



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

**Σχεδίαση συστήματος ελέγχου ανεμογεννήτριας  
μεταβλητών στροφών με δυνατότητα ρύθμισης τάσης και  
συχνότητας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Δημήτριος Γ. Ζωγράφος**

Επιβλέπων : Αντώνιος Γ. Κλαδάς

Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2013





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

## Σχεδίαση συστήματος ελέγχου ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με δυνατότητα ρύθμισης τάσης και συχνότητας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Δημήτριος Γ. Ζωγράφος**

Επιβλέπων : Αντώνιος Γ. Κλαδάς  
Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....

Αντώνιος Γ. Κλαδάς  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Στέφανος Ν. Μανιάς  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Σταύρος Παπαθανασίου  
Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2013

.....  
Δημήτριος Γ. Ζωγράφος

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

Copyright © Δημήτριος Γ.Ζωγράφος, 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 Πολυτεχνείου.

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε ένα δυναμικό μοντέλο μιας ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών ονομαστικής ισχύος 2 MW, με συμβατική σύγχρονη γεννήτρια. Η έξοδος της ανεμογεννήτριας συνδέεται μέσω τριφασικού ανορθωτή διόδων, μετατροπέα ανύψωσης τάσης και τριφασικού αντιστροφέα τύπου πηγής τάσης στο δίκτυο. Ο μετατροπέας ανύψωσης τάσης εξασφαλίζει την ανεύρεση του σημείου μεγίστης ισχύος ενώ ο αντιστροφέας χρησιμοποιεί την τεχνική ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών για την εξάλειψη ανώτερων αρμονικών.

Το μοντέλο του συστήματος αναπτύχθηκε σε περιβάλλον προσομοίωσης Simulink/MATLAB και εξετάστηκαν τόσο η μόνιμη κατάσταση λειτουργίας όσο και διάφορες διαταραχές. Σε ένα πρώτο βήμα εξετάστηκε η λειτουργία της ανεμογεννήτριας συνδεδεμένης μέσω των μετατροπέων και γραμμής μέσης τάσης μήκους τριάντα χιλιομέτρων σε ιδανική πηγή τάσης. Υπό αυτή τη συνδεσμολογία εξετάστηκε η απόκριση του μοντέλου σε βηματικές μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου και σε τυπικές διακυμάνσεις μικρής και μεγάλης ταχύτητας ανέμου. Στη συνέχεια εξετάστηκαν τα προβλήματα που παρουσιάζονται σε περιπτώσεις σημαντικής πτώσης τάσης του δικτύου και σχεδιάστηκε σύστημα ελέγχου της άεργου ισχύος προσαρμοσμένο στον αντιστροφέα, με το οποίο καθορίζεται η άεργος ισχύς που δύναται να προσφερθεί στο δίκτυο σε περιπτώσεις χαμηλής τάσης. Το σύστημα αυτό σχεδιάστηκε έτσι ώστε να μπορεί να ελεγχθεί από τον διαχειριστή του εκάστοτε δικτύου και εφαρμόστηκε ώστε να πληροί τις τιθέμενες προδιαγραφές του Γερμανικού κώδικα. Επίσης, σχεδιάστηκε σύστημα ελέγχου το οποίο καθορίζει την παραμονή ή μη της ανεμογεννήτριας στο δίκτυο σε περιπτώσεις διαταραχών και περιλαμβάνει ένα φορτίο έκτακτης ανάγκης για την κατανάλωση της περίσσειας ισχύος που προκύπτει σε τέτοιες περιπτώσεις.

Τέλος, σχεδιάστηκε σύστημα ελέγχου συχνότητας του δικτύου προσαρμοσμένο στον μετατροπέα ανύψωσης τάσης, με συνδυασμένο έλεγχο στατισμού και αδρανειακής απόκρισης βασισμένο σε υποδειγματική καμπύλη ισχύος – συχνότητας, αλλά και στην περίπτωση καμπύλης ισχύος – συχνότητας που προβλέπει ο Ιρλανδικός κώδικας. Η λειτουργία του εξετάστηκε στο πρότυπο δίκτυο με ιδανική πηγή τάσης, σε δίκτυο αποτελούμενο από ανεμογεννήτρια, συμβατική γεννήτρια και φορτίο αλλά και στο ηλεκτρικό δίκτυο της Κύθνου, όπου προσαρμόστηκε ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 500 kW σε συνθήκες απότομης αύξησης της ζήτησης ισχύος.

## Λέξεις κλειδιά

Αιολική ενέργεια, Ανεμογεννήτριες, Σύγχρονη γεννήτρια, Μέθοδος ανεύρεσης σημείου βέλτιστης ισχύος, Ελεγκτής διαταραχών της τάσης του δικτύου, Ελεγκτής διαταραχών της συχνότητας του δικτύου.

## **Abstract**

In this thesis, a dynamic model for a variable speed wind turbine with a conventional synchronous generator is developed. The wind turbine is connected through a three-phase diode rectifier, a boost DC to DC converter and a three-phase voltage source inverter to the grid. The DC to DC converter ensures maximum power point tracking while the inverter controls the active and reactive power injected to the grid and uses sinusoidal pulse width modulation technique to eliminate higher harmonics.

The model was developed in Simulink/MATLAB simulation environment and both normal operating conditions of the system and disturbances have been examined. Initially, the wind turbine is considered to be connected through the converters and a medium voltage line of thirty kilometers length to an ideal voltage source, representing the electricity grid. In this configuration the model's response was examined under step changes of the wind speed and typical low and high wind speed variations. In addition the system has been simulated under voltage sags and a control system for the reactive power was designed enabling determination of the reactive power which may be injected to the network in such a case. The system is designed to permit reactive power control by the network administrator and an application according to the German code requirements has been performed. Furthermore, a control system was designed enabling determination of disturbance ride through of the wind turbine, including a dump load for excess power consumption.

Finally, a frequency control system was developed adapted to the boost converter, combining droop as well as inertia control, based on a typical power- frequency curve, and an application has been performed based on the active power- frequency curve foreseen by the Irish code. The proposed methodology has been applied in the case of the system considering an ideal voltage source, to a typical network consisted of a wind turbine, a conventional generator and a load and to the electric grid of Kythnos, considering a 500 kW wind turbine under sudden increase of power demand.

## **Key words**

Wind power, Wind turbines, Synchronous generator, MPPT tracker, Under/Over voltage controller, Frequency controller.

## Ευχαριστίες

Ευχαριστώ από τα βάθη της καρδιάς μου τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας αυτής, τον καθηγητή κ. Αντώνιο Κλαδά, ο οποίος μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Η συνεχής καθοδήγηση και συμπαράσταση του ήταν για μένα πολύτιμη. Επίσης, ευχαριστώ τον Δρ. Χαράλαμπο Πάτσιο για τη συνεχή υποστήριξη και βοήθεια του. Ένα μεγάλο μέρος της εργασίας είναι απεικόνιση των συμβουλών του. Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια και τους φίλους μου που με στήριξαν στα εύκολα και στα δύσκολα.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Εισαγωγή .....	11
1.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	11
1.2 Αιολική ενέργεια.....	13
1.3 Συστήματα ηλεκτρομηχανικής μετατροπής και έλεγχος των ανεμογεννητριών.....	14
1.3.1 Συνήθεις τοπολογίες μετατροπέων σε συστήματα ανεμογεννητριών.....	18
1.4 Απαιτήσεις κωδίκων για τη σύνδεση ανεμογεννήτριας στο δίκτυο.....	19
1.4.1 Ανοχή σε βυθίσεις τάσης και απόκριση κατά τα διάρκεια και μετά την εκκαθάριση σφαλμάτων στο δίκτυο.....	19
1.4.2. Έλεγχος τάσης και άεργου ισχύος.....	20
1.4.3. Έλεγχος συχνότητας και ενεργού ισχύος.....	21
1.5 Δομή της εργασίας.....	21
1.6 Συνεισφορά της εργασίας.....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:Χαρακτηριστικά συστήματος.....	24
2.1. Αεροδυναμικό μέρος της Α/Γ .....	25
2.2. Σύστημα μετάδοσης κίνησης.....	27
2.3. Σύγχρονη γεννήτρια .....	29
2.4. Μετατροπέας ανύψωσης τάσης συνεχούς σε συνεχές.....	31
2.4.1. Ανίχνευση σημείου μέγιστης ισχύος.....	33
2.4.1.1. Εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος από δοσμένες χαρακτηριστικές καμπύλες.....	34
2.4.1.2. Μοντέλο προσομοίωσης ρυθμιστή στροφών και γωνίας βήματος έλικας.....	36
2.4.1.3. Αναλογικός - ολοκληρωτικός ελεγκτής.....	39
2.5 Τριφασικός αντιστροφέας τύπου πηγής τάσης συνεχές σε εναλλασσόμενο.....	40
2.5.1.Τεχνική ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών.....	40



2.5.2. Λειτουργία του τριφασικού αντιστροφέα στο κομμάτι της ισχύος.....	43
2.5.3. Επιλογή της συνεχούς τάσης εισόδου του αντιστροφέα.....	46
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 :Έλεγχος του αντιστροφέα.....</b>	<b>47</b>
3.1. Μετασχηματισμός δύο αξόνων (D-Q).....	47
3.2. Βρόχος κλειδωμένης φάσης.....	50
3.3. Τριφασική ισχύς στο dq σύστημα συντεταγμένων.....	51
3.4.Σύστημα ελέγχου του αντιστροφέα.....	52
3.5.Έλεγχος της άεργου ισχύος.....	55
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : Απόκριση του μοντέλου προσομοίωσης σε λειτουργία</b>	
<b>χωρίς διαταραχές.....</b>	<b>59</b>
4.1.Απόκριση ανεμογεννήτριας σε βηματικές μεταβολές	
της ταχύτητας του ανέμου.....	59
4.2.Απόκριση της ανεμογεννήτριας σε μεταβλητή ταχύτητα ανέμου.....	67
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : Απόκριση του μοντέλου προσομοίωσης σε διαταραχές</b>	
<b>της τάσης του δικτύου.....</b>	<b>73</b>
5.1.Βύθιση στο 90% της ονομαστικής τιμής.....	73
5.2.Βύθιση στο 50% της ονομαστικής τιμής.....	77
5.3.Παροχή άεργου ισχύος σε βύθιση τάσης.....	83
5.3.1.Βύθιση στο 90% της ονομαστικής τιμής.....	84
5.3.2.Βύθιση στο 50% της ονομαστικής τιμής.....	85
5.3.3.Παραγωγή άεργου ρεύματος σύμφωνα με τον Γερμανικό κώδικα.....	99
5.4.Σύστημα ελέγχου για παραμονή ή μη στο δίκτυο σε βύθιση τάσης.....	105

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 :Έλεγχος της συχνότητας.....</b>	<b>111</b>
6.1. Ελεγκτής συχνότητας βασισμένος σε έλεγχο αδρανειακής απόκρισης και στατισμού.....	111
6.2. Ελεγκτής συχνότητας βασισμένος στον Ιρλανδικό κώδικα.....	123
6.3. Έλεγχος συχνότητας στο ηλεκτρικό δίκτυο της Κύθνου.....	130
6.3.1. Εισαγωγή.....	130
6.3.2.Το ιστορικό του συστήματος στην Κύθνο.....	131
6.3.3.Χαρακτηριστικά του συστήματος για το έτος εφαρμογής 2002.....	132
6.3.4.Αποτελέσματα προσομοίωσης για διαταραχή συχνότητας στο ηλεκτρικό δίκτυο της Κύθνου.....	137
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 :Συμπεράσματα.....</b>	<b>143</b>
7.1.Κυριότερα συμπεράσματα της εργασίας.....	143
7.2.Σημεία προαγωγής της επιστήμης.....	146
7.3.Εργασίες για περαιτέρω έρευνα.....	147
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>148</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α:Μοντελοποίηση ανεμογεννήτριας στο Simulink.....</b>	<b>150</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β:Μοντελοποίηση ελεγκτών στο Simulink.....</b>	<b>153</b>

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

---

## 1.Εισαγωγή

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελούν πλέον έναν από τους στυλοβάτες των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Η μόλυνση του περιβάλλοντος και η συνεχής μείωση των φυσικών πόρων οδηγεί στην εναλλακτική-οικονομικά βιώσιμη-λύση των ΑΠΕ έναντι των συμβατικών σταθμών παραγωγής. Σε αυτό έχει συμβάλει η ολοένα αναπτυσσόμενη τεχνολογία των ηλεκτρονικών ισχύος καθώς και η ανάπτυξη πληρέστερων συστημάτων ελέγχου. Η χρήση της αιολικής ενέργειας μέσω των ανεμογεννητριών για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών γίνεται έτσι όλο και περισσότερο ελκυστική.

