Πιο συγκεκριμένα, πρώτα θα εφαρμοστεί μια βηματική, απότομη μεταβολή του ανέμου και στη συνέχεια μια πραγματική (πιο ήπια) ανεμοσειρά, ώστε να εξακριβωθεί η λειτουργία του συστήματος σε μικρές μεταβολές του ανέμου.

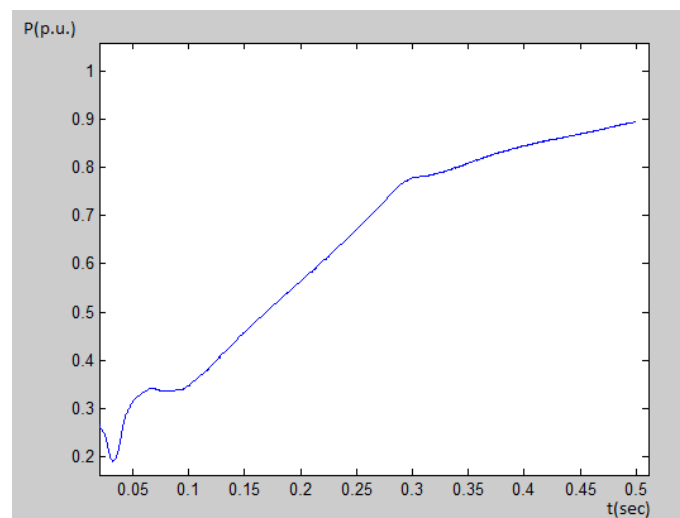
4.3.1 Εφαρμογή βηματικής μεταβολής ανέμου

Στο σημείο αυτό θα εκτελεστεί μια βηματική μεταβολή από τα 8 m/s έως τα 15 m/s και θα παρατηρηθεί εάν η ισχύς που αποδίδει το σύστημα ανταποκρίνεται στη δεδομένη χαρακτηριστική καμπύλη που έχει εισαχθεί, ώστε να ακολουθεί προκειμένου σε κάθε μεταβολή του αέρα να “βρίσκει” το σύστημα το σημείο παροχής μέγιστης ισχύος. Έτσι, θεωρητικά κατά τη μεταβολή αυτή, καθότι πολύ απότομη (ο άνεμος βρίσκεται σε ακραίες τιμές) θα πρέπει η καμπύλη της ισχύος να ισοδυναμεί με τη θεωρητική που υπάρχει αποθηκευμένη στον ελεγκτή. Η εν λόγω καμπύλη είναι η παρακάτω:



Σχήμα 4.3.1.1 Δεδομένη χαρακτηριστική καμπύλη που εισήχθη στο μοντέλο μας

Εφαρμόζοντας τη μεταβολή στο μοντέλο λαμβάνεται η παρακάτω απόδοση ενεργού ισχύος από το αιολικό πάρκο:

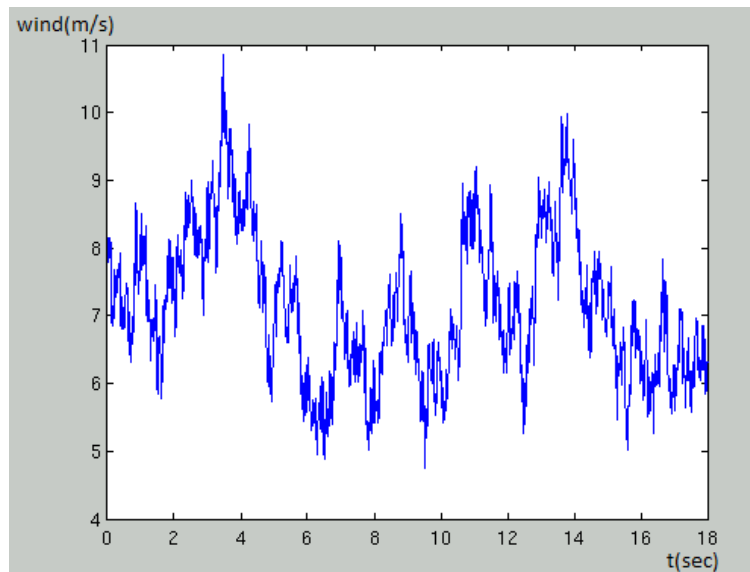


Σχήμα 4.3.1.2 Καμπύλη ισχύος κατά την εφαρμογή βηματικής μεταβολής ανέμου

Όπως εύκολα παρατηρείται, η πραγματική καμπύλη παρεκκλίνει της ιδανικής. Αυτό είναι λογικό, καθώς το σύστημα δεν αντιδρά ακαριαία στη μεταβολή του ανέμου, αλλά αντιθέτως χρειάζεται κάποιο χρόνο για να προσαρμοστεί. Αυτή η χρονική καθυστέρηση προκαλεί τη διαφορά ανάμεσα στις δύο καμπύλες. Σε κάθε περίπτωση, βέβαια, η πραγματική καμπύλη κρίνεται ικανοποιητική δεδομένου ότι η ισχύς ακολουθεί την ανοδική σταθερά κλιμακωτή πορεία, που θα έπρεπε.

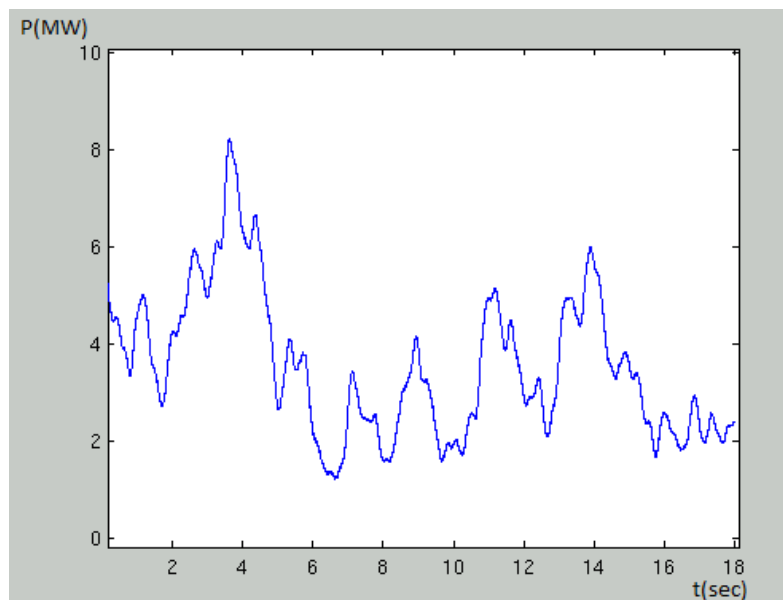
4.3.2 Εφαρμογή πραγματικής ανεμοσειράς

Εισάγεται στο σύστημα η παρακάτω ανεμοσειρά:

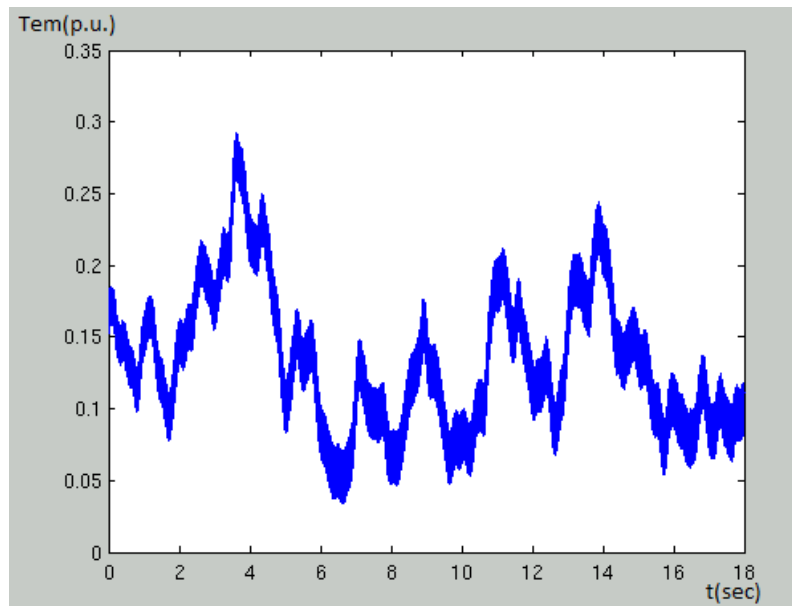


Σχήμα 4.3.2.1 Πραγματική ανεμοσειρά, που εισάγεται στο σύστημα

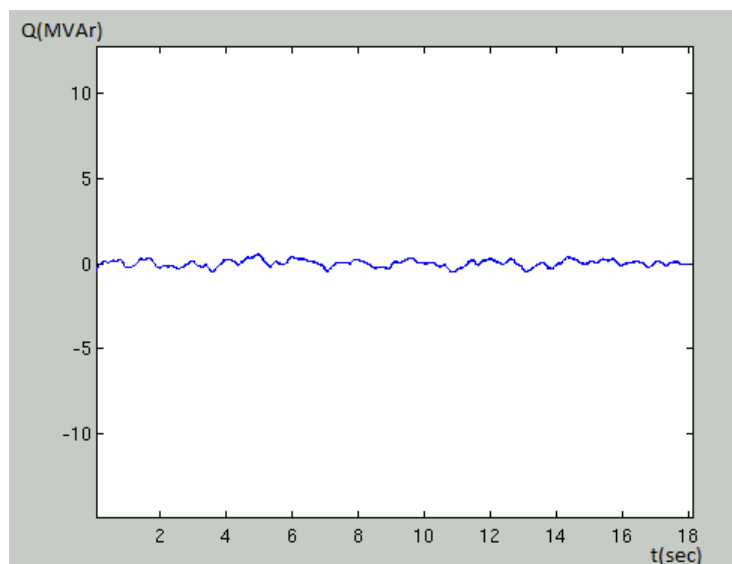
Επίσης, παρατίθενται η ενεργός ισχύς, η ηλεκτρομαγνητική ροπή και η άεργος ισχύς, που αποδίδει το σύστημα στο δίκτυο κατά την επιβολή του παραπάνω ανέμου.



Σχήμα 4.3.2.2 Ενεργός ισχύς



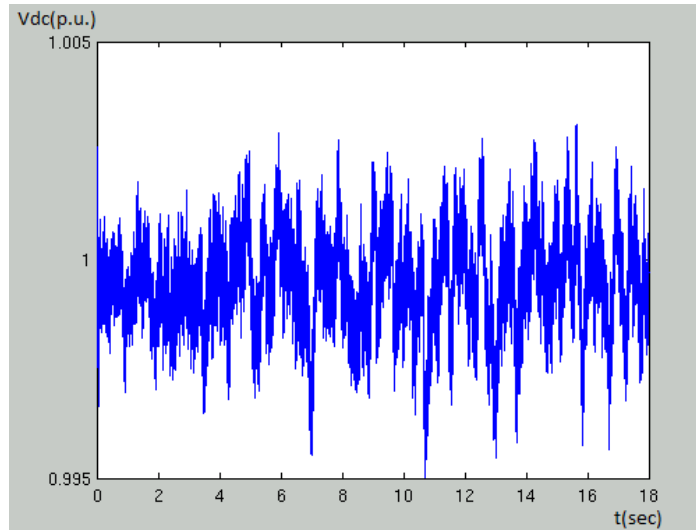
Σχήμα 4.3.2.3 Ηλεκτρομαγνητική ροπή(pu)



Σχήμα 4.3.2.4 Άεργος ισχύς

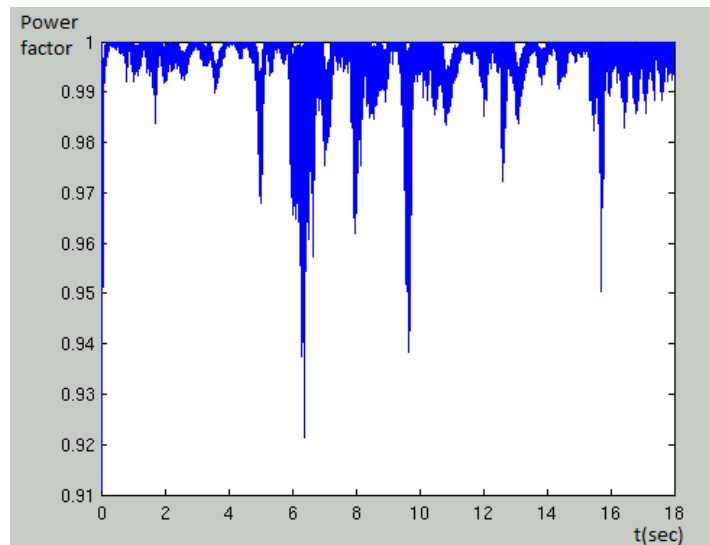
Βάσει της λειτουργίας του MPPT συστήματος που αναλύθηκε νωρίτερα, η ενεργός ισχύς και η ηλεκτρομαγνητική ροπή θα πρέπει να “ακολουθούν” τη διακύμανση του ανέμου, καθώς αυτή είναι η εντολή που δίνεται από το σύστημα ελέγχου. Όπως παρατηρείται στις κυματομορφές αυτό είναι κάτι που συμβαίνει και άρα εξάγεται το συμπέρασμα ότι η λειτουργία του συστήματος κρίνεται ικανοποιητική.

Τέλος, παρατίθεται η τάση της dc – διασύνδεσης, η οποία παραμένει σταθερή χωρίς να επηρεάζεται από τη διακύμανση των υπολοίπων μεγεθών λόγω του ανέμου. Ως εκ τούτου, συμπεραίνεται ότι το σύστημα στο συγκεκριμένο σημείο επιτελεί σωστά τη λειτουργία του.



Σχήμα 4.3.2.5 Τάση dc – διασύνδεσης

Σε πλήρη ακολουθία με την τάση της dc – διασύνδεσης βρίσκεται και ο συντελεστής ισχύος, ο οποίος είναι πολύ κοντά στη μονάδα εμφανίζοντας μικρή κυμάτωση, η οποία σε καμία περίπτωση δεν ξεπερνά τα προβλεπόμενα όρια.

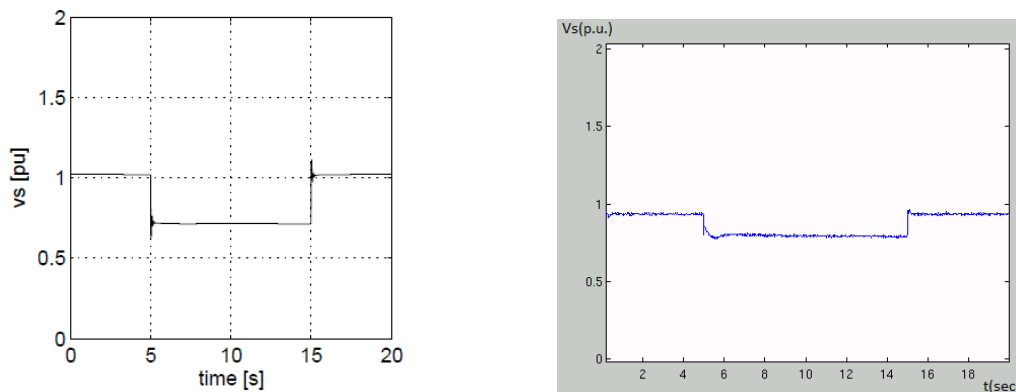


Σχήμα 4.3.2.6 Συντελεστής ισχύος

5 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου με αντίστοιχα της βιβλιογραφίας

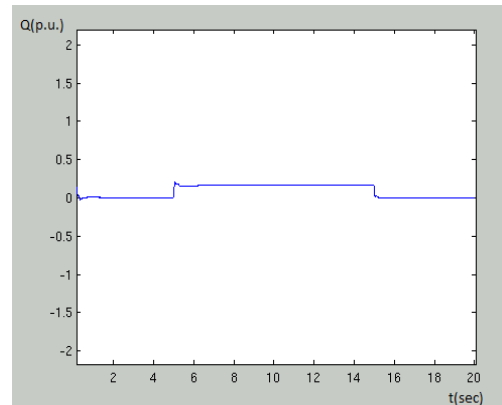
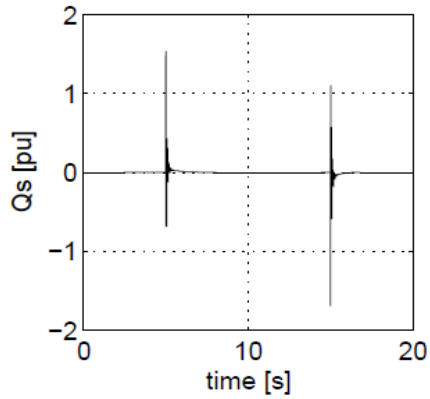
5.1 Περίπτωση λειτουργίας 1

Στην περίπτωση αυτή διενεργήθηκε μια πτώση τάσης κατά 30% της ονομαστικής τιμής για διάρκεια 10 sec. Εξετάζοντας, αρχικά, την καμπύλη αδιάλλειπτης λειτουργίας (**Εικόνα 1.6.1.5**), που έχει παρατεθεί παραπάνω, φαίνεται ότι είναι δυνατό να συμβεί ένα τέτοιο σφάλμα χωρίς την αποσύνδεση των Α/Γ. Το πρώτο μέγεθος που παρατηρείται και συγκρίνεται με την αντίστοιχη εργασία, είναι η τάση στο στάτη:



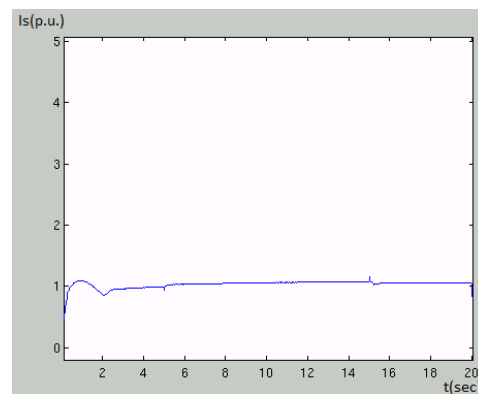
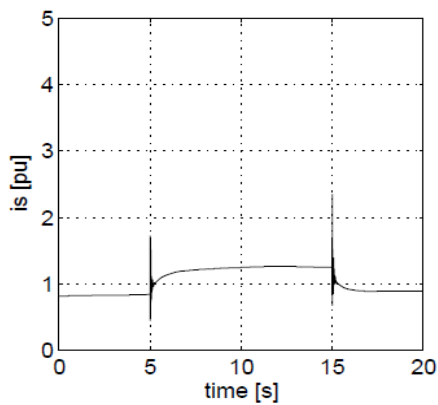
Σχήμα 5.1.1 Τάση στάτη συγκριθείσας (αριστερά) και παρούσας εργασίας (δεξιά)

Με απλή παρατήρηση των κυματομορφών διαπιστώνεται ότι το σύστημα, που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, επιτυγχάνει μερική αντιστάθμιση του σφάλματος σε αντίθεση με τη συγκριθείσα εργασία, στην οποία το σφάλμα του δικτύου μεταφέρεται αυτούσιο στο στάτη της Α/Γ. Η αντιστάθμιση αυτή αποτυπώνεται παρακάτω στην αύξηση της αέργου ισχύος (σταθερή παραμένει η άεργος ισχύς στο σύστημα της [7]).



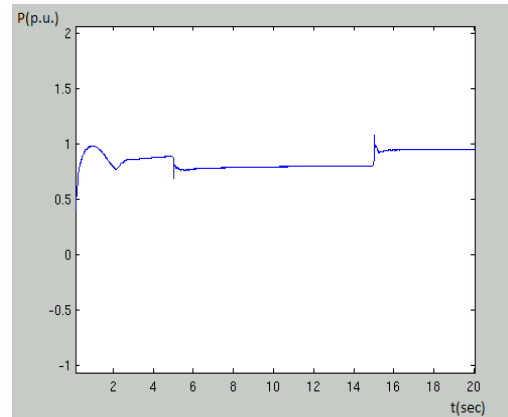
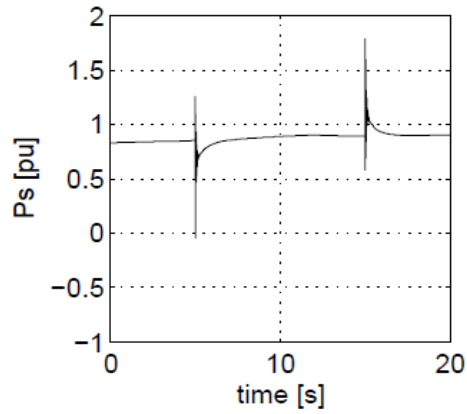
Σχήμα 5.1.2 Άεργος ισχύς A/Γ συγκριθείσας (αριστερά) και παρούσας εργασίας (δεξιά)

Δεδομένου ότι η άεργος ισχύς ελέγχεται στο διανυσματικό σύστημα ελέγχου, που έχει υλοποιηθεί, μέσω της d συνιστώσας του ρεύματος, είναι λογικό και επόμενο να παρατηρείται αύξηση σε αυτό. Έτσι:

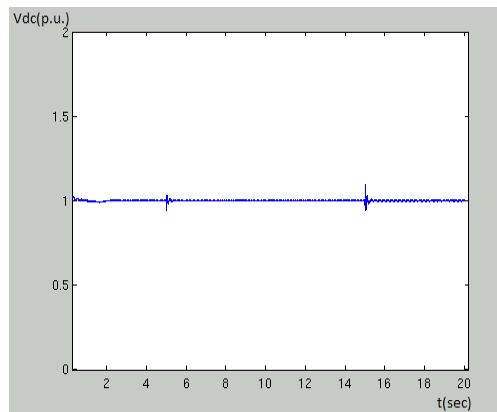
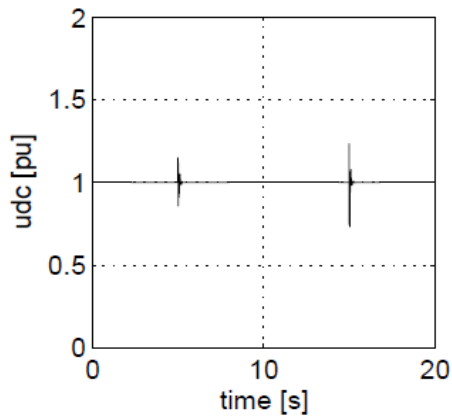


Σχήμα 5.1.3 Ρεύμα στάτη A/Γ συγκριθείσας (αριστερά) και παρούσας εργασίας (δεξιά)

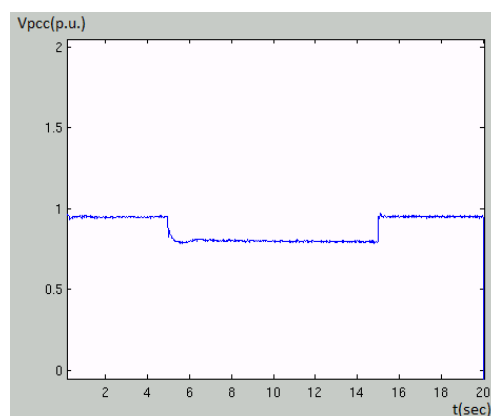
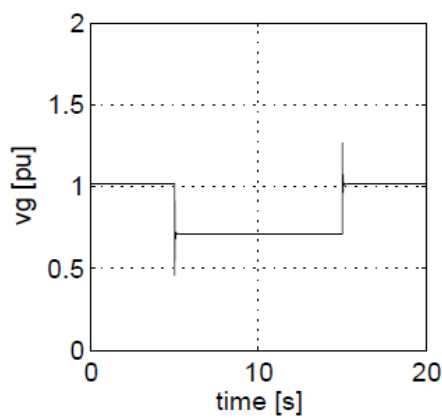
Σκόπιμο κρίνεται, ακόμη, να παρουσιαστούν οι κυματομορφές ορισμένων μεγεθών, ώστε να να κριθεί η λειτουργία του συστήματος μέσα από τη σύγκριση με αυτό της [7].



Σχήμα 5.1.4 Ενεργός ισχύς A/Γ συγκριθείσας (αριστερά) και παρούσας εργασίας (δεξιά)



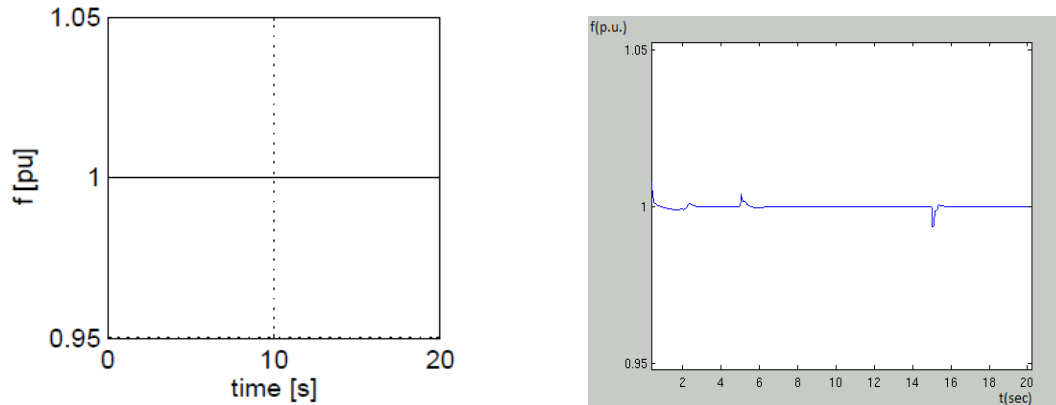
Σχήμα 5.1.5 Τάση dc – διασύνδεσης A/Γ συγκριθείσας (αριστερά) και παρούσας εργασίας (δεξιά)



Σχήμα 5.1.6 Τάση σημείου κοινής σύνδεσης A/Γ συγκριθείσας (αριστερά) και παρούσας εργασίας (δεξιά)

Η τάση του σημείου κοινής σύνδεσης μειώνεται πολύ περισσότερο από εκείνη του στάτη, που παρουσιάστηκε νωρίτερα (αυτό γιατί βρίσκεται πιο κοντά στο σφάλμα). Ωστόσο, κι εδώ παρατηρείται βελτίωση της τάξης του 10%, που είναι πολύ καλύτερα από το προς σύγκριση σύστημα.

Τέλος, παρατίθεται η συχνότητα λειτουργίας, ώστε να διαπιστωθεί αν συμβαίνουν σημαντικές διακυμάνσεις, οι οποίες είναι ανεπιθύμητες.

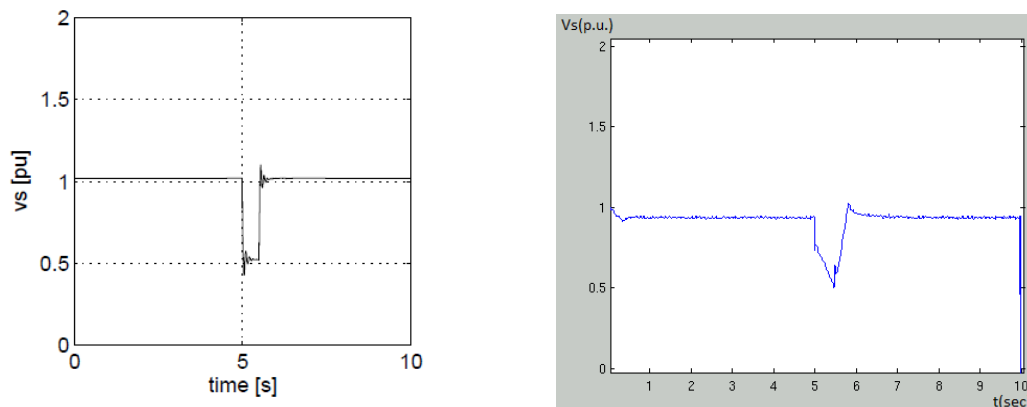


Σχήμα 5.1.7 Συχνότητα λειτουργίας A/Γ συγκριθείσας (αριστερά) και παρούσας εργασίας (δεξιά)

Μονάχα στο σύστημα της παρούσας εργασίας παρατηρούνται κατά τη διάρκεια του μεταβατικού φαινομένου δύο “καρφιά”, τα οποία όμως κρίνονται ανεπιθύμητα.

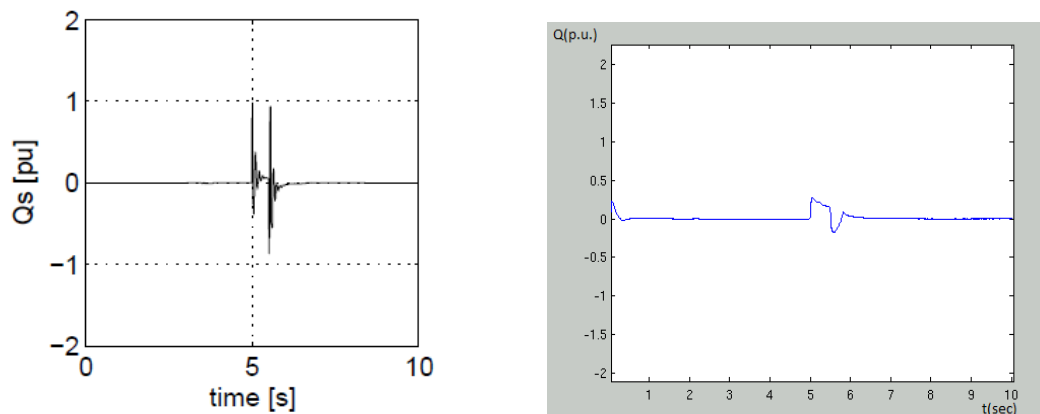
5.2 Περίπτωση λειτουργίας 2

Στην περίπτωση αυτή διενεργήθηκε πτώση τάσης κατά 50% της ονομαστικής για 0.5 sec. Παρακάτω θα παραθέσουμε κυματομορφές ενδεικτικές της λειτουργίας των συστημάτων ελέγχου των δύο αιολικών πάρκων.



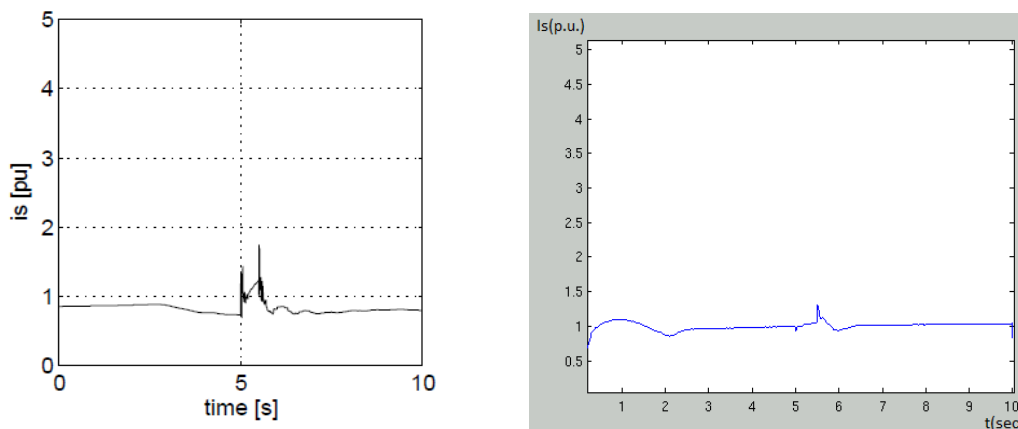
Σχήμα 5.2.1 Τάση στάτη συγκριθείσας (αριστερά) και παρούσας εργασίας (δεξιά)

Εύκολα παρατηρεί κανείς την αντιστάθμιση του σφάλματος που πετυχαίνει το σύστημα της παρούσας εργασίας έναντι της συγκριθείσας. Πιο συγκεκριμένα, βλέπουμε ότι η πτώση τάσης στο παρόν σύστημα είναι μικρότερη από 20%, ενώ στη συγκριθείσα εργασία το σφάλμα δεν αντισταθμίζεται. Αυτό είναι κάτι που επιτυγχάνεται με έγχυση αέργου ισχύος και αποτυπώνεται στην παρακάτω κυματομορφή.



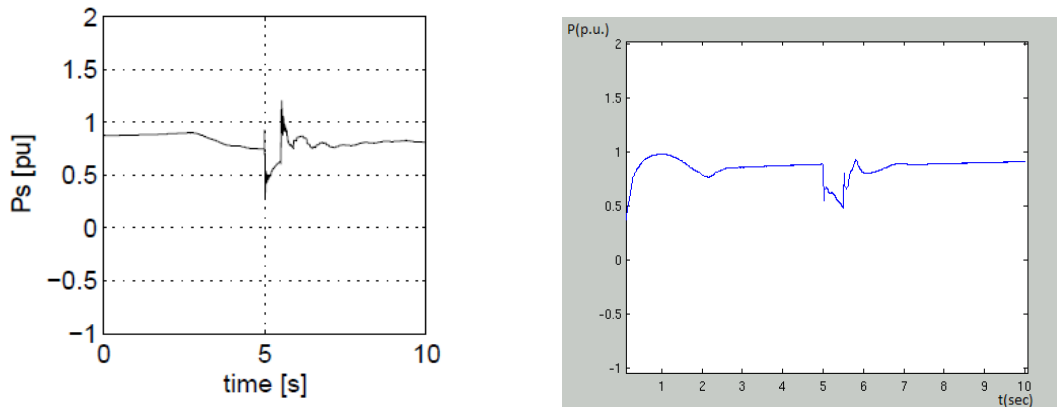
Σχήμα 5.2.2 Άεργος ισχύς συγκριθείσας (αριστερά) και παρούσας εργασίας (δεξιά)

Στη συγκριθείσα εργασία δε γίνεται έγχυση αέργου ισχύος αφού δεν συμβαίνει αντιστάθμιση.



Σχήμα 5.2.3 Ρεύμα στάτη συγκριθείσας (αριστερά) και παρούσας εργασίας (δεξιά)

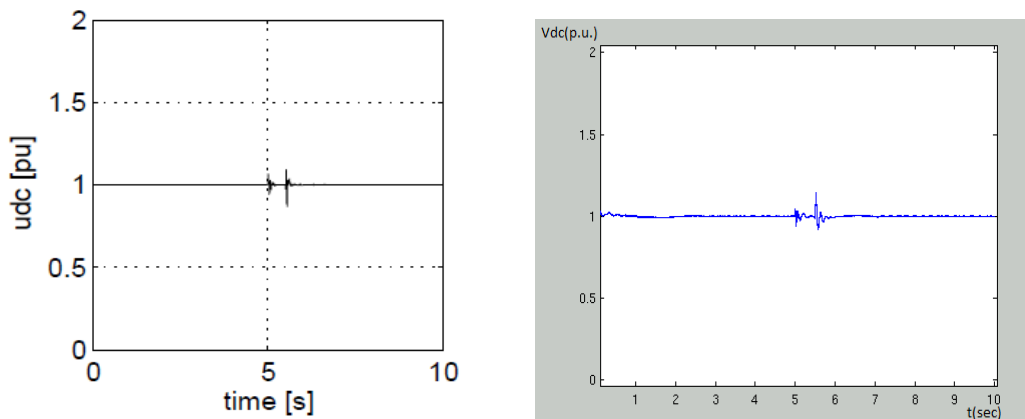
Για τον ίδιο λόγο παρατηρείται και η απότομη αύξηση του ρεύματος (μέσω της d συνιστώσας του ρεύματος ελέγχεται η άεργος ισχύς).