Όσο η διείσδυση της αιολικής ενέργειας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται τόσο περισσότερο απαραίτητη καθίσταται η ύπαρξη ενός αποτελεσματικού και αξιόπιστου συστήματος ελέγχου. Ένα τέτοιο σύστημα είναι απαραίτητο από τη στιγμή που ανακύπτουν συγκεκριμένα ζητήματα που χρήζουν άμεσης αντιμετώπισης: οι βυθίσεις τάσης του δικτύου, ο έλεγχος του ισοζυγίου ισχύος καθώς και ο έλεγχος της συχνότητας. Στην υπό μελέτη διπλωματική εργασία γίνεται προσπάθεια ώστε να εξετασθούν τα ζητήματα αυτά διεξοδικά καθώς και να προταθούν συγκεκριμένοι, αποτελεσματικοί τρόποι αντιμετώπισης.

### 1.1. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) (ή ήπιες μορφές ενέργειας) είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες. Ο όρος ήπιες αναφέρεται σε δύο βασικά χαρακτηριστικά τους. Καταρχάς, για την για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση ή καύση, όπως με τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας, αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Δεύτερον, πρόκειται για «καθαρές» μορφές ενέργειας, πολύ «φιλικές» στο περιβάλλον, που δεν αποδεδμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα, όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα.

Τα πλεονεκτήματα των ΑΠΕ λοιπόν είναι τα εξής:

- Είναι πολύ φιλικές προς το περιβάλλον, έχοντας ουσιαστικά μηδενικά κατάλοιπα και απόβλητα.
- Δεν πρόκειται να εξαντληθούν ποτέ, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα.

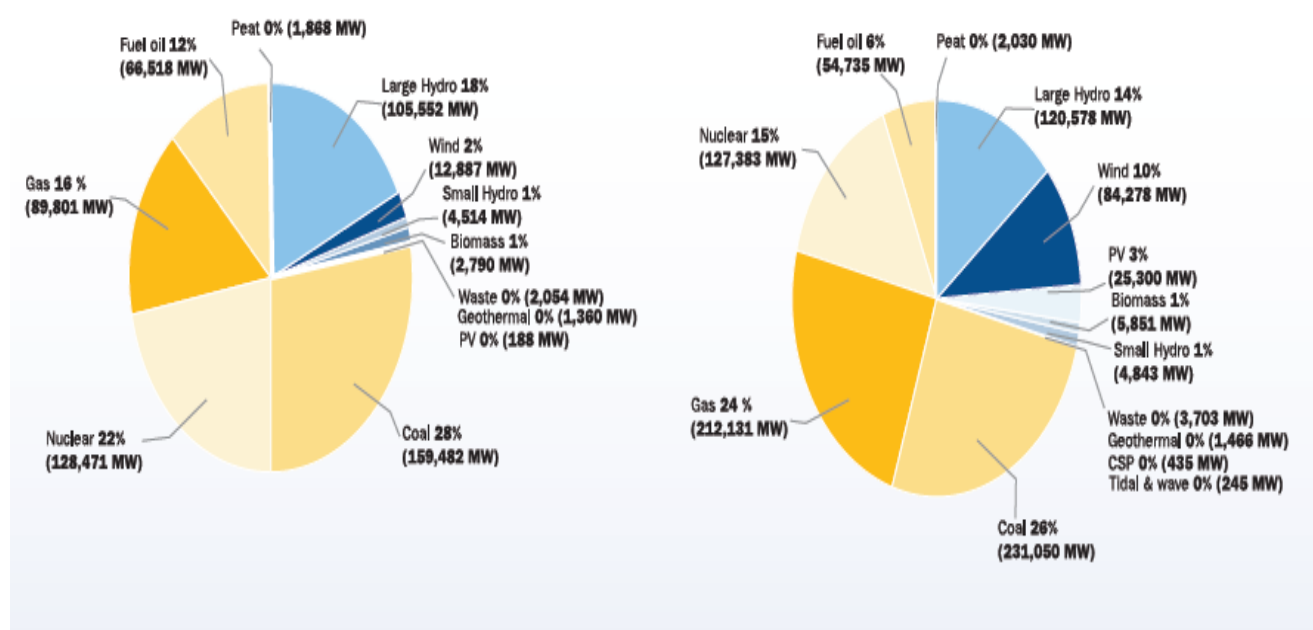
- Μπορούν να βοηθήσουν την ενεργειακή αυτάρκεια μικρών και αναπτυσσόμενων χωρών, καθώς και να αποτελέσουν την εναλλακτική πρόταση σε σχέση με την οικονομία του πετρελαίου.
- Είναι ευέλικτες εφαρμογές που μπορούν να παράγουν ενέργεια ανάλογη με τις ανάγκες του επί τόπου πληθυσμού, καταργώντας την ανάγκη για τεράστιες μονάδες παραγωγής ενέργειας (καταρχήν για την ύπαιθρο) αλλά και για μεταφορά της ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις.
- Ο εξοπλισμός είναι απλός στην κατασκευή και τη συντήρηση και έχει μεγάλο χρόνο ζωής.
- Επιδοτούνται από τις περισσότερες κυβερνήσεις. [1]

Λαμβάνοντας υπόψη αυτά τα πλεονεκτήματα λοιπόν η στροφή στις ΑΠΕ λογίζεται απόλυτα δικαιολογημένη. Για αρκετές χώρες οι ΑΠΕ συνεισφέρουν σημαντικά στο ενεργειακό ισοζύγιο, αποτελώντας σημαντική εγχώρια πηγή ενέργειας και συνάμα συμβάλλοντας στην μείωση της εξάρτησης από το πετρέλαιο και στην προστασία του περιβάλλοντος, λαμβάνοντας υπόψη την περιβαλλοντική καταστροφή που προκαλείται από τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>).

Οι διάφορες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας παρουσιάζονται συνοπτικά:

- **Αιολική ενέργεια** : η κινητική ενέργεια που παράγεται από την ροή του ανέμου μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια και εν συνεχεία σε ηλεκτρική ενέργεια. Χρησιμοποιήθηκε παλιότερα για την άντληση νερού από πηγάδια καθώς και για μηχανικές εφαρμογές. Έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται ευρέως για ηλεκτροπαραγωγή.
- **Ηλιακή ενέργεια** : αξιοποιείται μέσω τεχνολογιών που εκμεταλλεύονται το φάσμα ακτινοβολιών προερχόμενο από τον ήλιο. Χρησιμοποιείται περισσότερο για θερμικές εφαρμογές ενώ η χρήση της για την παραγωγή ηλεκτρισμού έχει αρχίσει να κερδίζει έδαφος, με την βοήθεια της πολιτικής προώθησης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας από το ελληνικό κράτος και την Ευρωπαϊκή Ένωση.
- **Υδατοπτώσεις** : Είναι τα γνωστά υδροηλεκτρικά έργα, που στο πεδίο των ήπιων μορφών ενέργειας εξειδικεύονται περισσότερο στα μικρά υδροηλεκτρικά.
- **Βιομάζα** : Χρησιμοποιεί τους υδατάνθρακες των φυτών (κυρίως αποβλήτων της βιομηχανίας ξύλου, τροφίμων και ζωοτροφών και της βιομηχανίας ζάχαρης) με σκοπό την αποδέσμευση της ενέργειας που δεσμεύτηκε απ' το φυτό με τη φωτοσύνθεση. Ακόμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν αστικά απόβλητα και απορρίμματα.
- **Γεωθερμική ενέργεια** : Προέρχεται από τη θερμότητα που παράγεται απ' τη ραδιενεργό αποσύνθεση των πετρωμάτων της γης. Είναι εκμεταλλεύσιμη εκεί όπου η θερμότητα αυτή ανεβαίνει με φυσικό τρόπο στην επιφάνεια, π.χ. στους θερμοπίδακες ή στις πηγές ζεστού νερού. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε απευθείας για θερμικές εφαρμογές είτε για την παραγωγή ηλεκτρισμού.
- **Ενέργεια από θαλάσσια κύματα**: εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων και την μετατρέπει σε μηχανική η οποία μετασχηματίζεται σε ηλεκτρική.[1]

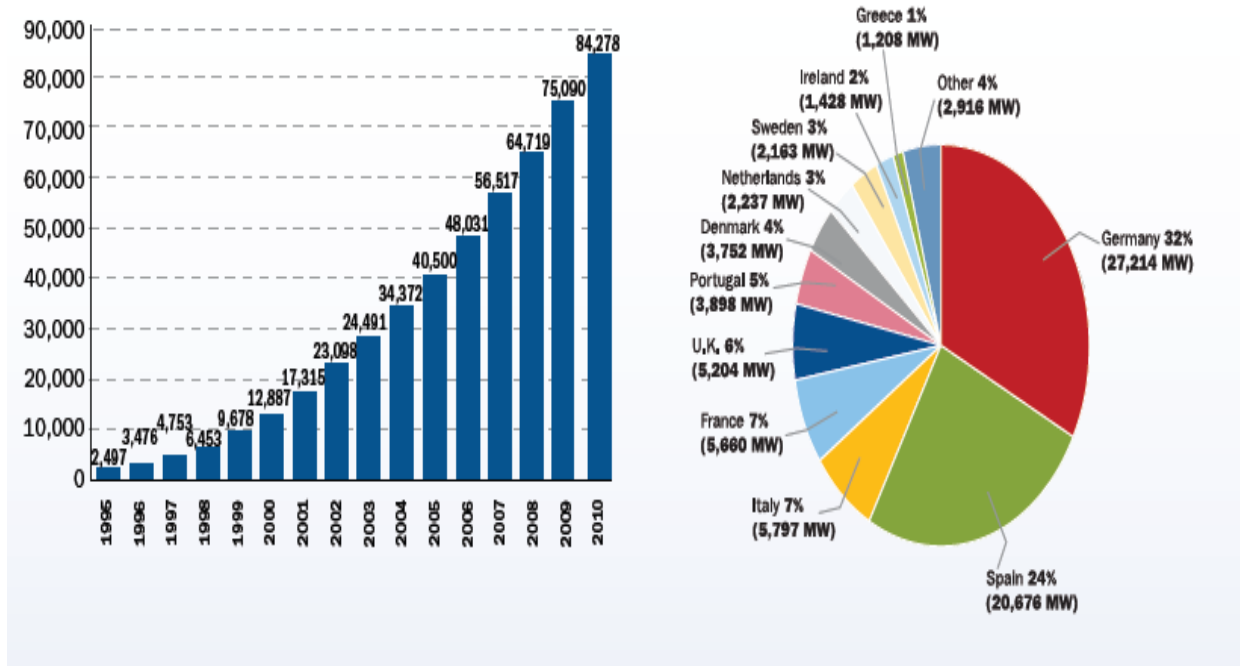
Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η συμμετοχή κάθε μορφής ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Ε.) όπως ήταν στα τέλη του 2000 καθώς και στα τέλη του 2010.[2]



Σχήμα 1.1 : Συμμετοχή όλων των μορφών ενέργειας στην ηλεκτρική παραγωγή το έτος 2000 (αριστερά) και το έτος 2010 (δεξιά)[2].