Σχήμα 5.2.4 Ενεργός ισχύς συγκριθείσας (αριστερά) και παρούσας εργασίας (δεξιά)

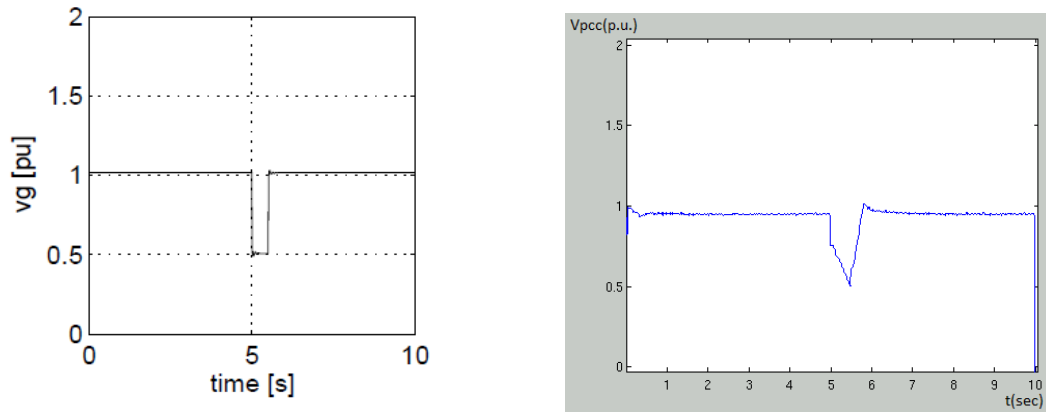
Καθαρά φαίνεται η αρκετά μεγάλη μείωση ενεργού ισχύος. Βεβαίως στο παρόν σύστημα είναι μικρότερη. Πάντως, η μείωση είναι μη επιθυμητή στη σημερινή εποχή που οι Α/Γ έχουν τόσο μεγάλη διείσδυση, καθώς κατά αυτό τον τρόπο θα προκύψει αναγκαστική απόρριψη φορτίου. Εν τούτοις, όταν η πτώση τάσης είναι τόσο μεγάλη απαιτείται σύστημα υψηλής ισχύος ώστε να αντισταθμιστεί.

Επιπλέον, παρά τα όσα συμβαίνουν για την αντιστάθμιση του σφάλματος η τάση της dc – διασύνδεσης θα πρέπει να παραμένει σταθερή, ώστε να εξασφαλίζεται μοναδιαίος συντελεστής ισχύος. Όπως φαίνεται παρακάτω, αυτό συμβαίνει και στα δύο συστήματα με άψογο τρόπο.



Σχήμα 5.2.5 Τάση dc – διασύνδεσης συγκριθείσας (αριστερά) και παρούσας εργασίας (δεξιά)

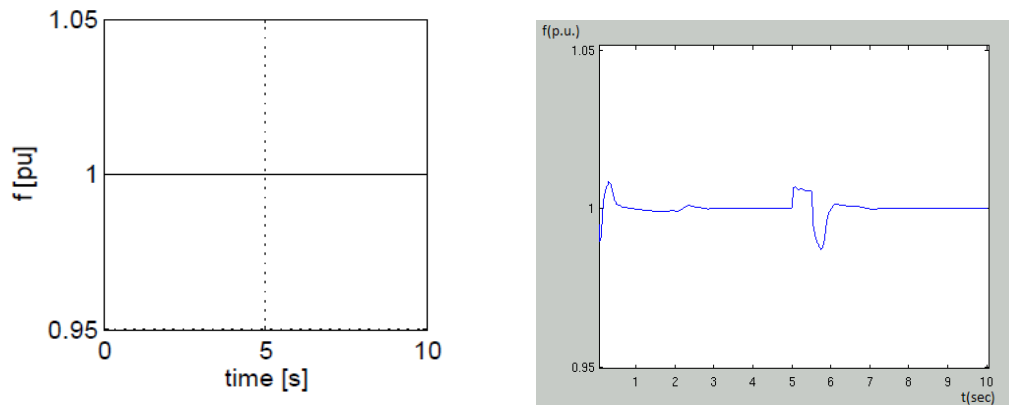
Σκόπιμο, επίσης, θεωρείται να παρουσιαστεί η τάση κατά τη διάρκεια του σφάλματος στο σημείο κοινής σύνδεσης.



Σχήμα 5.2.6 Τάση σημείου κοινής σύνδεσης κατά τη διάρκεια του σφάλματος

Όπως φαίνεται και στο σημείο αυτό, το σύστημα της παρούσας εργασίας λειτουργεί πιο αποδοτικά, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνει αντιστάθμιση του σφάλματος κατά 20%.

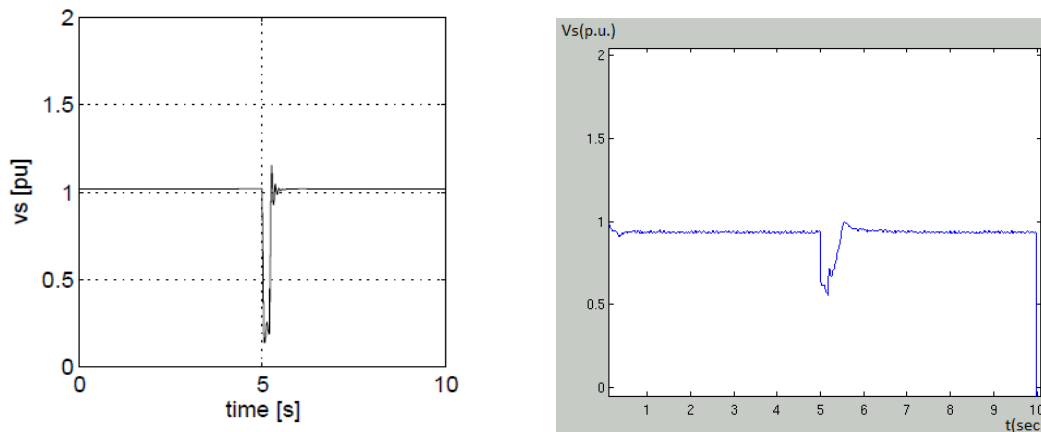
Τέλος, το μέγεθος που δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να υπόκειται σε μεταβολές είναι η συχνότητα και όπως φαίνεται και στα δύο συστήματα παραμένει κατά το δυνατόν σταθερή (μονάχα στο παρών σύστημα παρουσιάζεται αμελητέα μεταβολή της τάξης του 1%).



Σχήμα 5.2.7 Συχνότητα συστήματος συγκριθείσας (αριστερά) και παρούσας εργασίας (δεξιά)

5.3 Περίπτωση λειτουργίας 3

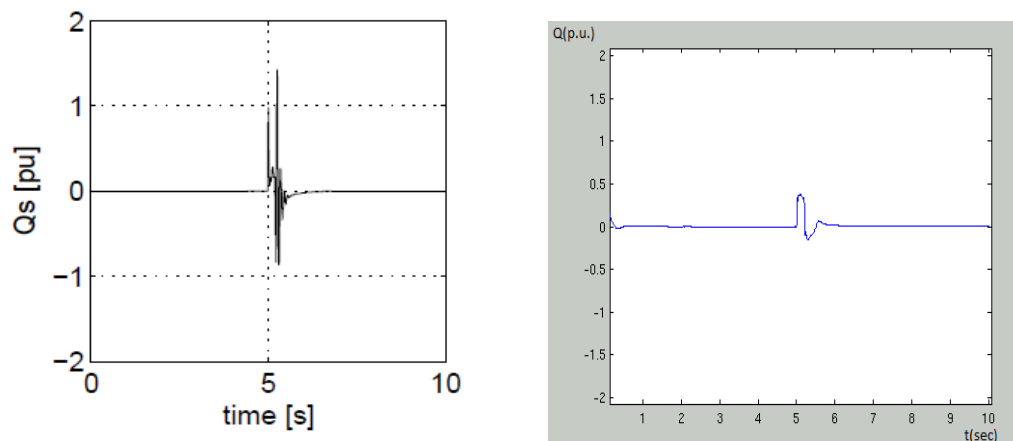
Κατά τη δοκιμή αυτή διενεργήθηκε πτώση τάσης κατά 85% της ονομαστικής τιμής. Όπως και στις προηγούμενες παραγράφους παρατίθενται κυματομορφές που επιδεικνύουν τη λειτουργία των δύο συστημάτων και συγκρίνονται.



Σχήμα 5.3.1 Τάση στάτη συγκριθείσας (αριστερά) και παρούσας εργασίας (δεξιά)

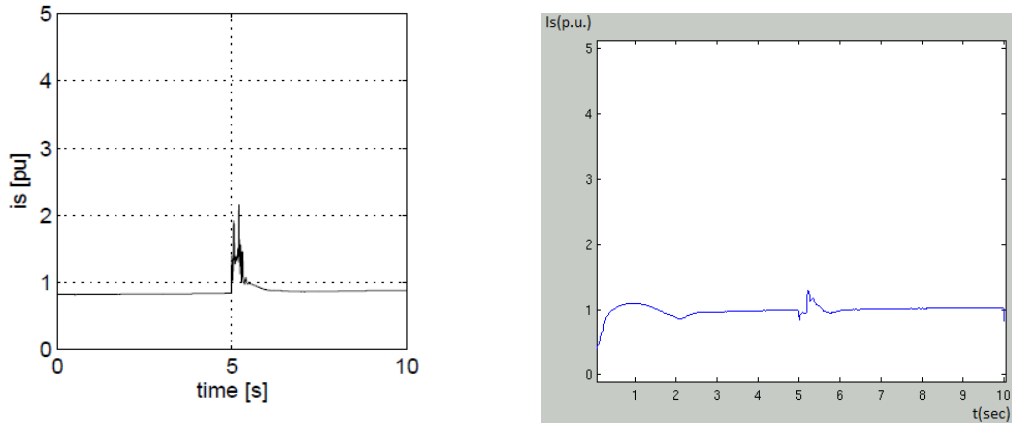
Παρατηρώντας την πτώση τάσης γίνεται φανερό ότι το σύστημα προβαίνει αποτελεσματικότερα σε διόρθωση της τάσης συγκρινόμενο με αυτό της εναλλακτικής εργασίας. Μάλιστα, στο σημείο αυτό να αναφερθεί ότι μια τόσο μεγάλη πτώση τάσης για χρόνο 0,2 sec δεν είναι επιτρεπτή βάσει των ελληνικών κανονισμών. Καθότι, όμως, η τάση διορθώνεται σε μεγάλο ποσοστό τελικά δε απαιτείται η αποσύνδεση του αιολικού πάρκου. Πιο συγκεκριμένα, λόγω της διόρθωσης, η τάση στο ζυγό του αιολικού πάρκου φτάνει περίπου στο 50% της ονομαστικής για ένα χρονικό διάστημα, που δεν αποτελεί πρόβλημα, και έτσι το σύστημα δεν αποσυνδέεται.

Η προαναφερθείσα διόρθωση τάσης επιτυγχάνεται μέσω έγχυσης αέργου ισχύος στο δίκτυο και έτσι εξηγούνται οι παρακάτω κυματομορφές.



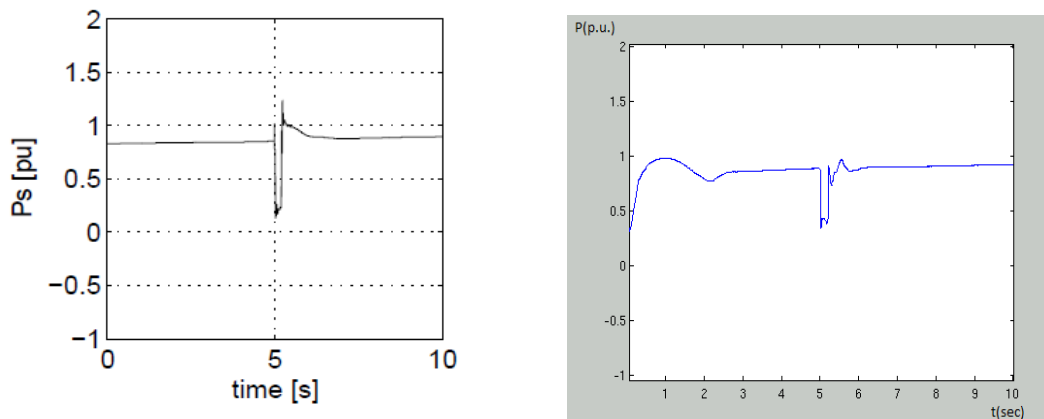
Σχήμα 5.3.2 Άεργος ισχύς συγκριθείσας (αριστερά) και παρούσας εργασίας (δεξιά)

Όπως έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, η άεργος ισχύς ελέγχεται μέσω του ρεύματος και ως εκ τούτου αναμένεται η αύξηση του κατά το διάστημα του σφάλματος, ώστε να δικαιολογηθεί η αυξημένη άεργος ισχύς.



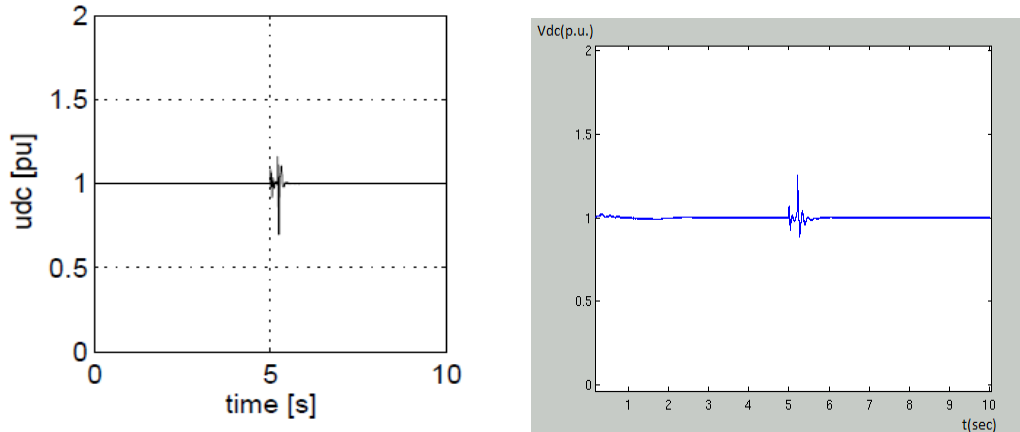
Σχήμα 5.3.3 Ρεύμα στάτη συγκριθείσας (αριστερά) και παρούσας εργασίας (δεξιά)

Ακόμη, παρουσιάζεται η ενεργός ισχύς. Όπως εύκολα παρατηρείται, η πτώση είναι πολύ έντονη (ως συνέπεια της πτώσης τάσης), ωστόσο το σύστημα της παρούσας εργασίας κινείται σε πολύ καλύτερα επίπεδα.



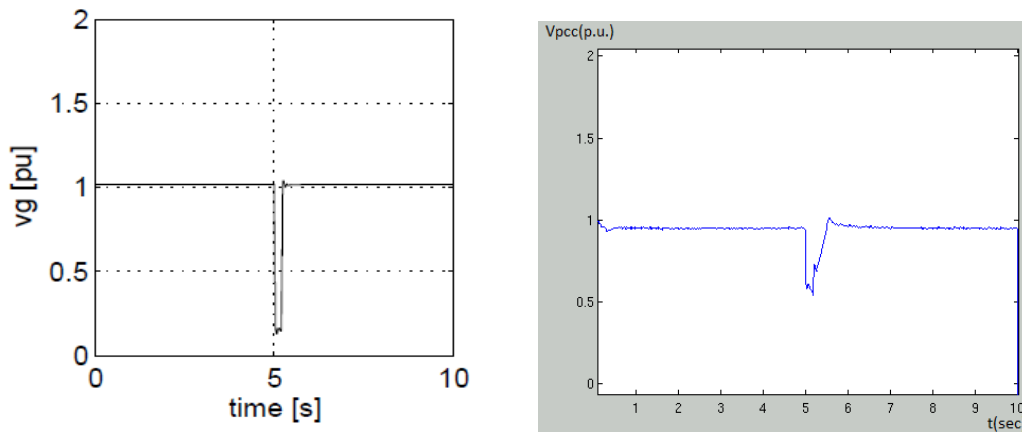
Σχήμα 5.3.4 Ενεργός ισχύς συγκριθείσας (αριστερά) και παρούσας εργασίας (δεξιά)

Ένα ακόμη σημαντικό μέγεθος, που πρέπει να παρουσιαστεί, είναι η τάση της dc – διασύνδεσης, η οποία δεν πρέπει να επηρεάζεται και άρα θα πρέπει να είναι σταθερή (ώστε να εξασφαλίζεται μοναδιαίος συντελεστής ισχύος). Παρατηρώντας τις επόμενες κυματομορφές αυτό επιτυγχάνεται το ίδιο αποτελεσματικά και στα δύο συστήματα.



Σχήμα 5.3.5 Τάση dc – διασύνδεσης συγκριθείσας (αριστερά) και παρούσας εργασίας (δεξιά)

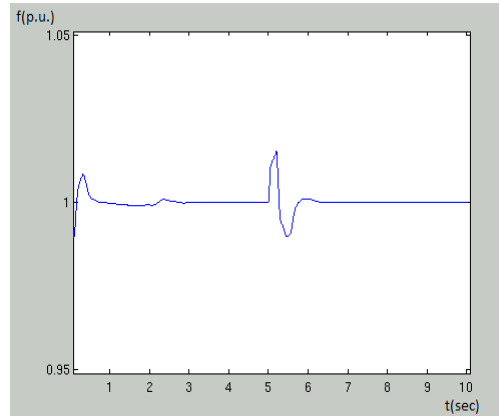
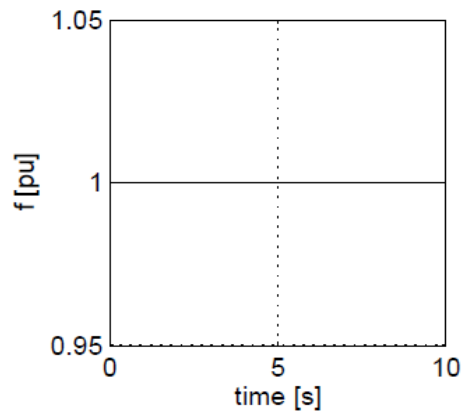
Επιπλέον, καθότι το σημείο κοινής σύνδεσης αποτελεί σημείο αναφοράς στους τεχνικούς κώδικες, παρουσιάζεται παρακάτω η τάση του κατά τη διάρκεια του σφάλματος.



Σχήμα 5.3.5 Τάση σημείου κοινής σύνδεσης συγκριθείσας (αριστερά) και παρούσας εργασίας (δεξιά)

Αντίστοιχα με την τάση στάτη, φαίνεται ότι και σε αυτό το σημείο είναι μειωμένη, με το σύστημα να επιτυγχάνει σημαντική διόρθωση με τον τρόπο, που αναλύθηκε παραπάνω.

Τέλος, παρατίθεται για λόγους πληρότητας η συχνότητα λειτουργίας των δύο συστημάτων, η οποία παραμένει ανεπηρέαστη από τις παραπάνω μεταβολές.



Σχήμα 5.3.7 Συχνότητα συστήματος συγκριθείσας (αριστερά) και παρούσας εργασίας (δεξιά)

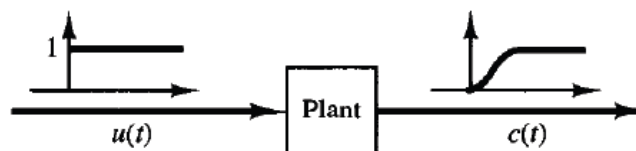
6 Βελτιστοποίηση κερδών ανάδρασης ελεγκτών

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, οι PI ελεγκτές ρυθμίστηκαν εμπειρικά με αλληπάλληλες δοκιμές. Η παραπάνω μέθοδος στη βιβλιογραφία είναι γνωστή ως “trial and error”. Προκειμένου, όμως, να παρουσιαστεί μια εναλλακτική προσέγγιση στα κέρδη αναδράσεων των ελεγκτών χρησιμοποιήθηκε και η μέθοδος των Ziegler – Nichols. Η εφαρμογή της μεθόδου αυτής οδήγησε σε νέα ζεύγη τιμών, τα οποία σε ορισμένες περιπτώσεις εμφανίζουν αποκλίσεις από τα προηγούμενα. Παρακάτω, λοιπόν, θα παρουσιαστεί αναλυτικά η μέθοδος Ziegler – Nichols και στη συνέχεια διενεργώντας ορισμένες περιπτώσεις λειτουργίας θα αποδειχθεί ότι ο ελεγκτής με τα νέα ζεύγη τιμών προβαίνει στην ίδια λειτουργία.

6.1 Ρύθμιση κατά Ziegler – Nichols

Οι Ziegler και Nichols πρότειναν κανόνες για τη ρύθμιση των PID ελεγκτών βασιζόμενοι είτε σε πειραματικές βηματικές αποκρίσεις είτε στην τιμή του K_p , η οποία οδηγεί σε οριακή ευστάθεια όταν χρησιμοποιείται μόνο ο αναλογικός έλεγχος. Σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση που δεν είναι γνωστό το μαθηματικό μοντέλο (όπως άλλωστε συμβαίνει και στην παρούσα εργασία). Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν δύο μέθοδοι ρύθμισης παραμέτρων, που αναπτύχθηκαν από τους Ziegler – Nichols, και στοχεύουν στον προσδιορισμό των τιμών του αναλογικού κέρδους K_p , του ολοκληρωτικού χρόνου T_i και του διαφορικού χρόνου T_d . Και στις δύο μεθόδους στόχος είναι να επιτευχθεί το πολύ 25% υπέρβαση (overshoot) κατά την εφαρμογή μιας βηματικής μεταβολής.

1^η μέθοδος : Στην πρώτη μέθοδο, εξετάζεται η απόκριση σε μια μοναδιαία βηματική είσοδο.

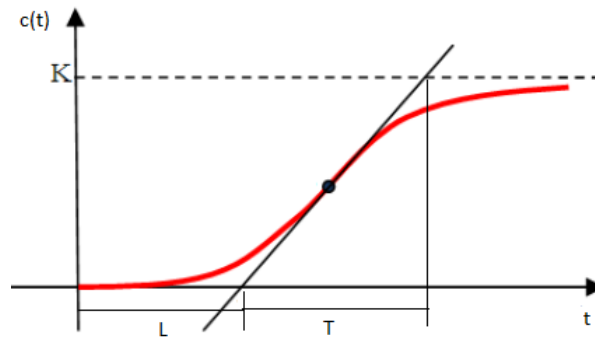


Εικόνα 6.1.1 Απόκριση PI ελεγκτή κατά την εφαρμογή της 1^{ης} μεθόδου

Αν το σύστημα δεν εμπλέκει ολοκληρωτές και κυρίαρχους συζυγείς πόλους, τότε η απόκριση θα πρέπει να έχει τη μορφή μιας καμπύλης σε σχήμα S, όπως φαίνεται παρακάτω (Αν η

καμπύλη δεν έχει αυτό το χαρακτηριστικό σχήμα, τότε η μέθοδος δεν εφαρμόζεται). Μια τέτοια βηματική απόκριση μπορεί να παραχθεί είτε πειραματικά είτε μέσω προσομοίωσης του συστήματος.

Η εν λόγω καμπύλη χαρακτηρίζεται από δύο σταθερές, το χρόνο καθυστέρησης L και τη χρονική σταθερά T . Οι δύο σταθερές προκύπτουν με την απεικόνιση της εφαπτομένης γραμμής στο σημείο καμψής της καμπύλης και τις διασταυρώσεις αυτής με τον άξονα χρόνου και τη γραμμή $c(t) = K$.



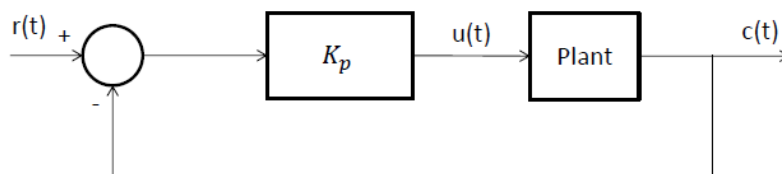
Εικόνα 6.1.2 Βηματική απόκριση του συστήματος

Οι Ziegler – Nichols πρότειναν να ορίζονται οι τιμές των K_p , T_i και T_d όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

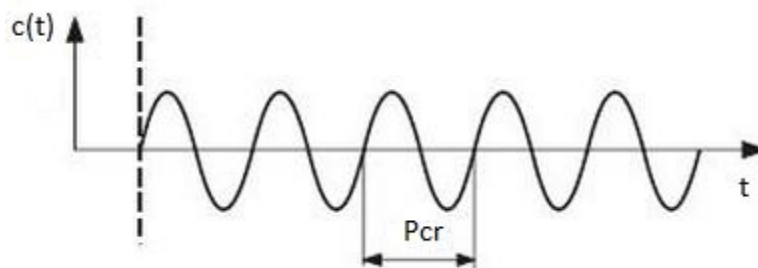
| Είδος ελεγκτή | K_p | T_i | T_d |
|---------------|-------------------------|-----------------|--------|
| P | $\frac{T}{L}$ | ∞ | 0 |
| PI | $0.9 \cdot \frac{T}{L}$ | $\frac{L}{0.3}$ | 0 |
| PID | $1.2 \cdot \frac{T}{L}$ | $2L$ | $0.5L$ |

Πίνακας 3. Προσδιορισμός παραμέτρων σύμφωνα με την 1^η μέθοδο Ziegler – Nichols

2^η μέθοδος : Στη δεύτερη μέθοδο τίθεται $T_i = \infty$ και $T_d = 0$. Χρησιμοποιώντας μόνο τον αναλογικό έλεγχο, αυξάνεται η τιμή του K_p από το 0 ως μια κρίσιμη τιμή K_{cr} όπου η απόκριση εμφανίζει διαρκείς ταλαντώσεις (Αν η απόκριση δεν ταλαντώνει, τότε η μέθοδος δεν εφαρμόζεται). Η κρίσιμη τιμή K_{cr} και η αντίστοιχη περίοδος P_{cr} προκύπτουν όπως φαίνεται στο διάγραμμα παρακάτω.



Εικόνα 6.1.3: PI ελεγκτής μόνο με αναλογική δράση



Εικόνα 6.1.4: Απόκριση συστήματος με εφαρμογή της μεθόδου

Όπως έχει προταθεί από τους Ziegler – Nichols οι παράμετροι του ελεγκτή ορίζονται σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα.

| Είδος ελεγκτή | K_p | T_i | T_d |
|---------------|---------------------|------------------------------|----------------------|
| P | $0.5 \cdot K_{cr}$ | ∞ | 0 |
| PI | $0.45 \cdot K_{cr}$ | $\frac{1}{1.2} \cdot P_{cr}$ | 0 |
| PID | $0.6 \cdot K_{cr}$ | $0.5 \cdot P_{cr}$ | $0.125 \cdot P_{cr}$ |

Πίνακας 4. Προσδιορισμός παραμέτρων σύμφωνα με την 2^η μέθοδο Ziegler – Nichols

6.2 Εφαρμογή της μεθόδου στους PI ελεγκτές της παρούσας εργασίας

Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί η δεύτερη μέθοδος για τη ρύθμιση των PI ελεγκτών. Συγκεκριμένα, ο έλεγχος περιλαμβάνει PI ελεγκτές τόσο στο μετατροπέα από την πλευρά του δρομέα όσο και στο μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου. Επιπλέον, περιλαμβάνεται PI ελεγκτής, που εξυπηρετεί στην ανεύρεση σημείου παροχής μέγιστης ισχύος (MPPT). Χάριν ευκολίας, η ρύθμιση κάθε PI διενεργήθηκε ανεξάρτητα από τη λειτουργία των υπολοίπων και στο τέλος ελέγχθηκε αν τα ζεύγη τιμών οδηγούν σε ικανοποιητική λειτουργία του συστήματος. Παρακάτω αναλύεται η ρύθμιση κάθε PI ελεγκτή.

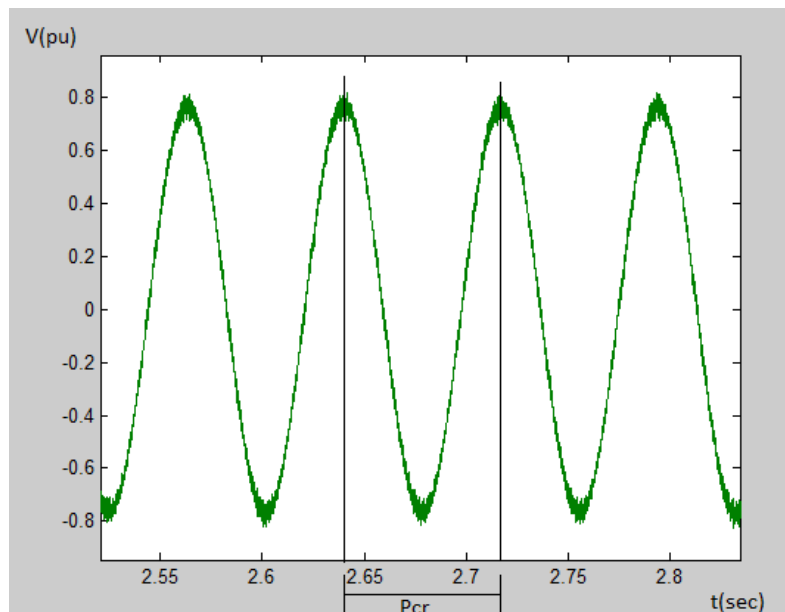
PI ελεγκτής στο μετατροπέα από την πλευρά του δρομέα

Στο σημείο αυτό, απειρίζεται ο ολοκληρωτικός χρόνος και ως εκ τούτου παραμένει μόνο ο αναλογικός έλεγχος. Ύστερα από διάφορες προσομοιώσεις διαμορφώθηκε ο παρακάτω πίνακας για τα χαρακτηριστικά μεγέθη της μεθόδου:

| K_{cr} | P_{cr} |
|------------|-------------------------|
| 0 | Μη ευκρινής κυματομορφή |
| 0.01 | Μη ευκρινής κυματομορφή |
| 1 | 0.075 |
| 0.8 | 0.08 |
| 1000 | 0.05 |

Πίνακας 5. Εφαρμογή της μεθόδου στον PI ελεγκτή από την πλευρά του δρομέα

Ενδεικτικά παρατίθεται η κυματομορφή για $K_{cr} = 0.8$ δεδομένου ότι στην τιμή αυτή επιτεύχθηκε η καλύτερη κυμάτωση.



Εικόνα 6.2.1 Ταλαντούμενη απόκριση μετά από εφαρμογή αναλογικής δράσης στον PI ελεγκτή

Σύμφωνα με τον πίνακα προκύπτουν οι παρακάτω τιμές για τον PI:

$$K_p = 0.45 \cdot 0.8 = 0.36 \quad (6.1)$$

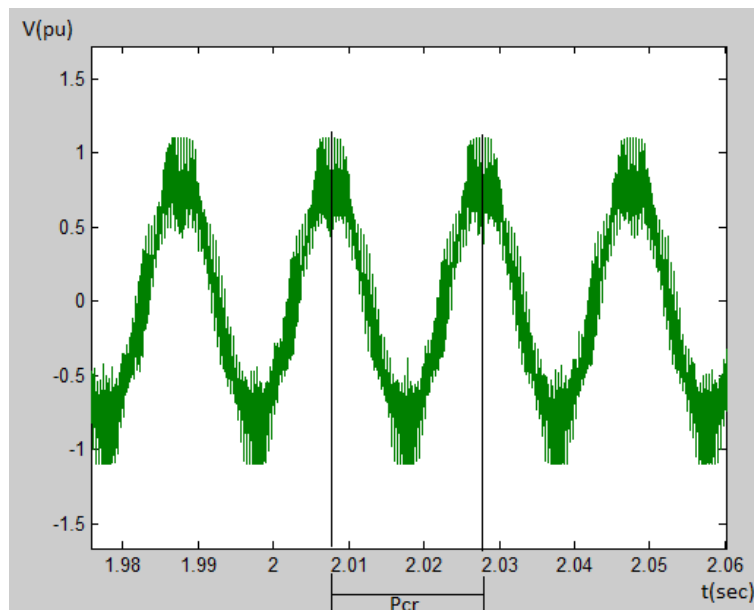
$$T_i = \frac{1}{1.2} \cdot 0.08 = 0.067 \quad (6.2)$$

PI ελεγκτής στο μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου

Ο μετατροπέας από την πλευρά του δικτύου χρησιμοποιεί δύο PI ελεγκτές. Η ρύθμιση τους έγινε με την παραπάνω διαδικασία και προέκυψαν οι παρακάτω πίνακες:

| K_{cr} | P_{cr} |
|----------|-------------------------|
| 0.01 | 0.0205 |
| 1 | 0.0185 |
| 5 | 0.02 |
| 700 | Μη ευκρινής κυματομορφή |

Πίνακας 6. Εφαρμογή της μεθόδου στον PI ελεγκτή από την πλευρά του δικτύου



Εικόνα 6.2.2 Ταλαντούμενη απόκριση μετά από εφαρμογή αναλογικής δράσης στον PI ελεγκτή

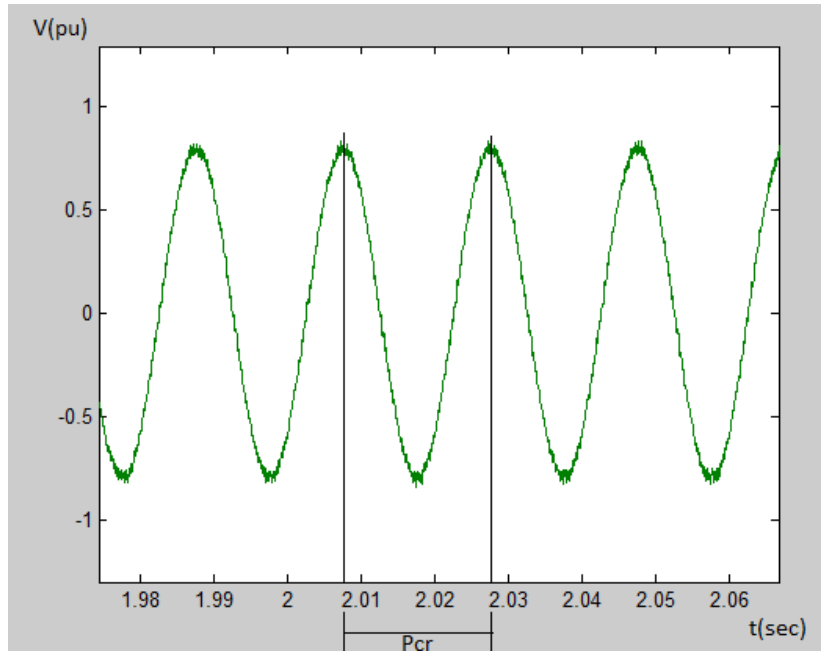
Συμπεπώς :

$$K_p = 0.45 \cdot 5 = 2.25 \quad (6.3)$$

$$T_i = \frac{1}{1.2} \cdot 0.02 = 0.017 \quad (6.4)$$

| K_{cr} | P_{cr} |
|------------|-------------|
| 1 | 0.018 |
| 1.2 | 0.02 |

Πίνακας 7. Εφαρμογή της μεθόδου στον PI ελεγκτή από την πλευρά του δικτύου



Εικόνα 6.2.3 Ταλαντούμενη απόκριση μετά από εφαρμογή αναλογικής δράσης στον PI ελεγκτή

Έτσι :

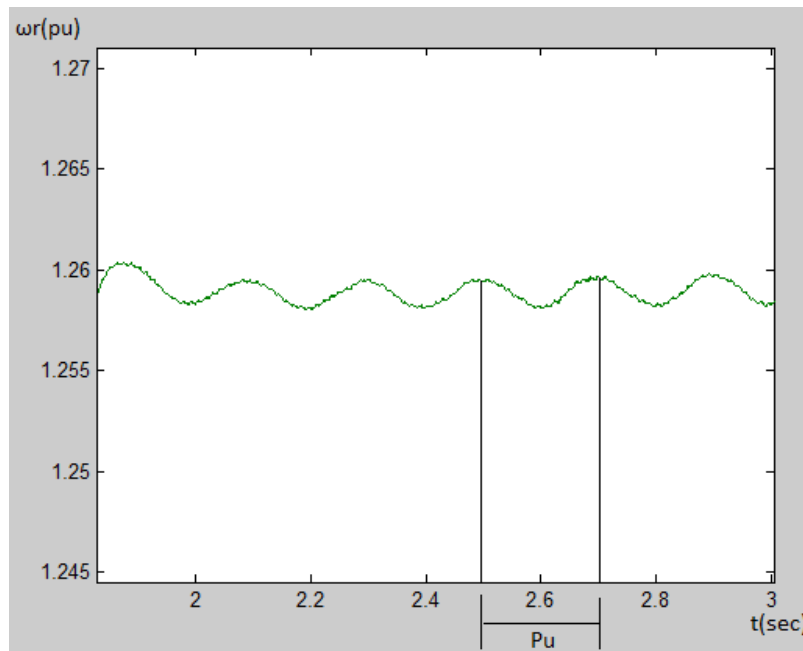
$$K_p = 0.45 \cdot 1.2 = 0.54 \quad (6.5)$$

$$T_i = \frac{1}{1.2} \cdot 0.02 = 0.017 \quad (6.6)$$

PI ελεγκτής για MPPT λειτουργία

Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιήθηκε μια παραλλαγή της 2^{ης} μεθόδου των Ziegler – Nichols γνωστή ως relay – based PID tuning. Κατά τη μέθοδο αυτή ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

1. Αντικαθίσταται ο PI ελεγκτής με ένα relay – block πλάτους d.
2. Προσομοιώνεται η λειτουργία του συστήματος και καταγράφεται η απόκριση πλάτους a και περιόδου P.
3. Η απόλυτη περίοδος ισούται με την παρατηρούμενη περίοδο, $P_u=P$, ενώ το απόλυτο κέρδος είναι αντιστρόφως ανάλογο με το παρατηρούμενο πλάτος ως εκ της $K_u = \frac{4d}{\pi a}$.