## 1.2 Αιολική ενέργεια

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η τεχνολογία των ηλεκτρονικών ισχύος ακμάζει τα τελευταία χρόνια. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την υπάρχουσα τεχνολογία των ηλεκτρικών μηχανών και τη ραγδαία βελτίωση των συστημάτων ελέγχου έχουν οδηγήσει στην ευρεία χρήση της αιολικής ενέργειας μέσω των ανεμογεννητριών. Αυτό επαληθεύεται κι από τη συνεχώς αυξανόμενη διείσδυση της αιολικής ενέργειας στα κράτη της Ευρώπης. Η συνολικά εγκατεστημένη ισχύς αιολικών πάρκων στην Ευρώπη ανέρχεται σε 86.279 MW στα τέλη του 2010, ενώ μόνο μέσα στο 2010 παρατηρήθηκε αύξηση της τάξεως των 9.918 MW. Για τα κράτη της Ε.Ε., η εγκατεστημένη ισχύς σε αιολικά πάρκα έχει παρουσιάσει τα τελευταία 10 χρόνια αύξηση της τάξεως του 600%(!). Τα τελευταία 15 χρόνια, από το 1995 μέχρι και σήμερα, οι ετήσιες εγκαταστάσεις αιολικής ισχύος στην Ε.Ε. παρουσιάζουν διαρκή αύξηση από 814 MW το 1995 μέχρι την αύξηση των 9,259 MW που υπήρξε το 2010. Η χώρα μας το 2009 αύξησε την εγκατεστημένη σε αιολικά πάρκα ισχύ κατά 102 MW και το 2010 κατά 123 MW φτάνοντας έτσι συνολικά τα 1208 MW στο τέλος του 2010. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι το 2000 οι ετήσιες εγκαταστάσεις ισχύος σε αιολικά πάρκα της Γερμανίας, της Ισπανίας και της Δανίας αντιπροσώπευαν το 85% της ετήσιας εγκατεστημένης ισχύος σε αιολικά πάρκα ολόκληρης της Ε.Ε., για να φτάσουμε στο 2010 όπου αντιπροσωπεύουν το 36%.[2] Αυτό αποδεικνύει ότι η αιολική ενέργεια έχει εξαπλωθεί σε όλη την Ε.Ε. Η αύξηση της συνολικά εγκατεστημένης ισχύος στην Ε.Ε. και η συμμετοχή της κάθε χώρας γίνονται περισσότερο ευδιάκριτα μέσω του παρακάτω διαγράμματος.



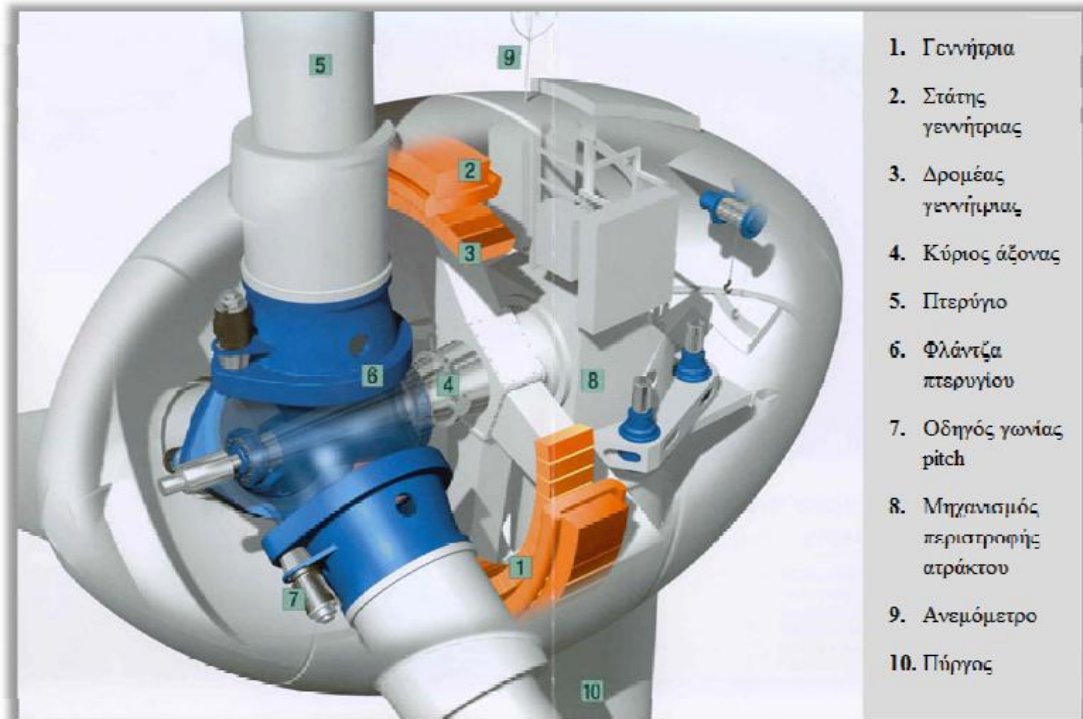
Σχήμα 1.2: Αύξηση της συνολικά εγκατεστημένης «αιολικής» ισχύος (αριστερά) και το ποσοστό με το οποίο συμμετέχει κάθε χώρα (δεξιά)[2].

### 1.3 Συστήματα ηλεκτρομηχανικής μετατροπής και έλεγχος των ανεμογεννητριών.

Μια ανεμογεννήτρια μπορεί να επιμεριστεί σε τρία διαφορετικά τμήματα.[3]

Το **μηχανικό σύστημα** μιας ανεμογεννήτριας περιλαμβάνει:

- Την έλικα και την πλήμνη της, στην οποία βρίσκονται συνδεδεμένα τα πτερύγια
- Το κιβώτιο ταχυτήτων με τους εκατέρωθεν άξονες χαμηλής και υψηλής ταχύτητας και τους συνδέσμους αυτών. Αξίζει να αναφερθεί ότι ανάλογα με το ηλεκτρικό μέρος των ανεμογεννητριών μπορεί να αποφευχθεί η χρήση κιβωτίου ταχυτήτων
- Το σύστημα ελέγχου βήματος των πτερυγίων – pitchcontrol (αν υπάρχει)
- Τη γεννήτρια



Σχήμα 1.3 : Εσωτερικό ανεμογεννήτριας Enercon E-40 600kW[12].

Το **σύστημα ελέγχου** μιας ανεμογεννήτριας είναι υπεύθυνο για την προσαρμογή της λειτουργίας της προς τις εκάστοτε συνθήκες ανέμου (εκκίνηση, κατεύθυνση προς τον άνεμο), για την επιτήρηση της ασφάλειας της καθώς και για την μεγιστοποίηση της απόδοσης της. Οι λειτουργίες ελέγχου είναι οι εξής:

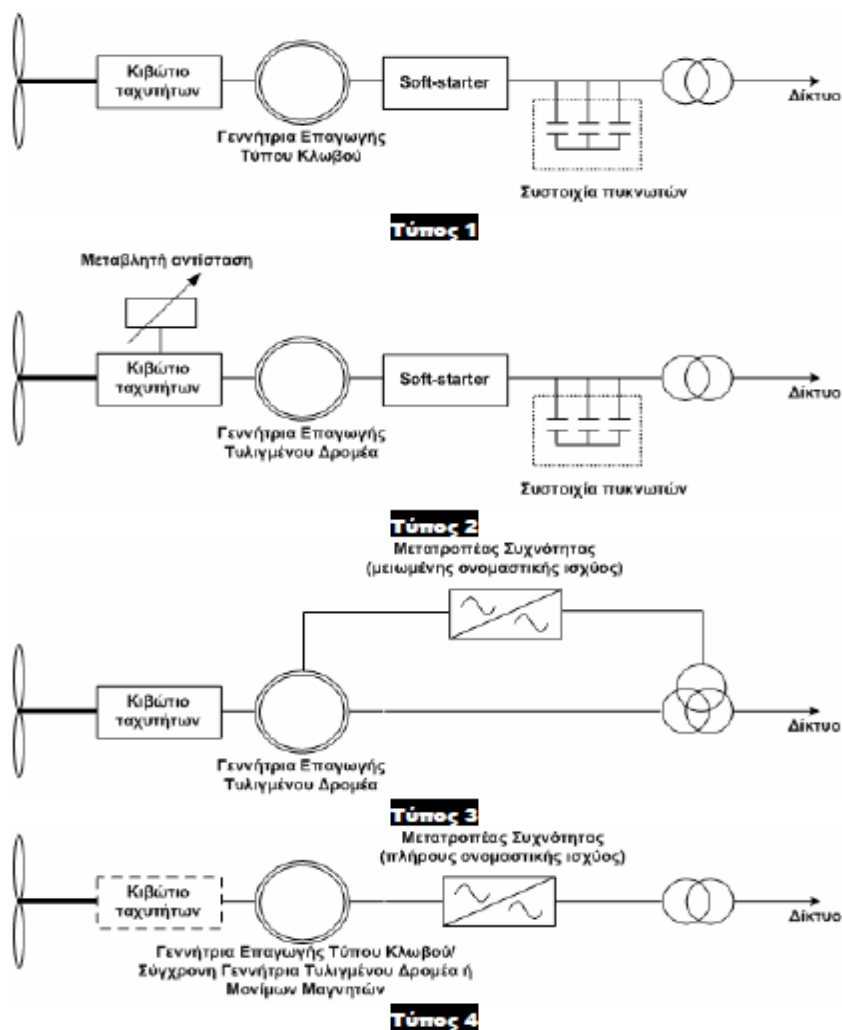
- Αυτές που σχετίζονται με την εκκίνηση και το σταμάτημα της ανεμογεννήτριας , όταν η ταχύτητα του ανέμου πάρει σταθερή τιμή μεγαλύτερη ή μικρότερη αντίστοιχα της ταχύτητας ένταξης.
- Αυτές που είναι υπεύθυνες για τη μη υπέρβαση της ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννήτριας όταν η ταχύτητα του ανέμου γίνει μεγαλύτερη της ταχύτητας αποκοπής. Εδώ υπάρχουν δύο τεχνικές ελέγχου, ο έλεγχος του βήματος της έλικας (pitch control) και ο έλεγχος της αεροδυναμικής ανύψωσης (stall control).
- Αυτές που στοχεύουν στην τοποθέτηση του επιπέδου περιστροφής της έλικας συνεχώς κάθετα προς τη διεύθυνση του ανέμου (ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα μόνο)
- Οι λειτουργίες και τα αντίστοιχα συστήματα ασφαλείας, που πετυχαίνουν το σταμάτημα της περιστροφής της ανεμογεννήτριας και τη κατάλληλη στροφή των πτερυγίων ώστε να παρουσιάζεται η ελάχιστη αντίσταση όταν η ταχύτητα του ανέμου φτάσει το όριο αντοχής της σε μηχανική καταπόνηση.
- Οι λειτουργίες που ελέγχουν τις στροφές της ανεμογεννήτριας (ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών) έτσι ώστε να αποδίδεται η μέγιστη δυνατή ισχύς.
- Οι λειτουργίες που σχετίζονται με τη διασύνδεση της γεννήτριας με το δίκτυο.

Το **ηλεκτρικό σύστημα** περιλαμβάνει τη γεννήτρια και ενδεχομένως κάποιο μετατροπέα ισχύος, ο οποίος θα παρεμβάλλεται μεταξύ της γεννήτριας και του δικτύου ή του φορτίου.

Ανάλογα με τη διαμόρφωση του ηλεκτρικού τους μέρους οι ανεμογεννήτριες μπορούν να χωριστούν σε διάφορους τύπους. Κάθε ένας από αυτούς έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά και διαφορετικά πλεονεκτήματα λειτουργίας.

Οι κύριοι τύποι είναι οι εξής:

- Σταθερών στροφών, με ασύγχρονη γεννήτρια κλωβού απ' ευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο (Τύπος 1)
- Περιορισμένης λειτουργίας μεταβλητών στροφών, με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα μεταβλητής αντίστασης, απ' ευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο (Τύπος 2)
- Μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης (Τύπος 3)
- Μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια με τύλιγμα διεγέρσεως ή μόνιμο μαγνήτη (Τύπος 4)



Σχήμα 1.4 : Επικρατέστερες διαμορφώσεις ηλεκτρικού μέρους ανεμογεννητριών[5].



Βασικά πλεονεκτήματα της ανεμογεννήτριας του τύπου 1 είναι το μικρό βάρος , το χαμηλό κόστος και γενικά η απλότητα που παρουσιάζει η κατασκευή της. Το χαμηλό κόστος βασίζεται στην μη χρησιμοποίηση μεγάλου μετατροπέα και στο ότι η γεννήτρια είναι μια συνηθισμένη ασύγχρονη γεννήτρια κλωβού. Με την απουσία μετατροπέα έχουμε μεγαλύτερη αξιοπιστία ενώ η διάταξη χρειάζεται και λιγότερη συντήρηση. Πέρα όμως των σημαντικών αυτών πλεονεκτημάτων, στις ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών δεν μπορούμε να ρυθμίσουμε τις στροφές τους ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Έτσι προκαλούνται έντονες μηχανικές καταπονήσεις που φθείρουν το σύστημα αφού οποιαδήποτε μεταβολή του ανέμου οδηγεί σε αντίστοιχη μεταβολή της μηχανικής ροπής στον άξονα. Επίσης , εξαιτίας της έλλειψης ηλεκτρονικών ισχύος, η ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών δεν μπορεί να συμβάλλει στη ρύθμιση της άεργου ισχύος που ανταλλάσσεται με το δίκτυο κι έτσι καθίσταται απαραίτητη η τοποθέτηση πυκνωτών στην έξοδο για αντιστάθμιση της άεργου ισχύος. Αποτέλεσμα αυτού είναι η αδυναμία λειτουργίας υπό τις συνθήκες που επιβάλλουν οι νέοι κανονισμοί λειτουργίας των αιολικών πάρκων που συνδέονται στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, η ισχύς εξόδου παρουσιάζει έντονη διακύμανση οδηγώντας σε εκπομπές flicker τάσης και περιορίζοντας τη σύνδεση μεγάλης ποσότητας ισχύος σε ασθενή δίκτυα. Λαμβάνοντας υπόψη αυτά τα μειονεκτήματα η χρήση αυτού του τύπου τα τελευταία χρόνια αποφεύγεται κι έχει σχεδόν εγκαταλειφθεί.

Περνώντας στον τύπο 2 έχουμε ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα, η οποία μας παρέχει τη δυνατότητα μεταβάλλοντας την αντίσταση του δρομέα να ελέγχουμε την ηλεκτρική ροπή. Έτσι, πραγματοποιείται έλεγχος της γεννήτριας και είναι δυνατή η αλλαγή των στροφών κατά τη διάρκεια ριπών ανέμου. Με αυτόν τον τρόπο και μειώνονται σε ένα βαθμό οι μηχανικές καταπονήσεις αλλά και βελτιώνεται η ποιότητα της ισχύος εξόδου.

Πιο συχνή εφαρμογή στην κατασκευή αιολικών πάρκων ωστόσο δεν έχουν οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών αλλά οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών (τύποι 3-4). Οι ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου παρουσιάζουν το πλεονέκτημα της μεταβολής της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου, δηλαδή προσδίδουν αυξημένη ενεργειακή απόδοση. Λόγω του πλεονεκτήματος αυτού έχουμε μειωμένη μηχανική καταπόνηση στα πτερύγια και στο σύστημα μετάδοσης κίνησης, απαλοιφή του κιβωτίου ταχυτήτων, μείωση του ακουστικού θορύβου και προσαρμογή της ανεμογεννήτριας στις τοπικές ανεμολογικές συνθήκες.

Τη σχεδόν αποκλειστική χρήση των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών δικαιολογεί και το γεγονός ότι διοχετεύουν στο δίκτυο καλύτερης ποιότητας ισχύ και το ότι είναι δυνατή η ρύθμιση του συντελεστή ισχύος ανάλογα με τις απαιτήσεις του δικτύου. Η ρύθμιση αυτή επιτυγχάνεται με έλεγχο του μετατροπέα, ώστε ανάλογα με τα επίπεδα τάσης του δικτύου να γίνεται κατάλληλη έγχυση άεργου ισχύος.

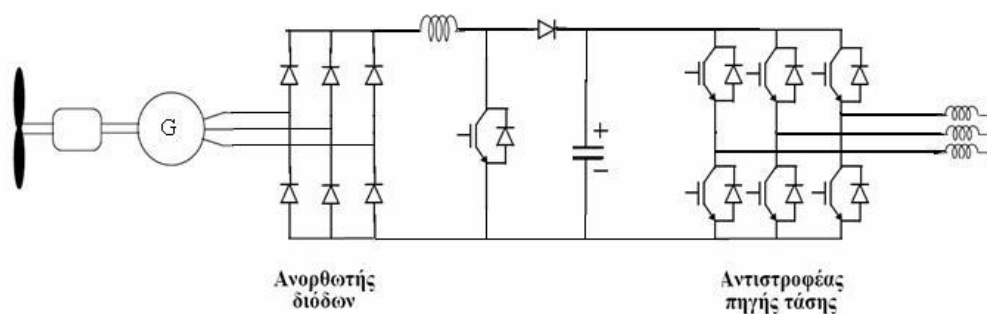
Ο τύπος 3(ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα και διπλή τροφοδότηση με μετατροπέα συνδεδεμένο στο δρομέα) παρουσιάζει δυνατότητα ελέγχου των στροφών με κατάλληλη ρύθμιση της συχνότητας των ρευμάτων που κυκλοφορούν στο δρομέα. Εκτός από τα πλεονεκτήματα των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών που αναφέρθηκαν ο τύπος αυτός είναι αρκετά οικονομικός αφού αποτελείται από μια συνηθισμένη γεννήτρια κι

έναν φθηνό μετατροπέα. Μειονεκτεί στο ότι ο στάτης της γεννήτριας είναι κατευθείαν συνδεδεμένος στο δίκτυο και σε οποιαδήποτε βύθιση της τάσης είναι εκτεθειμένος στη δυναμική συμπεριφορά του δικτύου. Κάτι τέτοιο δεν ισχύει στη διαμόρφωση του τύπου 4 όπου η μεσολάβηση του μετατροπέα ανύψωσης τάσης εξασφαλίζει απομόνωση της συχνότητας του δικτύου και των μεγεθών του στάτη.

Ο τύπος 4 (σύγχρονη γεννήτρια και μετατροπέας EP/ΣP/EP) προτιμάται για σύνδεση στο δίκτυο. Αυτό συμβαίνει αφενός επειδή οι απότομες μεταβολές της ταχύτητας περιστροφής πουμπορούν να προκληθούν είτε εξαιτίας του ανέμου είτε λόγω κάποιας διαταραχής του δικτύου εξομαλύνονται από το δρομέα της, αφετέρου επειδή οποιοδήποτε μεγάλο ρεύμα αποσβένεται από το μαγνητικό κύκλωμα του πυρήνα, ειδικά σε σύγχρονες γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη.[6]Ακόμα, η απουσία κιβωτίου ταχυτήτων τον καθιστά ελκυστικό σε θέματα κόστους, βάρους, αξιοπιστίας και μειωμένου θορύβου. Η μεγάλη και βαριά γεννήτρια που χρησιμοποιεί αυτή η διαμόρφωση καθώς και το ότι όλη η παραγόμενη ισχύς μεταφέρεται από τον μετατροπέα – περιορίζοντας τη λειτουργία του συστήματος ειδικά σε έκτακτες καταστάσεις λειτουργίας και την ικανότητα αδιάλειπτης παροχής ισχύος – αποτελούν τα βασικά μειονεκτήματα της.

### 1.3.1 Συνήθειες τοπολογίες μετατροπέων σε συστήματα ανεμογεννητριών

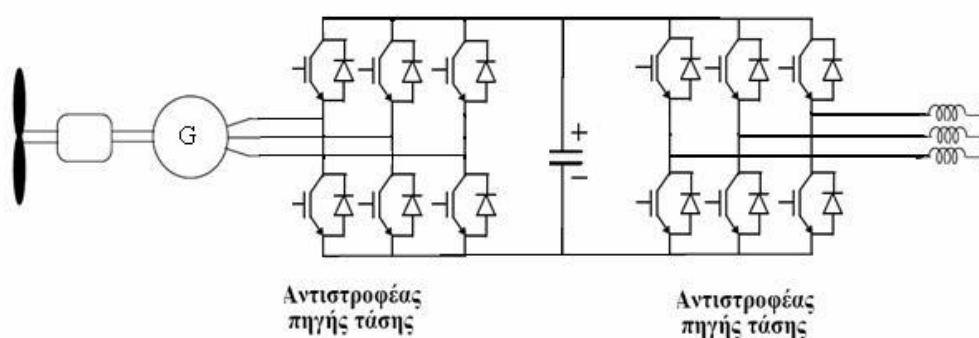
Διάφοροι τύποι μετατροπέων χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις ανεμογεννητριών που συνδέονται στο δίκτυο. Ένα παράδειγμα τοπολογίας είναι αυτό που παρουσιάζεται στο σχήμα 1.5, το οποίο είναι αυτό που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία.



Σχήμα 1.5 : Μετατροπέας EP/ΣP/EP με απλή ανόρθωση διόδων , μετατροπέα ανύψωσης τάσης και αντιστροφέα τύπου πηγής τάσης[12].

Η ανεμογεννήτρια συνδέεται στο δίκτυο μέσω μιας τριφασικής μη ελεγχόμενης ανόρθωσης, ενός μετατροπέα DC/DC κι ενός αντιστροφέα. Ο DC/DC μετατροπέας εξυπηρετεί στο MPPT (Maximum Power Point Tracking), στον έλεγχο δηλαδή των στροφών της γεννήτριας ώστε να παίρνουμε την μέγιστη δυνατή ισχύ εξόδου. Η τοπολογία αυτή θα μελετηθεί αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

Μια άλλη τοπολογία παρουσιάζεται στο σχήμα 1.6, είναι γνωστή ως “back-to-back” και είναι η σύνδεση δύο μετατροπέων τύπου πηγής τάσης. Ο μετατροπέας που βρίσκεται συνδεδεμένος με τη γεννήτρια εκτελεί ελεγχόμενη ανορθωτική λειτουργία και ο άλλος λειτουργεί ως αντιστροφέας. Σε αυτή την περίπτωση τη διαδικασία MPPT και την προσαρμογή της τάσης αναλαμβάνει ο ανορθωτής και τη μεταγωγή ισχύος προς το δίκτυο την αναλαμβάνει ο αντιστροφέας.