Εικόνα 6.2.4 Ταλαντούμενη απόκριση μετά από εφαρμογή της μεθόδου relay – based PID tuning

Από τη γραφική παράσταση προκύπτουν τα εξής:

$$P_u=0.2 \quad (6.7)$$

$$\alpha=0,0013 \quad (6.8)$$

$$d=2 \quad (6.9)$$

$$\text{Άρα, } K_u=2547.77 \Rightarrow \begin{cases} K_p = 1146.5 \\ T_i = 0.183 \end{cases} \quad (6.10)$$

Αποτέλεσμα της μεθόδου των Ziegler – Nichols είναι η ρύθμιση των κερδών αναδράσεων των PI ελεγκτών. Συχνά, όμως, απαιτείται περαιτέρω ρύθμιση μέσω δοκιμών ώστε να γίνουν βέλτιστες οι τιμές. Αυτό συνέβει και στην παρούσα εργασία, οπότε οι τελικές τιμές απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα σε άμεση αντιπαραβολή με τις τιμές του τυπικού ελεγκτή, που χρησιμοποιήθηκε νωρίτερα:

| Χαρακτηριστικό μέγεθος | Τιμή τυπικού ελεγκτή | Τιμή βελτιστοποιημένου ελεγκτή |
|------------------------------|----------------------|--------------------------------|
| K_p (rotor side converter) | 10 | 0.46 |
| K_i (rotor side converter) | 50 | 5 |
| K_p (MPPT) | 3 | 3 |
| K_i (MPPT) | 0.6 | 0.183 |
| K_p (dc – διασύνδεση) | 0.39 | 2.25 |
| K_i (dc – διασύνδεση) | 38 | 20 |
| K_p (grid side converter) | 10 | 0.54 |
| K_i (grid side converter) | 50 | 0.017 |

Πίνακας 8. Σύγκριση κερδών αναδράσεων των δύο ελεγκτών

Επιπλέον, αναζητήθηκε πρότυπη γεννήτρια ώστε να δοκιμαστεί ο βελτιστοποιημένος δρομέας. Παρακάτω φαίνονται οι λεπτομερείς τιμές ηλεκτρικού μέρους της πρότυπης γεννήτριας σε σύγκριση με αυτές της προηγούμενης:

| Χαρακτηριστικά γεννήτριας | Αρχική γεννήτρια | Πρότυπη γεννήτρια |
|----------------------------------|------------------|-------------------|
| Αντίσταση στάτη R_s (pu) | 0.0098 | 0.02308 |
| Αυτεπαγωγή στάτη X_s (pu) | 0.196 | 0.16020 |
| Αντίσταση δρομέα R_r (pu) | 0.013 | 0.01233 |
| Αυτεπαγωγή δρομέα X_r (pu) | 0.22 | 0.26316 |
| Αμοιβαία επαγωγή X_m (pu) | 7.39 | 3.2013 |
| Ονομαστικής ισχύς P_{nom} (MW) | 2.75 | 0.2 |

Πίνακας 9. Σύγκριση χαρακτηριστικών τιμών των δύο γεννητριών

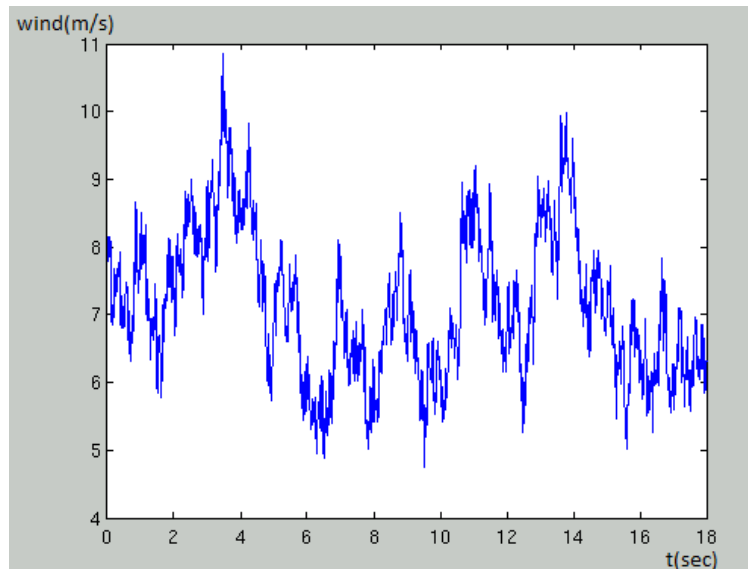
Χρησιμοποιώντας τις ανωτέρω τιμές διενεργήθηκαν οι δοκιμές του 4^{ου} κεφαλαίου για να επιβεβαιωθεί η λειτουργία του ελεγκτή.

6.3 Απόκριση του συστήματος στις εξετασθείσες περιπτώσεις λειτουργίας και σύγκριση μεταξύ των δύο ελεγκτών

Στις επόμενες υποενότητες θα παρουσιαστούν οι περιπτώσεις λειτουργίας του 4^{ου} κεφαλαίου και θα συγκριθούν οι αποκρίσεις του συστήματος με τους δύο ελεγκτές.

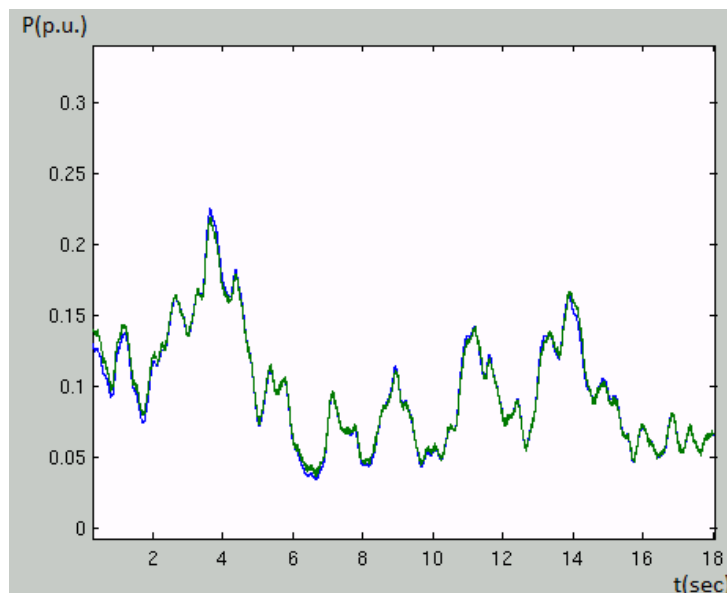
6.3.1 Κανονική λειτουργία

Εισάγεται στο σύστημα η παρακάτω ανεμοσειρά για να διαπιστωθεί η κανονική λειτουργία του συστήματος τόσο με τον τυπικό όσο και με το βελτιστοποιημένο ελεγκτή.

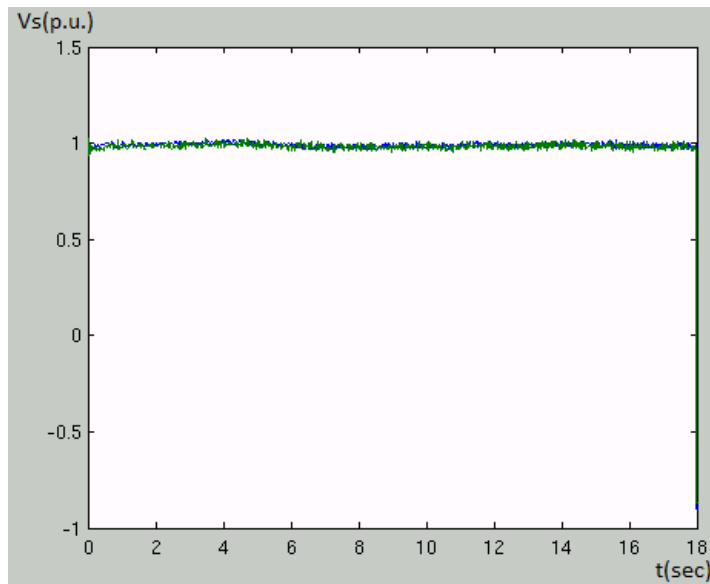


Σχήμα 6.3.1.1 Ανεμοσειρά για τη διαπίστωση κανονικής λειτουργίας του συστήματος

Η ενεργός ισχύς ακολουθεί την ανεμοσειρά και η τάση παραμένει σταθερή και στα δύο συστήματα όπως αποτυπώνεται παρακάτω.

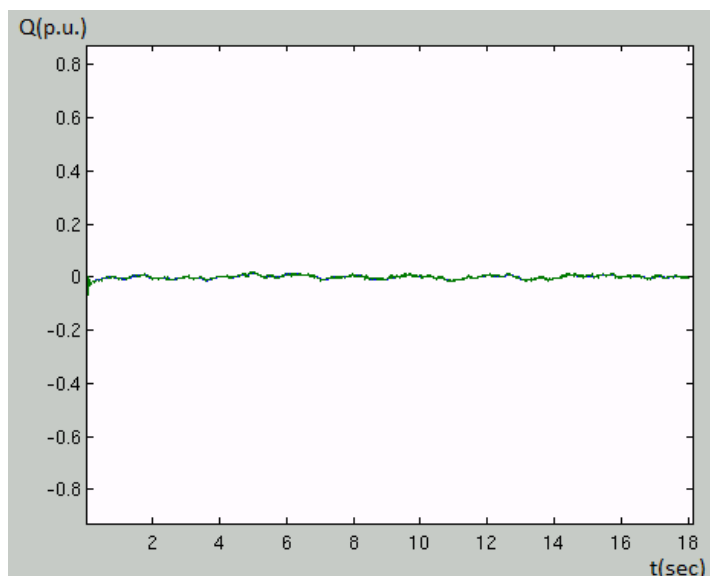


Σχήμα 6.3.1.2 Ενεργός ισχύς συστήματος με τη λειτουργία του τυπικού (μπλέ γραμμή) και του βελτιστοποιημένου ελεγκτή (πράσινη)



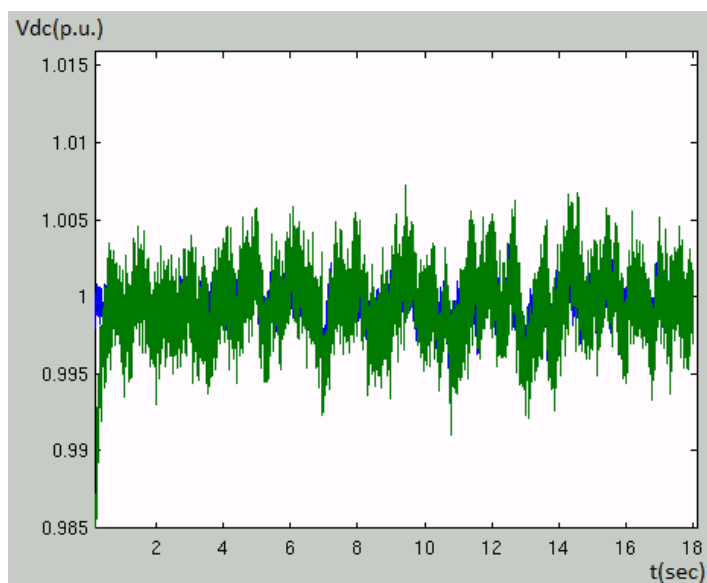
Σχήμα 6.3.1.3 Τάση στάτη με τη λειτουργία του τυπικού (μπλέ γραμμή) και του βελτιστοποιημένου ελεγκτή (πράσινη)

Ακόμη, θα πρέπει να είναι σταθερή η άεργος ισχύς προκειμένου να είναι μοναδιαίος ο συντελεστής ισχύος. Σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα δεν παρατηρείται απόκλιση με κανέναν από τους δύο ελεγκτές.



Σχήμα 6.3.1.4 Άεργος ισχύς με τη λειτουργία του τυπικού (μπλέ γραμμή) και του βελτιστοποιημένου ελεγκτή (πράσινη)

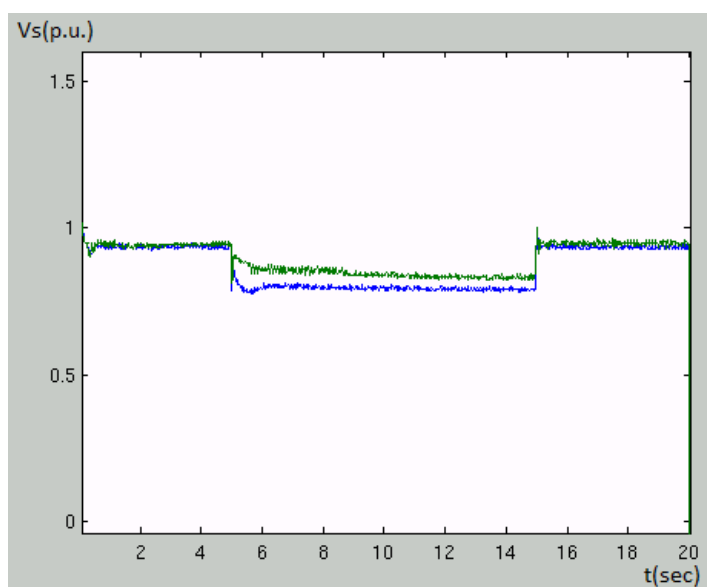
Όπως έχει αναφερθεί και νωρίτερα, η τάση της dc – διασύνδεσης θα πρέπει πάντα να είναι σταθερή, ώστε να εξασφαλίζεται μοναδιαίος συντελεστής ισχύος. Για το λόγο αυτό, παρατίθεται το επόμενο διάγραμμα, το οποίο απεικονίζει την εν λόγω τάση κατά τη διάρκεια επιβολής της ανεμοσειράς.



Σχήμα 6.3.1.5 Τάση dc – διασύνδεσης με λειτουργία του τυπικού (μπλέ γραμμή) και του βελτιστοποιημένου ελεγκτή (πράσινη)

6.3.2 Βύθιση της τάσης κατά 30% για 10 sec (περίπτωση λειτουργίας 1)

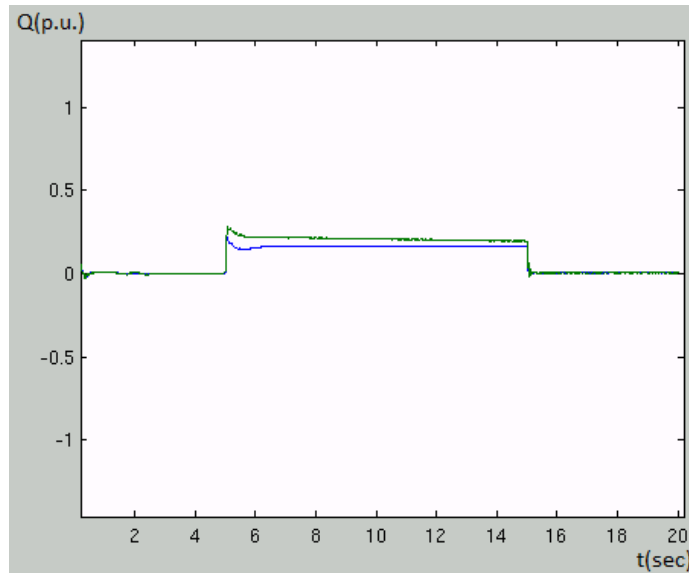
Όπως και στο κεφάλαιο 4 πρώτα διερευνήθηκε η περίπτωση βύθισης της τάσης κατά 30% για 10 sec. Παρακάτω παρατίθενται σε άμεση σύγκριση οι κυματομορφές για τους δύο ελεγκτές.