Σχήμα 1.6 : Μετατροπέας EP/ΣP/EP με σύνδεση back-to-back αντιστροφέων[12]

#### 1.4 Απαιτήσεις κωδίκων για τη σύνδεση ανεμογεννήτριας στο δίκτυο

Η συνεχώς αυξανόμενη αιολική διείσδυση κατέστησε απαραίτητη τη θέσπιση ορισμένων κανόνων και κωδίκων για τη σύνδεση αιολικών πάρκων στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Αν θεωρήσουμε ότι έχουμε σταθερή ζήτηση, τότε σε ένα ηλεκτρικό σύστημα στο οποίο έχει συνδεθεί ένα αιολικό πάρκο, οι μεταβολές της ισχύος εξόδου έχουν σαν αποτέλεσμα μεταβολές της συχνότητας του δικτύου. Γι' αυτό το λόγο τα αιολικά πάρκα αντιμετωπίζονται ως αρνητικά φορτία στο παρελθόν και σε περίπτωση κάποιας διαταραχής αποσυνδέονταν. Αυτό όμως ήταν εφικτό αφού η αιολική διείσδυση ήταν περιορισμένη σε βαθμό που δεν επηρεαζόταν η λειτουργία του συστήματος και δεν υπήρχαν προβλήματα μεταβατικής ευστάθειας. Ωστόσο, αν η αιολική διείσδυση είναι μεγάλη (σε χώρες όπως η Γερμανία, η Ισπανία και η Δανία φτάνει το 20%) απότομη αποσύνδεση των αιολικών πάρκων αποτελεί πολύ μεγάλη διαταραχή με αποτέλεσμα πιθανή μεταβατική αστάθεια του συστήματος, ακόμα και μερικό ή ολικό μπλακ άουτ. Επομένως, προκειμένου να επιτευχθεί ομαλή λειτουργία των συστημάτων και μεγαλύτερη αιολική διείσδυση στην συνολική παραγωγή έχουν τεθεί συγκεκριμένες απαιτήσεις για τη συνεισφορά των αιολικών πάρκων στον έλεγχο του συστήματος.

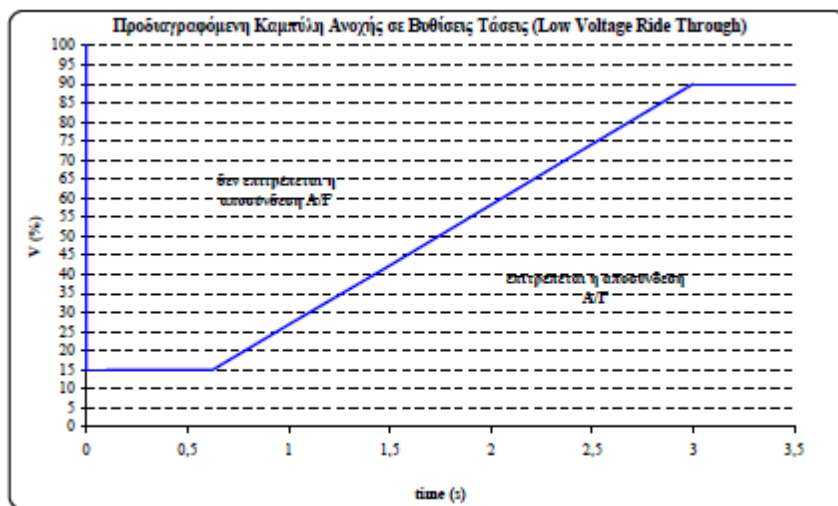
Οι ιδιαίτερες τεχνικές απαιτήσεις που θα μας απασχολήσουν στην παρούσα εργασία είναι:

- Ανοχή σε βυθίσεις τάσης και απόκριση κατά τη διάρκεια και μετά την εκκαθάριση σφαλμάτων στο δίκτυο
- Έλεγχος τάσης και άεργου ισχύος
- Έλεγχος συχνότητας και ενεργού ισχύος

### 1.4.1 Ανοχή σε βυθίσεις τάσης και απόκριση κατά τα διάρκεια και μετά την εκκαθάριση σφαλμάτων στο δίκτυο

Υπεύθυνα για την εμφάνιση σφαλμάτων στα ηλεκτρικά δίκτυα είναι βραχυκυκλώματα μεταξύ των αγωγών μιας ή περισσότερων φάσεων και της γης. Διατίθεται αυτόματος εξοπλισμός στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να ανιχνεύονται και να απομονώνονται όποια τμήματα του δικτύου κρίνεται απαραίτητο μέσω διακοπών προστασίας. Στην περίπτωση μικρής αιολικής διείδυσης, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, μια πιθανή βύθιση στην τάση ενός αιολικού πάρκου ακολουθούσε απομάκρυνση του από το δίκτυο.

Με την ανάπτυξη αιολικών σταθμών μεγάλης ισχύος (πολλών δεκάδων ή και εκατοντάδων MW) δυσχεραίνουν οι επιπτώσεις από πιθανή απώλεια παραγωγής λόγω βυθίσεων τάσης και μπορούν να αποβούν καθοριστικές για την ευστάθεια του συστήματος. Οι κώδικες αυτοί εκφράζουν τα συγκεκριμένα κριτήρια που πρέπει να πληρούνται για τη δυνατότητα συνέχισης της λειτουργίας των ανεμογεννητριών σε καταστάσεις βύθισης τάσης, οι οποίες αναφέρονται και ως Fault Ride-Through (FRT) ή Low Voltage Ride-Through (LVRT) Capability και εκφράζονται μέσω καμπυλών τάσης- χρόνου, όπως η καμπύλη του σχήματος 1.7.



Σχήμα 1.7 : Τυπική καμπύλη προδιαγραφών ανοχής αιολικών πάρκων σε βυθίσεις τάσης[5]

Όπως φαίνεται στην καμπύλη αυτή, για βυθίσεις τάσης πάνω από το προκαθορισμένο όριο τα αιολικά πάρκα πρέπει να παραμένουν συνδεδεμένα στο δίκτυο και να αποσυνδέονται σε αντίθετη περίπτωση. Η μορφή της καμπύλης αυτής διαφέρει ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του κάθε συστήματος και γι' αυτό η κάθε χώρα διαθέτει τις δικές της καμπύλες.

### 1.4.2 Έλεγχος τάσης και άεργου ισχύος

Κατά την εγκατάσταση των πρώτων αιολικών πάρκων στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών ήταν εφοδιασμένες με γεννήτριες επαγωγής και

κατανάλωναν άεργο ισχύ κατά τη λειτουργία τους. Έτσι, αρχικά οι διαχειριστές του δικτύου απαιτούσαν κάποιες ελάχιστες τιμές για το συντελεστή ισχύος (SI) του αιολικού πάρκου.

Από τη στιγμή που οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών πήραν τη θέση των ανεμογεννητριών σταθερών στροφών και με την ακόμα μεγαλύτερη αιολική διείδυση στο δίκτυο είχαμε αύξηση και τροποποίηση των απαιτήσεων σχετικά με τον SI των αιολικών πάρκων. Έτσι, τα όρια μέσα στο οποία μπορεί να ρυθμιστεί ο SI έχουν μεγαλύτερο εύρος τόσο για επαγωγική όσο και για χωρητική λειτουργία. Επίσης, τα όρια ρύθμισης σε πολλούς κώδικες εξαρτώνται από τα επίπεδα τάσης των ζυγών στο δίκτυο σύνδεσης, λαμβάνοντας υπόψη ότι είναι απαραίτητο να εξασφαλίζονται ονομαστικές τιμές τάσης από την παραγωγή ή κατανάλωση άεργου ισχύος. Αξίζει επίσης να αναφερθεί η ποικιλία στους κώδικες δικτύων όσον αφορά στη συμβολή των αιολικών πάρκων στη ρύθμιση των επιπέδων τάσης και άεργου ισχύος. Πλέον τα αιολικά πάρκα προτιμάται να μπορούν να έχουν ενεργό ρόλο στη ρύθμιση αυτή, παρόμοιο με αυτό των συμβατικών σταθμών παραγωγής. Σε γενικές γραμμές, προβλέπεται η ρύθμιση του SI είτε λαμβάνοντας συγκεκριμένες εντολές από κεντρικό σύστημα ρύθμισης ελεγχόμενο από το διαχειριστή του δικτύου είτε αυτόματα μέσω χαρακτηριστικής συνάρτησης που θα περιλαμβάνει και την τάση του συστήματος.

#### **1.4.3. Έλεγχος συχνότητας και ενεργού ισχύος**

Για να εξασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία των ΣΗΕ θα πρέπει η συχνότητα να παραμένει σχεδόν αμετάβλητη και ίση με την ονομαστική της τιμή. Είναι απαραίτητη η διασφάλιση της ισορροπίας του ισοζυγίου παραγωγής-κατανάλωσης ενεργού ισχύος σε κάθε στιγμή, καθώς σε αντίθετη περίπτωση προκύπτουν ανεπιθύμητες μεταβολές της συχνότητας. Η συχνότητα είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την ταχύτητα περιστροφής των συνδεδεμένων στο δίκτυο σύγχρονων και ασύγχρονων μηχανών. Όταν η συχνότητα μεταβάλλεται πέρα από κάποια ασφαλή και καθορισμένα γύρω από την ονομαστική της τιμή όρια η ασφάλεια αυτών των μηχανών είναι σε κίνδυνο. Αντίθετα με τη ρύθμιση της τάσης, μια διαταραχή του ισοζυγίου ενεργού ισχύος είναι ικανή να προκαλέσει διακυμάνσεις της συχνότητας σε όλο το εύρος του δικτύου. Σε περίπτωση σημαντικής πτώσης της συχνότητας είναι υπαρκτό το ενδεχόμενο πρόκλησης υψηλών ρευμάτων μαγνήτισης σε ασύγχρονους κινητήρες και μετασχηματιστές.

Για να επιτευχθεί ασφαλής λειτουργία του συστήματος και παραμονή της συχνότητας στα επιθυμητά επίπεδα πραγματοποιείται διόρθωση του μόνιμου σφάλματος της συχνότητας με κατάλληλη ρύθμιση στροφών των ρυθμιστών στροφών των γεννητριών. Συγκεκριμένα, οι μονάδες παραγωγής ενεργού ισχύος αναγκάζονται να μειώσουν ή να αυξήσουν την παραγωγή τους μετακινώντας κατάλληλα τις χαρακτηριστικές φορτίου συχνότητας. Εξασφαλίζεται έτσι η επαναφορά της συχνότητας στα προκαθορισμένα όρια ονομαστικής λειτουργίας[21].

## 1.5 Δομή της εργασίας

Αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί μια ανεμογεννήτρια ισχύος 2MW με σύγχρονη γεννήτρια με τύλιγμα διέγερσης. Αναπτύσσεται ένα δυναμικό μοντέλο προσομοίωσης της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας και αναλύονται τα επιμέρους συστήματα και οι ελεγκτές που την αποτελούν. Εξετάζεται η λειτουργική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας τόσο σε ομαλές συνθήκες όσο και κατά τη διάρκεια διαταραχών όπως βύθιση τάσης ή συχνότητας. Υλοποιούνται ελεγκτές που προσπαθούν να ομαλοποιήσουν τη λειτουργία της κατά τη διάρκεια των διαταραχών αλλά και να αυξήσουν τη συνεισφορά της προς το δίκτυο είτε ενισχύοντας την τάση είτε τη συχνότητα. Η εργασία αναπτύσσεται σε 7 κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο έγινε μια επισκόπηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των αιολικών συστημάτων αλλά και των τεχνολογιών που εφαρμόζονται σε συστήματα ανεμογεννητριών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών του συστήματος της ανεμογεννήτριας με σύγχρονη γεννήτρια με τύλιγμα διέγερσης. Πιο συγκεκριμένα, αναλύεται το αεροδυναμικό της μέρος, το σύστημα μετάδοσης κίνησης και η σύγχρονη γεννήτρια που χρησιμοποιείται. Επιπλέον, γίνεται διεξοδική ανάλυση του μετατροπέα ανύψωσης τάσης αλλά και της μεθόδου ανεύρεσης του σημείου μέγιστης λειτουργίας του ελεγκτή που είναι ενσωματωμένος στον μετατροπέα αυτό. Τέλος, γίνεται ανάλυση και του αντιστροφέα τύπου πηγής τάσης που χρησιμοποιείται.

Στο τρίτο κεφάλαιο πραγματοποιείται εκτενής ανάλυση του συστήματος ελέγχου του αντιστροφέα και της μοντελοποίησης αυτού και παρουσιάζεται επίσης ο τρόπος με τον οποίο δύναται να παραχθεί άεργος ισχύς για ανύψωση της τάσης σε περιπτώσεις βύθισης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο επιβεβαιώνεται η ομαλή λειτουργία της ανεμογεννήτριας σε συνθήκες σταθερής ταχύτητας ανέμου αλλά και σε βηματικές μεταβολές αυτής. Επίσης, εξετάζεται η απόκριση σε συγκεκριμένες χρονοσειρές ανέμου και σχολιάζονται τα αποτελέσματα.

Στο πέμπτο κεφάλαιο θεωρώντας σταθερή την αεροδυναμική ροπή πραγματοποιείται έλεγχος της απόκρισης του συστήματος σε βυθίσεις τάσης. Σχεδιάζεται και εξετάζεται ελεγκτής υπότασης που μπορεί να λειτουργήσει βάσει των επιθυμιών του διαχειριστή του δικτύου είτε βάσει ενός κώδικα κάποιας χώρας. Γίνονται προσομοιώσεις βασισμένες στον Γερμανικό κώδικα. Τέλος, σχεδιάζεται σύστημα ελέγχου που καθορίζει την παραμονή ή αποσύνδεση της ανεμογεννήτριας από το δίκτυο σε περιπτώσεις βυθίσεων τάσης.

Στο έκτο κεφάλαιο σχεδιάζεται ελεγκτής συχνότητας βασισμένος σε μια πρότυπη καμπύλη αλλά και με μεγάλη προσαρμοστικότητα στην καμπύλη ισχύος/συχνότητας οποιασδήποτε χώρας. Πραγματοποιούνται προσομοιώσεις με σταθερή ταχύτητα ανέμου και για τις δύο περιπτώσεις, με εφαρμογή στη δεύτερη περίπτωση της καμπύλης της Ιρλανδίας. Η αποτελεσματικότητα του ελεγκτή εξετάζεται και σε πρότυπο υβριδικό δίκτυο ανεμογεννήτριας – σύγχρονης γεννήτριας – φορτίου αλλά κυρίως στο ηλεκτρικό δίκτυο της

Κύθνου, όπου ενσωματώνεται σε μια ανεμογεννήτρια ισχύος 500kW σε συνθήκες υψηλού ανέμου.

Στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο αποτυπώνονται τα κυριότερα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από την παρούσα διπλωματική εργασία και αναφέρονται τα καινοτόμα στοιχεία της. Επίσης, επισημαίνονται θέματα που ανέδειξε η εργασία αυτή και θα μπορούσαν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής μελέτης. Τέλος, ακολουθεί η βιβλιογραφία αλλά και ένα παράρτημα με τα μοντέλα προσομοίωσης από το Simulink/Matlab.

## **1.6 Συνεισφορά της εργασίας**

Η συνεισφορά της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σχεδίαση ενός δυναμικού μοντέλου πραγματικού χρόνου στο Simulink/Matlab, το οποίο προσομοιώνει τη σύνδεση μιας ανεμογεννήτριας ισχύος 2MW στο δίκτυο και την απόκριση της στις διάφορες διαταραχές αυτού. Το μοντέλο προσομοιώνει όλα τα υποσυστήματα της ανεμογεννήτριας καθώς και τους ελεγκτές που σχεδιάστηκαν. Οι ενσωματωμένοι ελεγκτές έχουν ως στόχο να βελτιώσουν τη συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας σε διαταραχές τάσης και συχνότητας δικτύου καθώς και να ενισχύσουν την προσφορά της προς αυτό. Σχεδιάζεται ελεγκτής που ενισχύει την τάση του δικτύου σε περίπτωση διαταραχής αλλά και αποσυνδέει την ανεμογεννήτρια από αυτό όταν είναι απαραίτητο και ελεγκτής που ενισχύει τη συχνότητα του δικτύου σε περίπτωση διαταραχής της. Εξάγονται έτσι χρήσιμα συμπεράσματα για τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος και για την αποτελεσματικότητα των ελεγκτών. Τέλος, ο ελεγκτής της συχνότητας βρίσκει εφαρμογή στο πραγματικό ηλεκτρικό δίκτυο της Κύθνου, το οποίο σχεδιάστηκε λεπτομερώς στο Simulink/Matlab.

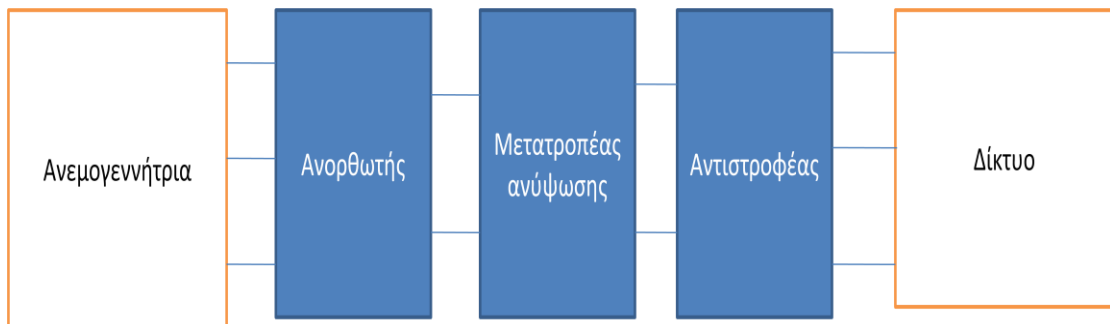
---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

---

### 2.Χαρακτηριστικά συστήματος

Το σύστημα που χρησιμοποιείται για τις προσομοιώσεις μας είναι μια ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια με τύλιγμα πεδίου ονομαστικής ισχύος 2 MW, ονομαστικής συχνότητας 50 Hz. Για την ανόρθωση της τάσης στην έξοδο της γεννήτριας χρησιμοποιείται μια τριφασική, μη ελεγχόμενη γέφυρα διόδων. Η ανορθωμένη τάση εφαρμόζεται σε έναν dc – dc μετατροπέα ανύψωσης (boost converter) και στη συνέχεια μετατρέπεται σε εναλλασσόμενη μέσω ενός αντιστροφέα τύπου πηγής τάσης (Voltage Source Inverter – VSI). Ο αντιστροφέας μεταβιβάζει την ισχύ στο δίκτυο μέσω γραμμών μεταφοράς, ζυγών, φίλτρων και μετασχηματιστών. Τέλος, έχουμε δύο ελεγκτές: έναν για τον αντιστροφέα, όπου γίνεται έλεγχος της άεργου ισχύος και της τάσης στην είσοδο του αντιστροφέα και έναν για τον boost converter, όπου βρίσκεται το σημείο λειτουργίας που μεγιστοποιεί την παραγόμενη ισχύ (Maximum Power Point Tracking – MPPT) και γίνεται έλεγχος κλίσης πτερυγίων (pitch control). Μια συνοπτική παρουσίαση του συστήματος παρουσιάζεται στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 : Σύστημα προσομοίωσης.



## 2.1. Αεροδυναμικό μέρος της Α/Γ

Η αεροδυναμική ισχύς που δέχεται ένας ανεμοκινητήρας δίνεται από τη σχέση [17] :

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot V_w^3 \quad (2.1.1)$$

όπου έχουμε:

$\rho$  : πυκνότητα του αέρα ( $\rho \approx 1,1225 \text{ kg/m}^3$ )

$A$  : επιφάνεια του δρομέα ( $A = \pi R^2$  σε  $\text{m}^2$ )

$V_w$  : ταχύτητα του ανέμου (m/sec)

$C_p$  : αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος.

Όπως φαίνεται από την (2.1.1) η αεροδυναμική ισχύς εξαρτάται από πολλά μεγέθη. Συνήθως η πυκνότητα του αέρα θεωρείται σταθερή και ίση με  $\rho \approx 1,1225 \text{ kg/m}^3$ . Επίσης σταθερό μέγεθος είναι και η ακτίνα της έλικας του δρομέα  $R$ , άρα και η επιφάνεια του δρομέα  $A$ . Τα μεγέθη που μεταβάλλονται και επηρεάζουν έτσι την παραγωγή ισχύος είναι η ταχύτητα του ανέμου  $V_w$  και ο αεροδυναμικός συντελεστής  $C_p$ . Εξαιτίας της τρίτης δύναμης που έχει η ταχύτητα του ανέμου στην εξίσωση (2.1.1) προκύπτουν μεγάλες μεταβολές στην ισχύ εξόδου σε γρήγορες μεταβολές του ανέμου ( $P_w \sim V_w^3$ ).