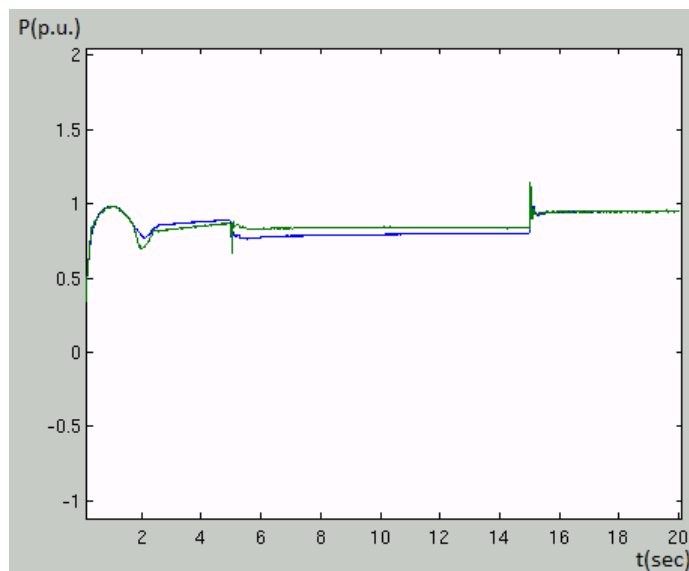
Σχήμα 6.3.2.1 Τάση στάτη με λειτουργία του τυπικού (μπλέ γραμμή) και του βελτιστοποιημένου ελεγκτή (πράσινη)

Παρατηρώντας την ανωτέρω κυματομορφή σημαντικό είναι να τονιστεί ότι ο βελτιστοποιημένος ελεγκτής υποστηρίζει αποτελεσματικότερα την τάση, καθώς κατά τη διάρκεια του σφάλματος η τάση στάτη εμφανίζεται υψηλότερη κατά τη λειτουργία του.

Αφού ο βελτιστοποιημένος ελεγκτής υποστηρίζει καλύτερα την τάση, επόμενο είναι ότι θα προβαίνει σε μεγαλύτερη έγχυση αέργου ισχύος κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Για την επιβεβαίωση του ισχυρισμού αυτού παρατίθεται το παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 6.3.2.2 Άεργος ισχύς με λειτουργία του τυπικού (μπλέ γραμμή) και του βελτιστοποιημένου ελεγκτή (πράσινη)

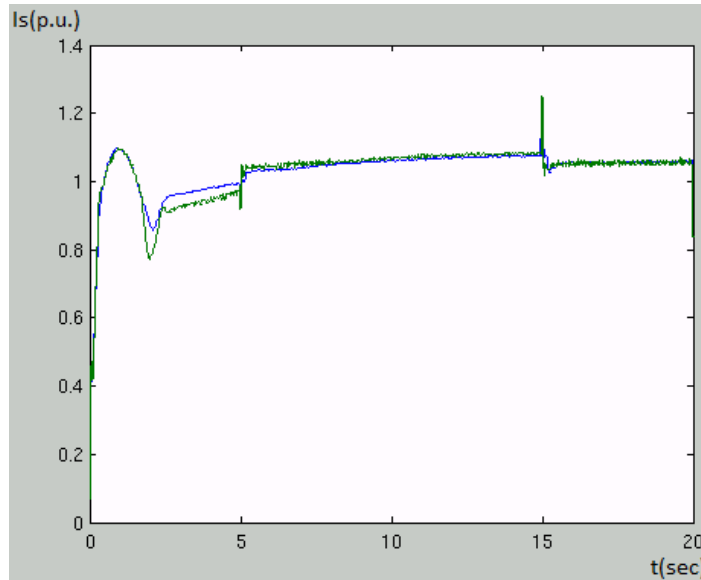


Σχήμα 6.3.2.3 Ενεργός ισχύς με λειτουργία του τυπικού (μπλέ γραμμή) και του βελτιστοποιημένου ελεγκτή (πράσινη)

Ακόμη, παρουσιάζεται η ενεργός ισχύς, η οποία εμφανίζεται μειωμένη λόγω της βύθισης τάσης. Ωστόσο, παρατηρείται και εδώ η καλύτερη συμπεριφορά του βελτιστοποιημένου

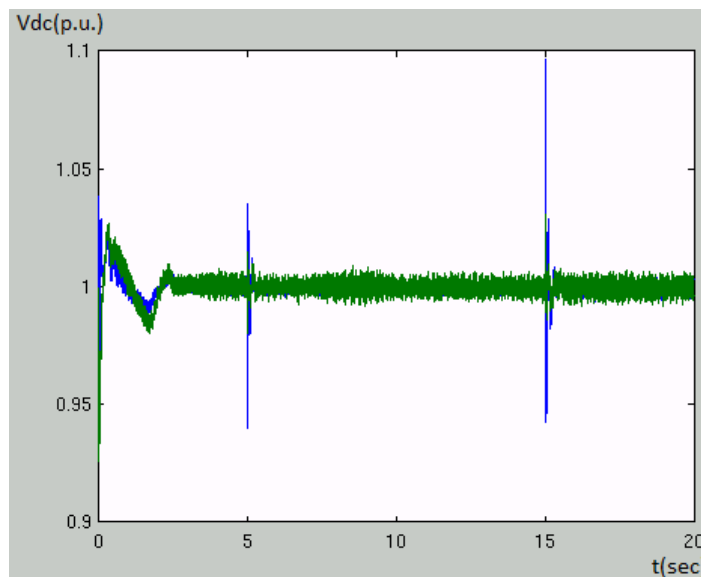
ελεγκτή, αφού η μείωση που έχει υποστεί η ενεργός ισχύς κατά τη λειτουργία του είναι σημαντικά μικρότερη.

Για να εξηγηθεί η αύξηση της αέργου ισχύος στο εν λόγω σύστημα θα πρέπει να παρατηρείται αύξηση του ρεύματος. Έτσι, :



Σχήμα 6.3.2.4 Ρεύμα στάτη με λειτουργία του τυπικού (μπλέ γραμμή) και του βελτιστοποιημένου ελεγκτή (πράσινη)

Τέλος, παρατίθεται η τάση της dc - διασύνδεσης, η οποία είναι σταθερή και έτσι εξασφαλίζεται μοναδιαίος συντελεστής ισχύος.

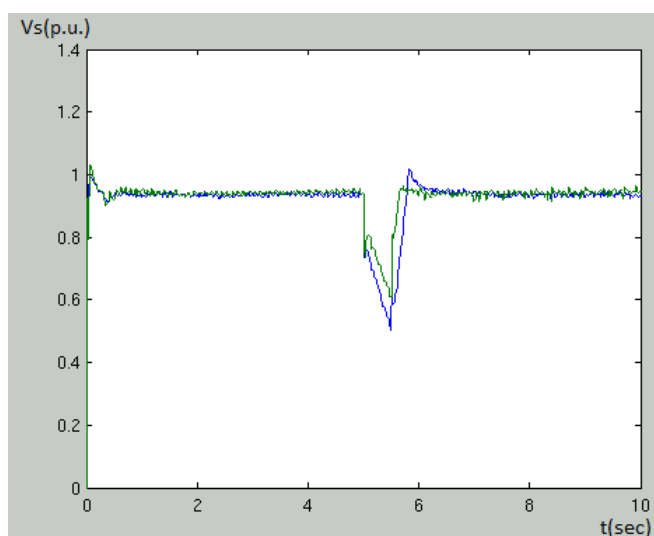


Σχήμα 6.3.2.5 Τάση dc - διασύνδεσης με λειτουργία του τυπικού (μπλέ γραμμή) και του βελτιστοποιημένου ελεγκτή (πράσινη)

6.3.3 Βύθιση της τάσης κατά 50% για 0.5 sec (περίπτωση λειτουργίας 2)

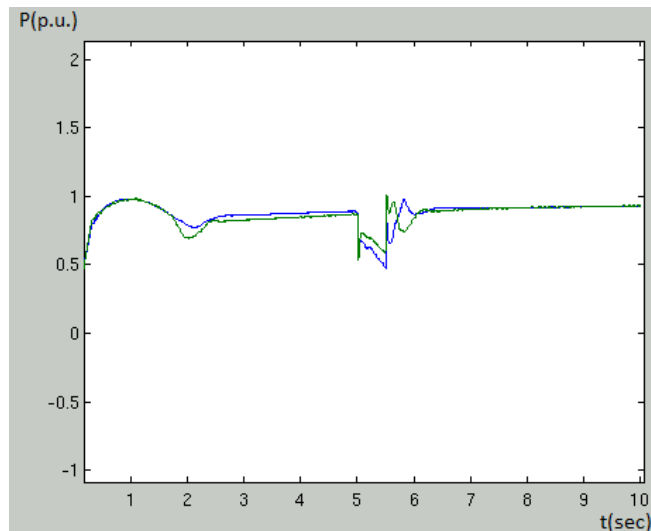
Στην περίπτωση αυτή διενεργήθηκε βύθιση τάσης κατά 50% για 0.5 sec. Παρακάτω παρατίθενται οι κυριότερες κυματομορφές για τους δύο ελεγκτές.

Αρχικά, φαίνεται η τάση του στάτη, ώστε να εξακριβωθεί κατά πόσο συμβάλλει στην υποστήριξη τάσης ο ελεγκτής.



Σχήμα 6.3.3.1 Τάση στάτη κατά τη βύθιση τάσης με τη λειτουργία του τυπικού (μπλέ γραμμή) και του βελτιστοποιημένου ελεγκτή (πράσινη γραμμή)

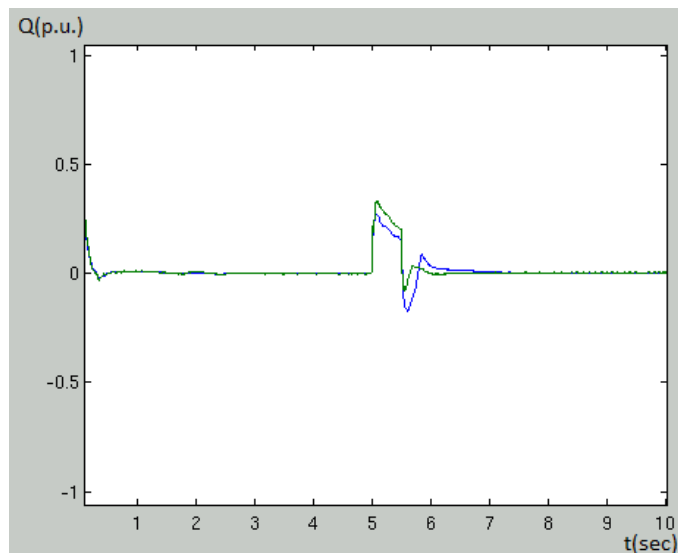
Αυτό που παρατηρείται στο παραπάνω διάγραμμα είναι ότι με το βελτιστοποιημένο ελεγκτή συμβαίνει μικρότερη βύθιση τάσης στο στάτη. Επιπλέον, μετά την αφαίρεση της διαταραχής η τάση επανέρχεται πιο γρήγορα στην ονομαστική της τιμή (στον τυπικό ελεγκτή η τάση οδηγείται σε υπέρβαση πριν επανέλθει στην ονομαστική της τιμή.) Αυτές οι δύο παρατηρήσεις υποδηλώνουν καλύτερη λειτουργία του βελτιστοποιημένου ελεγκτή.



Σχήμα 6.3.3.2 Ενεργός ισχύς κατά τη βύθιση τάσης με τη λειτουργία του τυπικού (μπλέ γραμμή) και του βελτιστοποιημένου ελεγκτή (πράσινη γραμμή)

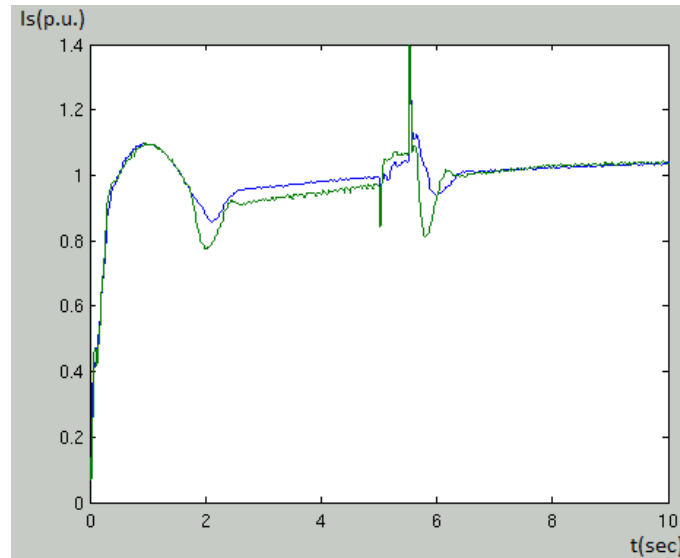
Αποτέλεσμα της βύθισης τάσης είναι η πτώση της ενεργού ισχύος, που αποδίδεται στο δίκτυο. Δεδομένου ότι με το βελτιστοποιημένου ελεγκτή, που χρησιμοποιήθηκε στο σύστημα, η τάση υποστηρίζεται καλύτερα, είναι λογικό να συμβαίνει και μικρότερη πτώση ενεργού ισχύος, όπως αποδεικνύει το παραπάνω σχήμα.

Σύμφωνα με την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε νωρίτερα, η υποστήριξη της τάσης του συστήματος γίνεται μέσω έγχυσης αέργου ισχύος, η οποία φαίνεται στο επόμενο διάγραμμα.



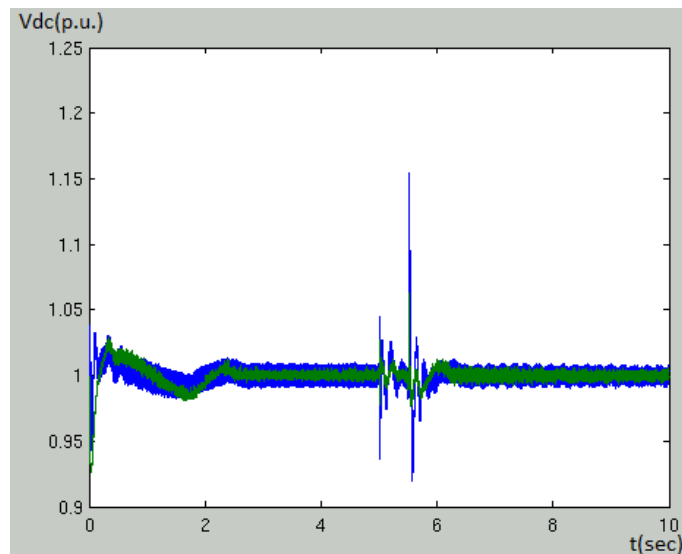
Σχήμα 6.3.3.3 Αεργός ισχύς κατά τη βύθιση τάσης με τη λειτουργία του τυπικού (μπλέ γραμμή) και του βελτιστοποιημένου ελεγκτή (πράσινη γραμμή)

Η αύξηση αέργου ισχύος σχετίζεται με την αύξηση των άεργων ρευμάτων, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται αύξηση του ρεύματος στο στάτη.



Σχήμα 6.3.3.4 Ρεύμα στάτη κατά τη βύθιση τάσης με τη λειτουργία του τυπικού (μπλέ γραμμή) και του βελτιστοποιημένου ελεγκτή (πράσινη γραμμή)

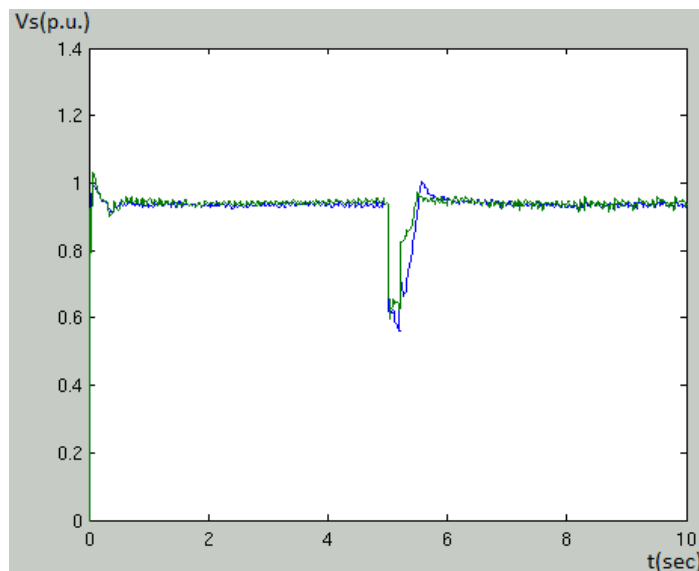
Τέλος, ανεξάρτητα από τις διαταραχές στο υπόλοιπο σύστημα προκειμένου να εξασφαλίζεται σταθερός και μοναδιαίος συντελεστής ισχύος, θα πρέπει η τάση της dc – διασύνδεσης να παραμένει σταθερή. Σύμφωνα με την παρακάτω γραφική παράσταση, αυτό επιτυγχάνεται εξίσου καλά και με τους δύο ελεγκτές.



Σχήμα 6.3.3.5 Τάση dc – διασύνδεσης κατά τη βύθιση τάσης με τη λειτουργία του τυπικού (μπλέ γραμμή) και του βελτιστοποιημένου ελεγκτή (πράσινη γραμμή)

6.3.4 Βύθιση της τάσης κατά 85% για 0.2 sec (περίπτωση λειτουργίας 3)

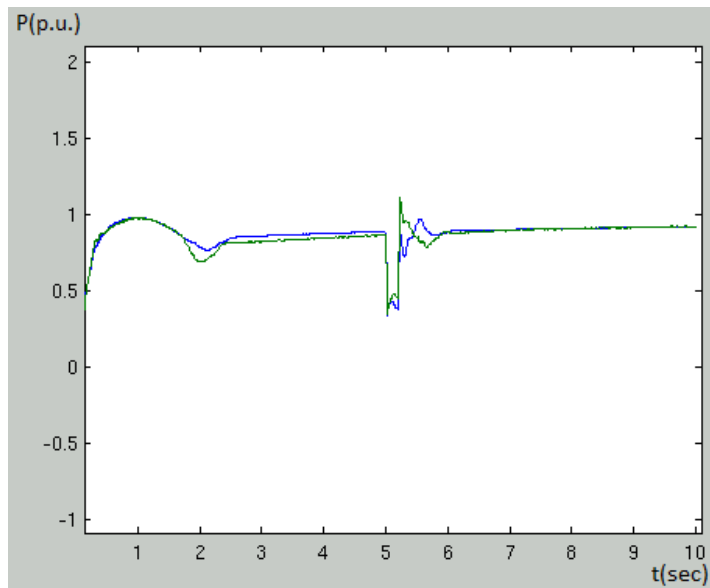
Η τελευταία διαταραχή, στην οποία υποβλήθηκε το σύστημα είναι αυτή της βύθισης τάσης κατά 85% στην ονομαστική τιμή. Αντίστοιχα με τις προηγούμενες περιπτώσεις λειτουργίας, παρατίθενται οι παρακάτω κυματομορφές.



Σχήμα 6.3.4.1 Τάση στάτη κατά τη βύθιση τάσης με τη λειτουργία του τυπικού (μπλέ γραμμή) και του βελτιστοποιημένου ελεγκτή (πράσινη γραμμή)

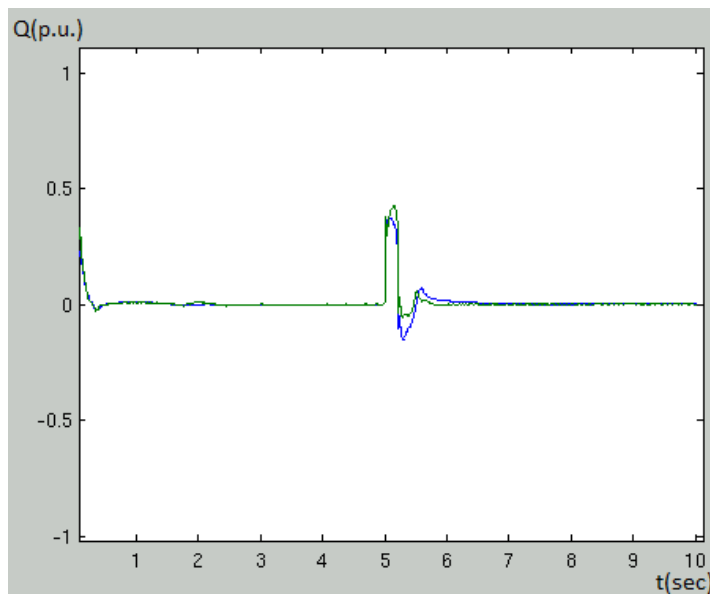
Με προσεκτική παρατήρηση στην κυματομορφή της τάσης προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο βελτιστοποιημένος ελεγκτής λειτουργεί αποδοτικότερα καθότι η τάση κατά τη διάρκεια του σφάλματος ανέρχεται σε υψηλότερα επίπεδα. Ακόμα, μετά τη λήξη αυτού επιστρέφει στην ονομαστική της τιμή γρηγορότερα.

Ανάλογη συμπεριφορά έχει και η ενεργός ισχύς, η οποία διατηρείται σε σχετικά υψηλότερη τιμή κατά τη διάρκεια του σφάλματος.



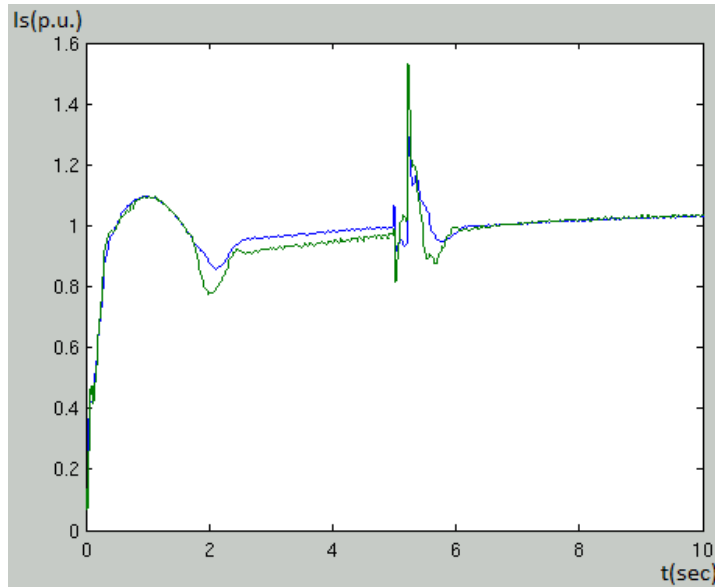
Σχήμα 6.3.4.2 Ενεργός ισχύς κατά τη βύθιση τάσης με τη λειτουργία του τυπικού (μπλέ γραμμή) και του βελτιστοποιημένου ελεγκτή (πράσινη γραμμή)

Η υποστήριξη αυτή της τάσης γίνεται μέσω της αέργου ισχύος και έτσι εξηγείται η αύξηση της τελευταίας κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Μάλιστα, σύμφωνα με το επόμενο διάγραμμα η αέργος ισχύς αυξάνεται περισσότερο όταν αναλαμβάνει δράση ο βελτιστοποιημένος ελεγκτής.



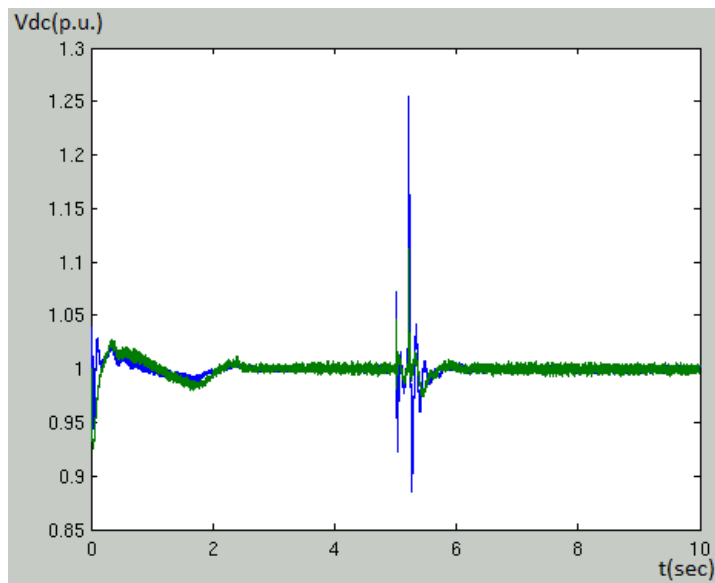
Σχήμα 6.3.4.3 Αεργός ισχύς κατά τη βύθιση τάσης με τη λειτουργία του τυπικού (μπλέ γραμμή) και του βελτιστοποιημένου ελεγκτή (πράσινη γραμμή)

Εν συνεχεία, μολονότι δεν είναι ιδιαίτερα ευκρινείς οι ακόλουθες κυματομορφές στη διάρκεια του σφάλματος λόγω πολύ μικρής διάρκειας αυτού, παρατηρείται η αύξηση του ρεύματος, που οδηγεί στην έγχυση της αέργου ισχύος.



Σχήμα 6.3.4.4 Ρεύμα στάτη κατά τη βύθιση τάσης με τη λειτουργία του τυπικού (μπλέ γραμμή) και του βελτιστοποιημένου ελεγκτή (πράσινη γραμμή)

Τέλος, απεικονίζεται η τάση της dc – διασύνδεσης, η οποία είναι εξίσου ικανοποιητική ανεξάρτητα από το ποιος ελεγκτής χρησιμοποιείται.



Σχήμα 6.3.4.5 Τάση dc – διασύνδεσης κατά τη βύθιση τάσης με τη λειτουργία του τυπικού (μπλέ γραμμή) και του βελτιστοποιημένου ελεγκτή (πράσινη γραμμή)

6.4 Συμπέρασμα

Παρατηρώντας τις κυματομορφές των παραπάνω υποπαραγράφων γίνεται φανερό ότι ο βελτιστοποιημένος ελεγκτής με τη μέθοδο των Ziegler – Nichols οδηγεί σε πανομοιότυπα αποτελέσματα για τη λειτουργία των εναλλακτικών (ως προς το ηλεκτρικό μέρος)

ανεμογεννητριών και ως εκ τούτου γίνεται εξίσου αποδεκτός με τον ελεγκτή, του οποίου τα κέρδη ρυθμίστηκαν με τη μέθοδο “trial and error”.

7

Συμπεράσματα

7.1 Κυριότερα συμπεράσματα της εργασίας

Στην εργασία αυτή αναπτύχθηκε κατάλληλο δυναμικό μοντέλο υλοποιημένο στο υπολογιστικό περιβάλλον Matlab/Simulink ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης και προσομοιώθηκε η λειτουργία ενός αιολικού διασυνδεδεμένου πάρκου ανεμογεννητριών. Πιο συγκεκριμένα, το αιολικό πάρκο αποτελείται από δώδεκα ανεμογεννήτριες, οι οποίες συνδέονται στο δίκτυο στην πλευρά χαμηλής τάσης με back – to – back μετατροπέα.

Στο **πρώτο κεφάλαιο**, εξετάστηκε ο ρόλος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη σημερινή εποχή με έμφαση στην αιολική ενέργεια και επισημάνθηκαν οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες ανεμογεννητριών και μετατροπέων. Επιπλέον, αναφέρθηκαν οι τεχνικές απαιτήσεις διασύνδεσης στο δίκτυο διαφόρων χωρών καθώς και των εγχώριων κανονισμών, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν ως αναφορά για την παρούσα εργασία. Στο **δεύτερο κεφάλαιο** αναλύθηκε λεπτομερώς η μοντελοποίηση των υποσυστημάτων της Α/Γ που χρησιμοποιήθηκε, καθώς και του μετατροπέα αυτής. Στο **τρίτο κεφάλαιο**, αναπτύχθηκε το δυναμικό μοντέλο της ανεμογεννήτριας χρησιμοποιώντας τεχνικές διανυσματικού ελέγχου και το σύστημα ελέγχου που επεμβαίνει τόσο στην πλευρά του δικτύου όσο και στην πλευρά του δρομέα της ανεμογεννήτριας. Επιπλέον, επεξηγήθηκε η μεθοδολογία ανεύρεσης του σημείου παροχής μέγιστης ισχύος. Στο **τέταρτο κεφάλαιο**, προσομοιώθηκε η λειτουργία του αιολικού πάρκου τόσο υπό κανονικές συνθήκες όσο και υπό διάφορες διαταραχές της τάσης. Έτσι, εξετάστηκε η λειτουργία του αιολικού πάρκου σε συνθήκες βύθισης της τάσης στα όρια που προβλέπονται από τους ελληνικούς κανονισμούς. Επίσης, επιβλήθηκαν συγκεκριμένες μεταβολές του ανέμου (βηματική μεταβολή και εισαγωγή πραγματικής ανεμοσειράς στο σύστημα), ώστε να διαπιστωθεί αν το σύστημα σε κάθε περίπτωση οδηγείται στο σημείο παροχής βέλτιστης ισχύος. Στη συνέχεια, στο **πέμπτο κεφάλαιο**, προκειμένου να εξετασθεί η ακρίβεια των μοντέλων που αναπτύχθηκαν, συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας με εκείνα αντίστοιχης της βιβλιογραφίας [7]. Ολοκληρώνοντας, στο **έκτο κεφάλαιο** επιχειρήθηκε βελτιστοποίηση των κερδών ανάδρασης ολοκληρωτικού σφάλματος του ελεγκτή με τη βοήθεια της συστηματικής μεθόδου των Ziegler – Nichols και τα αποτελέσματα των αποκρίσεων συγκρίθηκαν με εκείνα των τυπικών τιμών τους.

Από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο τρίτο κεφάλαιο και τις περιπτώσεις λειτουργίας που εξετάστηκαν στο τέταρτο κεφάλαιο προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο ελεγκτής λειτουργεί ικανοποιητικά. Συγκεκριμένα :

- Στις διάφορες βυθίσεις τάσης που πραγματοποιήθηκαν, αποτυπώνεται η προσπάθεια του ελεγκτή μέσω έγχυσης αέργου ισχύος να εξισορροπήσει τα σφάλματα και ως εκ τούτου η πτώση τάσης στους ακροδέκτες του αιολικού πάρκου είναι πολύ μικρότερη

αυτής που συμβαίνει χωρίς την παρέμβασή του. Με άλλα λόγια, το αιολικό πάρκο υποστηρίζει την τάση του δικτύου σε περίπτωση σφάλματος.

- Επιπλέον, κατά τη διάρκεια των διαταραχών παρατηρείται ότι η τάση της dc – διασύνδεσης παραμένει πρακτικά σταθερή εξασφαλίζοντας τον επιθυμητό μοναδιαίο συντελεστή ισχύος στην πλευρά του δικτύου.
- Ικανοποιητικά είναι και τα αποτελέσματα σε μεταβολές του ανέμου, αφού το σύστημα άμεσα επιτυγχάνει την εύρεση βέλτιστου σημείου παροχής ισχύος.

Πιο συγκεκριμένα, η δράση του ελεγκτή κατά τις βυθίσεις τάσης σε κάθε περίπτωση λειτουργίας έχουν ως εξής:

- Περίπτωση λειτουργίας 1: Η τάση στο δίκτυο μειώνεται στο 70% της ονομαστικής της τιμής. Από τις γραφικές παραστάσεις που παρατέθηκαν, όμως, φαίνεται ότι η τάση ανέρχεται στο 80% της αρχικής (βελτίωση κατά 10%).
- Περίπτωση λειτουργίας 2: Η τάση στο ηλεκτρικό δίκτυο βυθίζεται στο 50% της αρχικής, αλλά με τη διόρθωση που επιφέρει ο ελεγκτής, η τάση στο ζυγό του αιολικού πάρκου ανέρχεται στο 64% της ονομαστικής τιμής της (βελτίωση κατά 14%).
- Περίπτωση λειτουργίας 3: Στην περίπτωση αυτή η τάση μειώνεται στο 15%, αλλά και πάλι ο ελεγκτής αναλαμβάνει δράση και επιτυγχάνει ανύψωση της τάσης στο 59% (βελτίωση κατά 44%).

Μια σημαντική παρατήρηση, που ισχύει και για τις τρεις περιπτώσεις είναι ότι τα ρεύματα στις γεννήτριες φθάνουν σε αρκετά υψηλές τιμές για να μπορέσουν να βελτιώσουν την τάση του δικτύου κατά το σφάλμα. Πολλές φορές αυτό μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα αξιοπιστίας των συνιστωσών και μάλιστα του μετατροπέα, ο οποίος δεν ανέχεται συνήθως μεγάλες υπερεντάσεις. Ως εκ τούτου, είναι σκόπιμη η πρόληψη μέτρων για την προστασία των υποσυστημάτων (όπως π.χ. χρήση ειδικής αντίστασης παράκαμψης του μετατροπέα για τη διοχέτευση των υπερρευμάτων).

Στο έκτο κεφάλαιο συγκρίνονται οι προαναφερόμενες αποκρίσεις του συστήματος με εκείνες που προκύπτουν μετά από βελτιστοποίηση των κερδών ανάδρασης ολοκληρωτικού σφάλματος των ελεγκτών με βάση τη συστηματική μέθοδο των Ziegler – Nichols. Πιο αναλυτικά, οι κυματομορφές απόκρισης δείχνουν ότι η υποστήριξη της τάσης είναι αποτελεσματικότερη από εκείνη που παρατηρείται στον τυπικό ελεγκτή. Παρακάτω αναφέρονται συγκεκριμένα τα συγκριτικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων και τα αντίστοιχα συμπεράσματα:

- Περίπτωση λειτουργίας 1: Η τάση στο ζυγό του αιολικού πάρκου διορθώνεται στο 88% (δηλαδή παρατηρείται αύξηση κατά 8% συγκριτικά με τον προηγούμενο ελεγκτή).
- Περίπτωση λειτουργίας 2: Και στο σημείο αυτό ο βελτιστοποιημένος ελεγκτής υποστηρίζει καλύτερα την τάση δεδομένου ότι η τελευταία ανέρχεται στο ζυγό του αιολικού πάρκου στο 74% (βελτίωση κατά 10% σε σχέση με τον τυπικό ελεγκτή).
- Περίπτωση λειτουργίας 3: Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται βελτίωση κατά 6% σε σχέση με τον τυπικό ελεγκτή.

- Σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρείται ότι ο βελτιστοποιημένος ελεγκτής είναι γρηγορότερος. Επιπλέον, στον τυπικό ελεγκτή παρατηρείται συνήθως σημαντική υπερύψωση των κυματομορφών πριν την επιστροφή στη μόνιμη κατάσταση.
- Οι δύο ελεγκτές εμφανίζουν όμοιες αποκρίσεις στη σταθεροποίηση της τάσης της dc – διασύνδεσης και κατά την κανονική λειτουργία για ανεύρεση του σημείου παροχής μέγιστης ισχύος κατά τις διαταραχές του ανέμου.

Συνοψίζοντας, η μοντελοποίηση που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία είναι κατάλληλη για την αναπαράσταση αιολικών πάρκων ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών με ασύγχρονες γεννήτριες διπλής τροφοδότησης διασυνδεδεμένων στο δίκτυο. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων επιβεβαιώθηκε συγκρίνοντάς τα με αντίστοιχα της βιβλιογραφίας. Οι περιπτώσεις που μελετήθηκαν αφορούν τόσο στον έλεγχο της ενεργού και αέργου ισχύος όσο και στη διατήρηση του μοναδιαίου συντελεστή ισχύος και στη συνεισφορά στην ευστάθεια του συστήματος σε περιπτώσεις σφαλμάτων. Επιπλέον, εξετάστηκε τεχνική βελτιστοποίησης των κερδών ανάδρασης ολοκληρωτικού σφάλματος των ελεγκτών, η οποία επιφέρει υπολογίσιμη βελτίωση των αποκρίσεων σε περιπτώσεις βυθίσεων τάσης, σε σχέση με εκείνες που προκύπτουν για τυπικές τιμές τους.