Για το  $\lambda$  που είναι ο λόγος της ταχύτητας του ακροπτερυγίου προς την ταχύτητα του ανέμου έχουμε τη σχέση:

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega_r}{V_w} \quad (2.1.2)$$

$R$ : ακτίνα της έλικας (m)

$\omega_r$ : γωνιακή ταχύτητα του δρομέα (rad/sec)

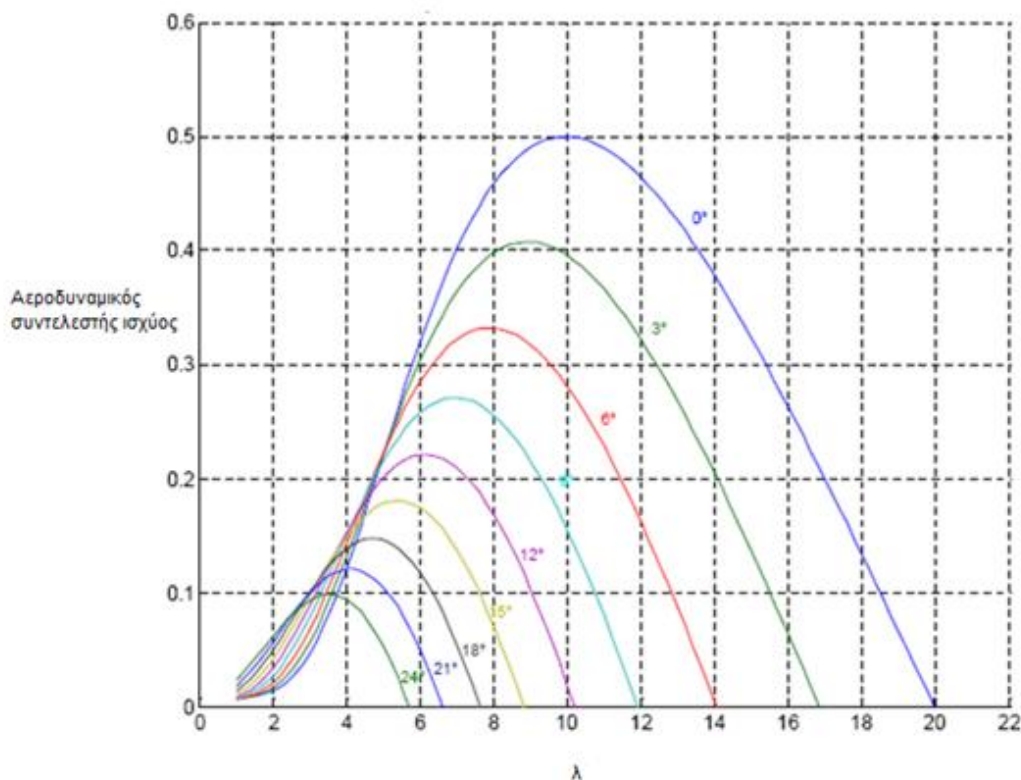
Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος  $C_p$  μεταβάλλεται συναρτήσει του λόγου  $\lambda$  αλλά και της γωνίας pitch της έλικας  $\beta$ . Η μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει αυτός ο συντελεστής είναι 0,59 και αυτό προκύπτει από τον νόμο του Betz, ο οποίος αναφέρει ότι δεν δύναται να αξιοποιηθεί πάνω από το 59,3% της ταχύτητας του ανέμου από μια ανεμογεννήτρια. Οι πραγματικές μέγιστες τιμές του αεροδυναμικού συντελεστή που έχουν οι ανεμογεννήτριες βρίσκονται μεταξύ του 0.3 και του 0.5. Η συνάρτηση που μας δίνει το  $C_p$  στη συγκεκριμένη εργασία είναι η εξής:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \cdot (c_6 \cdot \lambda + (-c_4 - c_3 \cdot (2.5 + \beta)) + c_2 \cdot (\frac{1}{\lambda + c_7 \cdot (2.5 + \beta)} - \frac{c_8}{1 + (2.5 + \beta)^3})) \cdot e^{-c_5 \cdot (\frac{1}{\lambda + c_7 \cdot (2.5 + \beta)} - \frac{c_8}{1 + (2.5 + \beta)^3})}$$

Οι μεταβλητές  $c_1$  ως  $c_8$  που χρησιμοποιούνται είναι σταθερές και έχουν τις ακόλουθες τιμές:

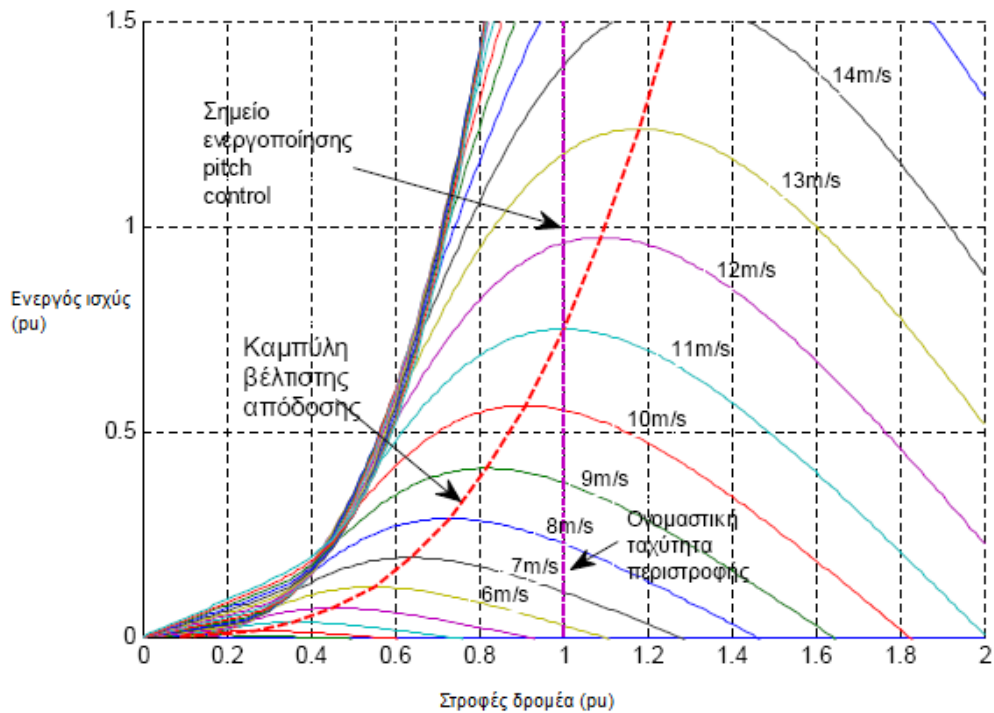
$C_1$	<b>0.645</b>	$C_5$	<b>21</b>
$C_2$	<b>116</b>	$C_6$	<b>0.0912</b>
$C_3$	<b>0.4</b>	$C_7$	<b>0.08</b>
$C_4$	<b>5</b>	$C_8$	<b>0.035</b>

Στο παρακάτω σχήμα (2.1.1) απεικονίζονται οι καμπύλες  $C_p(\lambda)$  για γωνίες βήματος έλικας από  $0^\circ$  ως  $24^\circ$ .



Σχήμα 2.1.1. Καμπύλες αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος συναρτήσει των  $\lambda, \beta$ . Η γωνία βήματος έλικας αυξάνεται με βήμα  $3^\circ$ .

Από το παραπάνω σχήμα διακρίνουμε ότι ο μέγιστος αεροδυναμικός συντελεστής  $C_p$  προκύπτει για γωνία pitch  $0^\circ$ , για  $\lambda = \lambda_{opt} = 9.9495$  και είναι ίσος με  $C_p = C_{p\_max} = 0.5$ .

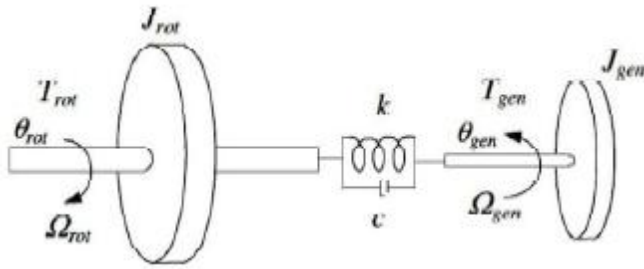


Σχήμα 2.1.2. Καμπύλες ισχύος – ταχύτητας περιστροφής του δρομέα( $\beta=0^\circ$ ).

Το παραπάνω σχήμα (2.1.2) απεικονίζει τις χαρακτηριστικές καμπύλες αεροδυναμικής ισχύος συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής του δρομέα. Η καμπύλη βέλτιστης απόδοσης περιλαμβάνει τα σημεία εκείνα όπου η ανεμογεννήτρια λειτουργεί με τον μέγιστο  $C_p$  για τη συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου. Έτσι για κάθε ταχύτητα ανέμου έχουμε μια τιμή της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα με την οποία πρέπει να λειτουργεί η ανεμογεννήτρια και η οποία αποκτάται με ρύθμιση του MPPT ελεγκτή. Για μεγάλες ταχύτητες ανέμου ( $V_w > 11\text{m/s}$ ) ο MPPT ελεγκτής κρατάει σταθερή την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα και μέσω του pitch control η ισχύς διατηρείται σε ονομαστικά επίπεδα. Για την ανεμογεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, η ονομαστική ισχύς της είναι 2MW, η ονομαστική ταχύτητα περιστροφής του δρομέα 30 ΣΑΛ και οι ταχύτητες του ανέμου cut-in και cut-out 4m/s και 25m/s αντίστοιχα.

## 2.2. Σύστημα μετάδοσης κίνησης.

Προκειμένου να αναπαρασταθεί η πραγματική μηχανική ζεύξη φτερωτής – γεννήτριας χρησιμοποιείται το ισοδύναμο μοντέλο των δύο μαζών (σχήμα 2.2.1).

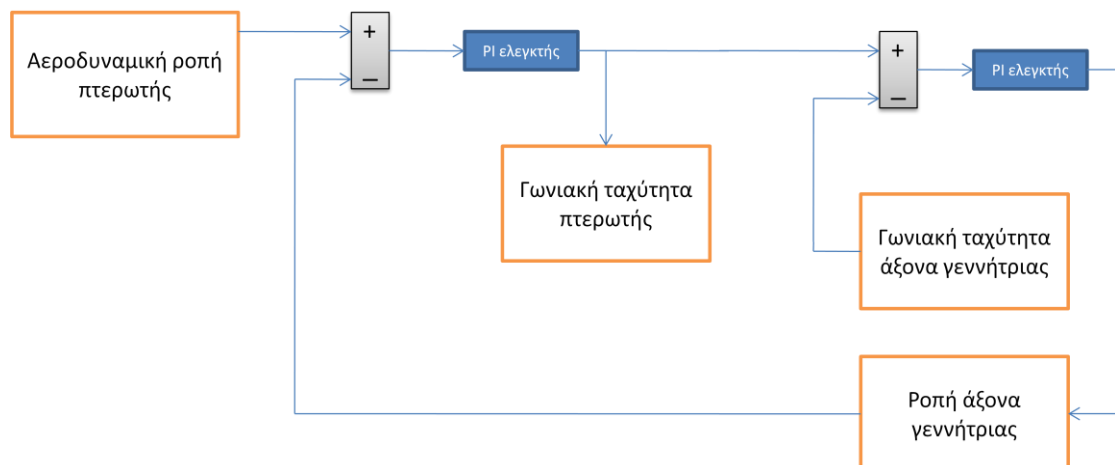


Σχήμα 2.2.1. Μοντέλο δύο μαζών για την αναπαράσταση του συστήματος μετάδοσης της Α/Γ[12]

Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό λοιπόν αναπαρίσταται η αδράνεια της πτερωτής(τρεις έλικες και άξονας) με την αριστερή μάζα  $J_{rot}$  και η αδράνεια της γεννήτριας με την δεξιά μάζα  $J_{gen}$ . Ο άξονας που συνδέει αυτές τις δύο μάζες είναι ένας ελαστικός άξονας κι έχει σκληρότητα  $k$  και σταθερά απόσβεσης  $c$ . Όπως φαίνεται και στο σχήμα, στην αριστερή πλευρά, δηλαδή στην πτερωτή, ασκείται η αεροδυναμική ροπή  $T_{rot}$  και στη δεξιά πλευρά η ηλεκτρική ροπή  $T_{gen}$  αντίθετης φοράς. Ο άξονας όπως αναφέρθηκε είναι ελαστικός, με αποτέλεσμα η Α/Γ να είναι επιρρεπής σε ταλαντώσεις της γωνιακής ταχύτητας όταν έχουμε απότομη μεταβολή της ηλεκτρικής ή της αεροδυναμικής ροπής.