7.2 Σημεία επιστημονικής συνεισφοράς της εργασίας

Η εργασία περιλαμβάνει τα παρακάτω στοιχεία επιστημονικής συνεισφοράς:

- Ανάπτυξη μοντέλου αναπαράστασης ενός διασυνδεδεμένου αιολικού πάρκου με ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών με ασύγχρονες γεννήτριες διπλής τροφοδότησης. Το μοντέλο αυτό επιτρέπει τη μελέτη των επιμέρους υποσυστημάτων των συγκεκριμένων ανεμογεννητριών αλλά και των αντίστοιχων ελεγκτών τους σε διάφορες περιπτώσεις λειτουργίας.
- Εξέταση της απόκρισης του συγκεκριμένου συστήματος σε βυθίσεις τάσης και διαταραχές του ανέμου για εξέταση της συμμόρφωσής του με τα προβλεπόμενα όρια των ελληνικών προτύπων.
- Ρύθμιση των κερδών των PI ελεγκτών με τυπικές μεθόδους δοκιμών και σύγκριση των αποκρίσεων με εκείνες που προκύπτουν μετά από συστηματική βελτιστοποίηση των κερδών με βάση τη μέθοδο των Ziegler – Nichols.

7.3 Προτεινόμενα θέματα για περαιτέρω διερεύνηση

Με την ολοκλήρωση της εργασίας αναδείχθηκαν τα παρακάτω θέματα τα οποία χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης

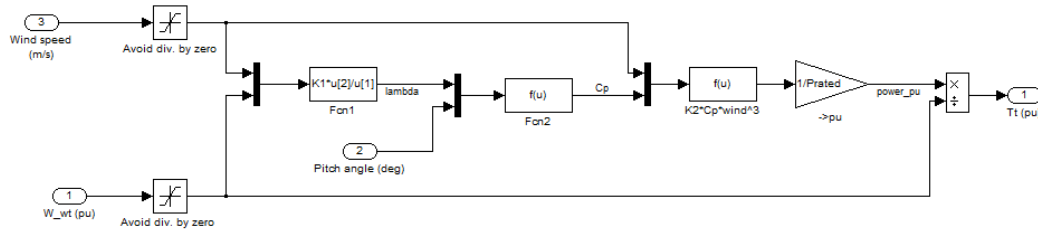
- Η εξέταση της απόκρισης του συστήματος που αναπτύχθηκε σε περιπτώσεις διαφορετικών αιολικών δυναμικών.
- Η ανάπτυξη κατάλληλων τεχνικών και μοντέλων για τη ρύθμιση συχνότητας των ανεμογεννητριών.

Βιβλιογραφία

- [1] I. Erlich, J. Kretschmann, S. Mueller – Engelhardt, F. Koch, J. Fortmann, ‘Modeling of wind turbines based on doubly – fed induction generators for power system stability studies’, IEEE 2008.
- [2] Δ. Μαρούδας, ‘Συγκριτική ανάλυση αιολικών συστημάτων και έλεγχος ισχύος σε σύστημα με ασύγχρονη μηχανή διπλής τροφοδότησης’.
- [3] J. Fletcher, J. Yang, ‘ Introduction to doubly – fed induction generator for wind power applications’, Paths to Sustainable Energy, pages 259 – 278.
- [4] J.G. Sloopweg, H. Polinder, W.L. Kling, ‘Dynamic Modelling of a wind turbine with doubly fed induction generator’, IEEE 2001.
- [5] J. Morren, S.W.H. de Haan, ‘Ridethrough of wind turbines with doubly – fed induction generator during a voltage dip’, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 20, No. 2, June 2005.
- [6] J.T.G. Pierik, J. Morren, E.J. Wiggelinkhuizen, S.W.H. de Haan, T.G. van Engelen, J. Bozelie, ‘Electrical and control aspects of offshore wind farms II (Erao II), Volume 1: Dynamic models of wind farms’, ECN, June 2004.
- [7] J.T.G. Pierik, J. Morren, E.J. Wiggelinkhuizen, S.W.H. de Haan, T.G. van Engelen, J. Bozelie, ‘Electrical and control aspects of offshore wind farms II (Erao II), Volume 2: Offshore wind farm case studies’, ECN, March 2004.
- [8] Daryoush Mehrzad, Javier Luque, Marc Capella Cuenca, ‘Vector control of PMSG for grid – connected wind turbine applications’, June 2009.
- [9] Μ. Ντρέκο, ‘Ανάλυση λειτουργίας και έλεγχος συστήματος ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών διασυνδεδεμένης στο δίκτυο’, Οκτώβριος 2009.
- [10] Ι. Καμπούρης, ‘Επιπτώσεις της μεγάλης αιολικής διεύδυσης στην ανάπτυξη και λειτουργία των ΣΗΕ’ στο συνέδριο ‘Αιολική ενέργεια: Εφαρμογές και προβλήματα της διεύδυσης μεγάλης κλίμακας’, Απρίλιος 2009, Χαλκίδα.
- [11] Emilio Gomez Lazaro, Juan Alvaro Fuentes, Angel Molina – Garcia, Miguel Canas – Carreton, ‘Characterization and visualization of voltage dips in wind power installations’.
- [12] Θ. Πάζιος, ‘Μελέτη σύνδεσης μικρών ανεμογεννητριών σε μικρής κλίμακας εφαρμογές με αποθήκευση σε συσσωρευτές και μελέτη, σχεδίαση και κατασκευή ρυθμιστή φόρτισης συσσωρευτών με απορριπτικό φορτίο’.
- [13] Mansour Mohseni, Syed M. Islam, ‘Review of international grid codes for wind power integration: Diversity, technology and a case for global standard’, Renewable and sustainable energy reviews, Elsevier, Volume 16, Issue 6, August 2012, pages 3876 – 3890.
- [14] Σ. Μανιάς, ‘Ηλεκτρονικά Ισχύος’, Εκδόσεις Συμεών, 2009.
- [15] Σ. Παπαθανασίου, ‘Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας’.

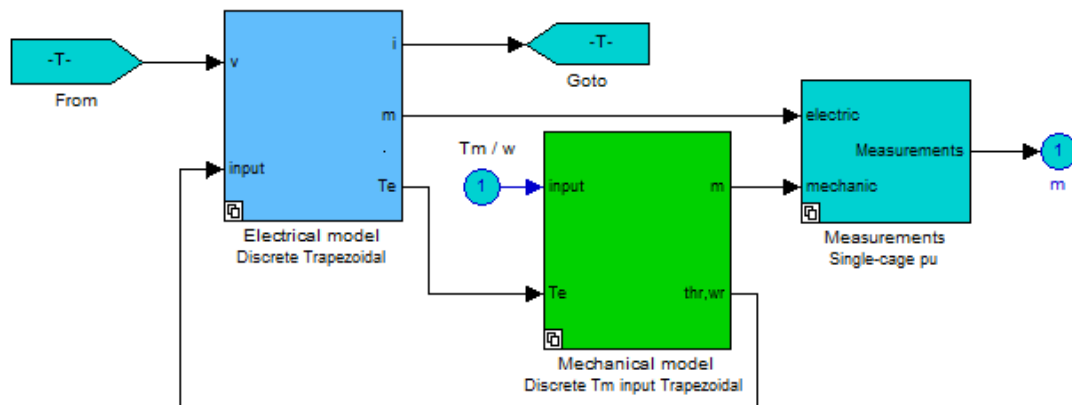
- [16] Bimal K. Bose, 'Modern Power Electronics and AC Drives', Prentice Hall.
- [17] ΔΕΣΜΗΕ, 'Εγχειρίδιο τεχνικών απαιτήσεων για αιολικούς σταθμούς'.
- [18] I. M. Dudurych, M. Holly, M. Power, 'Integration of wind power generation in the Irish Grid'.
- [19] Florin Iov, Anca Daniela Hansen, Poul Sorensen, Nicolaos Antonio Cutululis, 'Mapping of grid faults and grid codes', Riso – R – 1617(EN).
- [20] I. Erlich, U. Bachmann, 'Grid code requirements concerning connection and operation of wind turbines in Germany', 2005, IEEE.
- [21] M. Tsili, S. Papathanasiou, 'Review of grid code technical requirements for wind farms', 2009, IET Renewable Power Generation.
- [22] Arthouros Zervos, Christian Kjaer, 'Pure Power – Wind energy targets for 2020 and 2030', November 2009.
- [23] Α. Μερλίντα, 'Λειτουργία Α/Γ υπό αυξημένη γωνιακή ταχύτητα δρομέα προς συμμετοχή της σε ρυθμίση φορτίου – συχνότητας', Μάρτιος 2010.
- [24] Saman Salarpour, 'Ανάλυση αιολικών συστημάτων με ασύγχρονη μηχανή διπλής τροφοδοσίας', Φεβρουάριος 2012.
- [25] Katsuhiko Ogata, 'Modern Control Engineering, 3rd edition, Prentice Hall.
- [26] Σταύρος Παπαθανασίου, Επ. Καθ. ΕΜΠ, 'Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας – Σημειώσεις παραδόσεων', Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2008.
- [27] Μιχ. Π. Παπαδόπουλος, Καθηγητής ΕΜΠ, 'Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές', Αθήνα 1997.
- [28] Σ. Ν. Μανιάς, 'Βιομηχανικά ηλεκτρονικά', Εκδοτικός οίκος Συμεών, Αθήνα 2000.

Παράρτημα Α: Υποσυστήματα ανεμογεννητριών



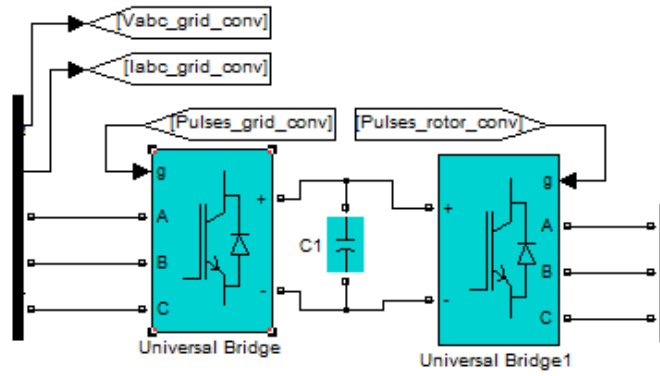
Εικόνα Α.1 Μοντελοποίηση αεροδυναμικού μέρους στο Matlab/Simulink

Η εικόνα Α.1 απεικονίζει το αεροδυναμικό μέρος της ανεμογεννήτριας, όπως υλοποιήθηκε στο Matlab/Simulink. Επί της ουσίας, στο παραπάνω υποσύστημα υπολογίζεται η αεροδυναμική ισχύς (και μέσω αυτής η ροπή) μέσω της σχέσης $P_{wt} = \frac{\rho}{2} A_{wt} C_p(\lambda, \theta) V_w^3$. Πρώτα, βέβαια, έχει υπολογιστεί ο αεροδυναμικός συντελεστής με τη βοήθεια του λ και της γωνίας pitch.



Εικόνα Α.2 Ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης

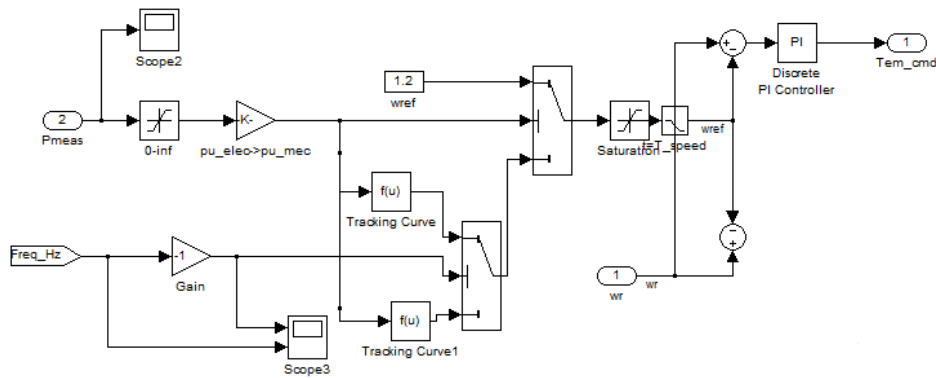
Στην εικόνα Α.2 απεικονίζεται το υποσύστημα, που περιλαμβάνει το ηλεκτρικό και το μηχανικό μέρος της ασύγχρονης γεννήτριας διπλής τροφοδότησης. Στο ηλεκτρικό μοντέλο υπολογίζονται οι μαγνητικές ροές, οι τάσεις και τα ρεύματα, που στη συνέχεια εξάγονται για να εισέλθουν ως είσοδοι στο υποσύστημα του ελεγκτή.



Εικόνα A.3 Μετατροπέας back – to – back

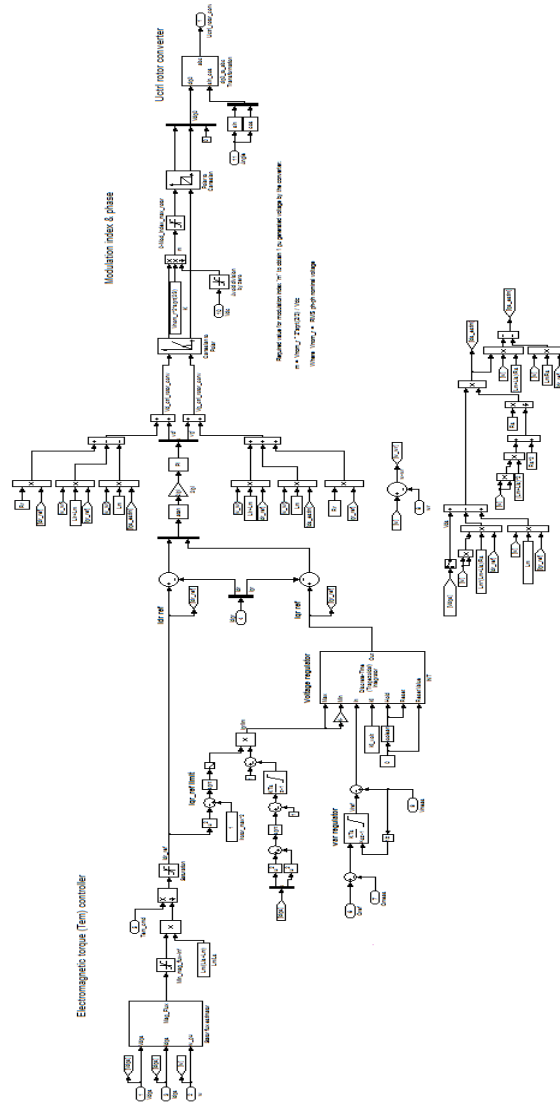
Τέλος, στην εικόνα A.3 παρουσιάζεται ο μετατροπέας back – to – back. Ευδιάκριτα είναι τα μέρη, από τα οποία αποτελείται, δηλαδή η ανορθωτική γέφυρα, ο αντιστροφέας και η dc – διασύνδεση. Επιπλέον, φαίνονται οι παλμοί (αποτέλεσμα της SPWM τεχνικής), που έχουν προκύψει από τη λειτουργία του ελεγκτή.

Παράρτημα Β: Υποσυστήματα ελεγκτή



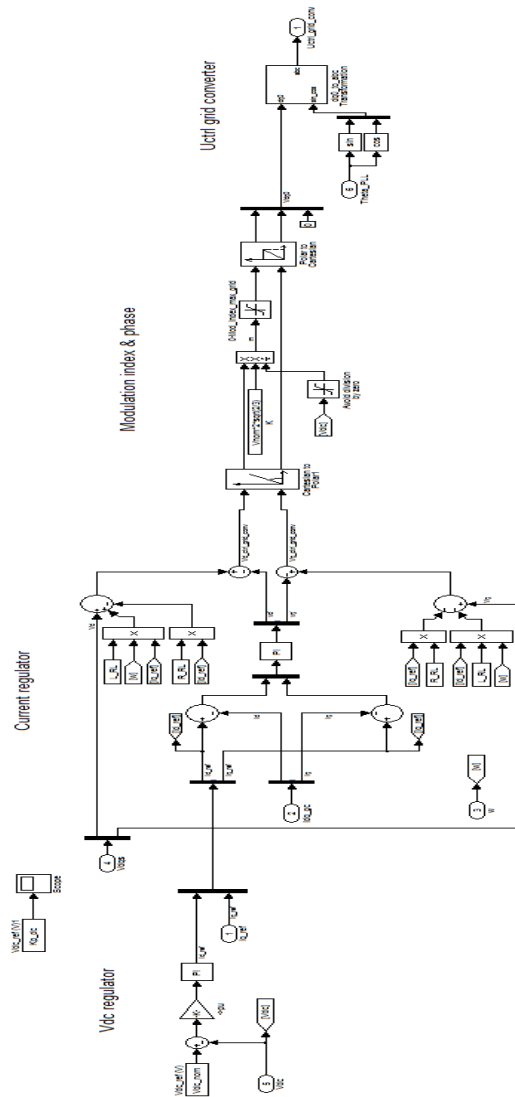
Εικόνα Β.1 Λειτουργία ΜΡΡΤ ελέγχου βασισμένη σε δεδομένη χαρακτηριστική καμπύλη

Στην εικόνα Β.1 παρουσιάζεται το υποσύστημα, που είναι υπεύθυνο για την ανεύρεση του σημείου παροχής μέγιστης ισχύος. Παρατηρείται η χαρακτηριστική καμπύλη (tracking curve) πάνω στην οποία οδηγείται η εντολή ροπής. Επίσης, φαίνεται πώς μέσω της P_{meas} προκύπτει η ταχύτητα περιστροφής αναφοράς.



Εικόνα Β.2 Έλεγχος από την πλευρά του δρομέα

Η εικόνα Β.2 απεικονίζει τον έλεγχο από την πλευρά του δρομέα. Συγκεκριμένα, φαίνεται ο υπολογισμός των συνιστωσών I_d και I_q , όπως υπολογίζονται από το ρυθμιστή τάσης (voltage regulator) και το ρυθμιστή ηλεκτρομαγνητικής ροπής (electromagnetic torque controller).



Εικόνα Β.3 Έλεγχος από την πλευρά του δικτύου

Το τελευταίο υποσύστημα είναι αυτό, στο οποίο επιτελείται ο έλεγχος της τάσης της dc – διασύνδεσης (μέσω της I_d συνιστώσας του ρεύματος) και παρατηρείται στην εικόνα Β.3 ο ρυθμιστής της V_{dc} . Ακόμη, απεικονίζεται ο υπολογισμός του άεργου ρεύματος.