Για να επιτευχθεί απόσβεση των μηχανικών ταλαντώσεων μιας σύγχρονης γεννήτριας με τύλιγμα διέγερσης είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση ενός σταθεροποιητή. Αυτός δίνει σήμα στον ελεγκτή για τη διέγερση της μηχανής ώστε να προκύψει μια επιπρόσθετη συνιστώσα ηλεκτρικής ροπής, σε φάση με την μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας της γεννήτριας. Με αύξηση της γωνιακής ταχύτητας έχουμε έτσι ταυτόχρονη αύξηση στην ηλεκτρική ροπή της γεννήτριας που τείνει να αναιρέσει την προηγούμενη αύξηση. Δηλαδή, ο σταθεροποιητής προκαλεί μια θετική ροπή απόσβεσης στη συχνότητα των ταλαντώσεων που οφείλονται στον κινητήριο άξονα.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το μοντέλο προσομοίωσης του συστήματος μετάδοσης κίνησης της Α/Γ. Σαν πρώτη είσοδο έχουμε την αεροδυναμική ροπή της πτερωτής  $T_{wt}$ , η οποία υπολογίζεται από το προηγούμενο υποσύστημα και συγκρίνεται με τη ροπή στον άξονα της γεννήτριας  $T_{shaft}$ . Η διαφορά αυτών των δύο μεγεθών παρέχεται σε έναν ολοκληρωτή με κέρδος τη σταθερά αδράνειας  $H$  της πτερωτής. Προκύπτει έτσι η γωνιακή ταχύτητα της πτερωτής  $\omega_{wt}$  και αποτελεί την πρώτη έξοδο του συστήματος.



Σχήμα 2.2.2. Μοντέλο προσομοίωσης συστήματος μετάδοσης κίνησης

Σαν δεύτερη είσοδο έχουμε τη γωνιακή ταχύτητα του άξονα της γεννήτριας  $w_e$ , η οποία συγκρίνεται με τη γωνιακή ταχύτητα της πτερωτής  $W_{wt}$  και η διαφορά τους παρέχεται σε PI ελεγκτή με κέρδος ολοκλήρωσης τη σκληρότητα  $k$  και αναλογικό κέρδος τη σταθερά απόσβεσης  $c$ . Προκύπτει έτσι η ροπή στον άξονα της γεννήτριας  $T_{shaft}$  κι αποτελεί τη δεύτερη έξοδο του συστήματος. Αυτά αποδεικνύονται από τις παρακάτω σχέσεις.

$$T_{wt} - T_{shaft} = 2H \frac{d\omega}{dx} \Rightarrow \omega = \frac{1}{2H} \int (T_{wt} - T_{shaft}) dt$$

$$-J_{gen} \frac{dw_e}{dt} = T_{shaft} + k\theta_{rg} + c(w_{wt} - w_e)$$

### 2.3. Σύγχρονη γεννήτρια.

Η γεννήτρια που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι πολυπολική με τύλιγμα διέγερσης. Το συγκεκριμένο μοντέλο γεννήτριας, που βρίσκεται στη βιβλιοθήκη του Simulink, παρέχει τη δυνατότητα εξέτασης των δυναμικών φαινομένων του στάτη, του πεδίου διέγερσης και των τυλιγμάτων απόσβεσης (για την καλύτερη απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων)[23]. Παρακάτω αναγράφονται οι εξισώσεις που περιγράφουν το σύστημα. Αξίζει να αναφέρουμε ότι όλα τα μεγέθη είναι ανηγμένα στο στάτη κι ότι το ισοδύναμο κύκλωμα έχει αναπαρασταθεί σε dq-πλαίσιο αναφοράς το οποίο περιστρέφεται με τη γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  του δρομέα.

$$V_d = R_s i_d + \frac{d\phi_d}{dt} - \omega_R \phi_q \quad \phi_d = L_d i_d + L_{md}(i'_{fd} + i'_{kd})$$

$$V_q = R_s i_q + \frac{d\phi_q}{dt} + \omega_R \phi_d \quad \phi_q = L_q i_q + L_{mq} i'_{kq}$$

$$V'_{fd} = R'_{fd} i'_{fd} + \frac{d\phi'_{fd}}{dt} \quad \phi'_{fd} = L'_{fd} i'_{fd} + L_{md}(i_d + i'_{kd})$$

$$V'_{kd} = R'_{kd} i'_{kd} + \frac{d\phi'_{kd}}{dt} \quad \text{όπου} \quad \phi'_{kd} = L'_{kd} i'_{kd} + L_{md}(i_d + i'_{fd})$$

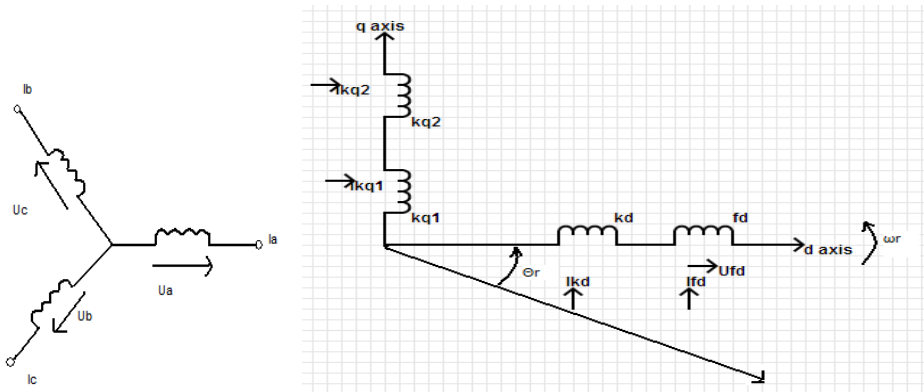
$$V'_{kq1} = R'_{kq1} i'_{kq1} + \frac{d\phi'_{kq1}}{dt} \quad \phi'_{kq1} = L'_{kq1} i'_{kq1} + L_{mq} i_q$$

$$V'_{kq2} = R'_{kq2} i'_{kq2} + \frac{d\phi'_{kq2}}{dt} \quad \phi'_{kq2} = L'_{kq2} i'_{kq2} + L_{mq} i_q$$

Τα χρησιμοποιούμενα σύμβολα έχουν ως εξής:

- $R,s$  : δρομέας και στάτης
- $L,m$  : σκέδαση και μαγνήτιση
- $F,k$  : τύλιγμα πεδίου και απόσβεσης

Το ηλεκτρικό μοντέλο είναι αυτό του παρακάτω σχήματος:



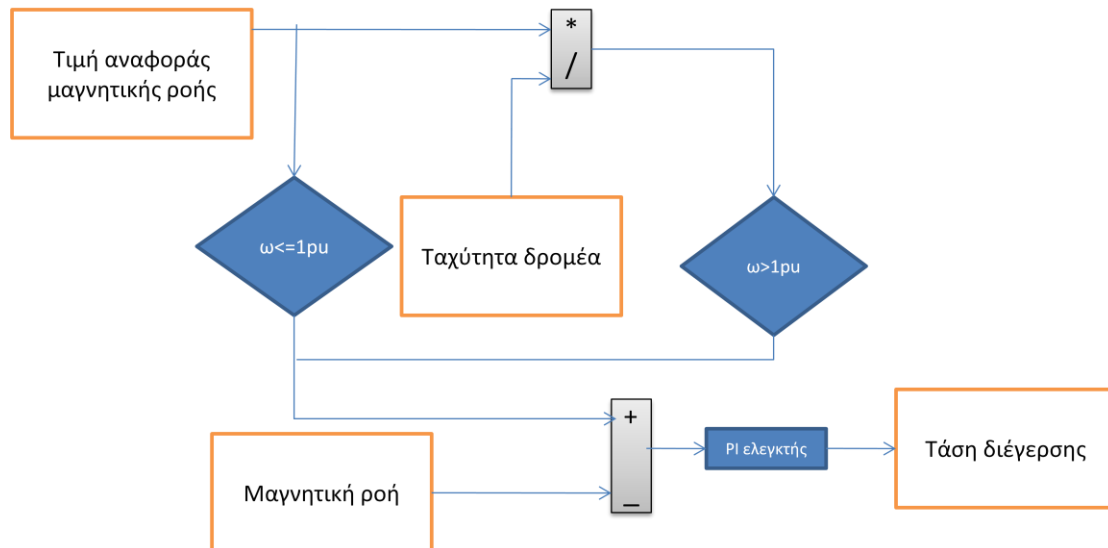
Σχήμα 2.3.1. Ηλεκτρικό μοντέλο μηχανής.

Σαν είσοδο το σύστημα μας έχει την μηχανική ισχύ  $P_{m\_gen}$  η οποία εφαρμόζεται στον άξονα της γεννήτριας και προέρχεται από τον πολλαπλασιασμό της μηχανικής ροπής  $T_{shaft}$  με την γωνιακή ταχύτητα του δρομέα της γεννήτριας,  $\omega_e$ . Η γεννήτρια συνδέεται στην έξοδο της με τον τριφασικό ανορθωτή. Εξαιτίας της ύπαρξης του ανορθωτή η γεννήτρια επιβάλλεται να λειτουργεί υπό μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Ωστόσο, εισάγεται μια μετατόπιση της φάσης του ρεύματος σε σχέση με την τάση μέσω των φαινομένων μεταγωγής του ρεύματος. Γίνεται έτσι αντιληπτή η κατανάλωση μικρής ποσότητας άεργου ισχύος από τον ανορθωτή. Επίσης, το σύστημα στο οποίο συνδέεται η γεννήτρια δεν επιβάλλει την τάση εξόδου της, αλλά αυτή προκύπτει από την ΗΕΔ και εμφανιζόμενες πτώσεις τάσης. [7]

Στο συγκεκριμένο τύπο γεννήτριας είναι απαραίτητο να μπορούμε να ελέγχουμε τα ρεύματα του στάτη της γεννήτριας – το οποίο επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του DC-DC μετατροπέα – αλλά και την τάση στο τύλιγμα διέγερσης του δρομέα. Με υψηλή τάση διέγερσης μπορεί να έχουμε αύξηση της ηλεκτρικής ροπής που δύναται να παράγει η γεννήτρια, ωστόσο έχουμε και αύξηση των απωλειών σιδήρου. Επομένως, σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου η τάση διέγερσης παραμένει σε χαμηλά επίπεδα καθώς οι απαιτήσεις ροπής είναι μικρές, ενώ σε υψηλές ταχύτητες ανέμου η τάση διέγερσης πρέπει να είναι αυξημένη ώστε η γεννήτρια να μπορεί να αναπτύξει την πλήρη ροπή. [8]

Επίσης, είναι απαραίτητη η σχεδίαση ενός συστήματος σταθεροποίησης, το οποίο να μπορεί να αποσβένει τις μηχανικές ταλαντώσεις δίνοντας ένα σήμα που να ρυθμίζει ανάλογα τη διέγερση. Το συγκεκριμένο σήμα δίνει εντολή στη γεννήτρια να παράγει μια συνιστώσα ηλεκτρικής ροπής σε φάση με την μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας. Όταν αυξάνεται η γωνιακή ταχύτητα θα προκαλείται μέσω αυτής της λειτουργίας αύξηση και στην ηλεκτρική ροπή της γεννήτριας ώστε να αναιρείται η προηγούμενη αύξηση.

Το σύστημα ελέγχου της τάσης του τυλίγματος διέγερσης που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία φαίνεται στο σχήμα 2.3. Παρατηρούμε ότι με την παραμονή της ταχύτητας του δρομέα κάτω από την ονομαστική της τιμή, η μαγνητική ροή στο στάτη είναι ίση με την ονομαστική. Επομένως, με μείωση των στροφών θα έχουμε αντίστοιχη μείωση της τάσης διέγερσης. Σε περίπτωση που η ταχύτητα του δρομέα ξεπεράσει την ονομαστική της τιμή, το σύστημα μεταπίπτει σε βοηθητική λειτουργία, συνεργαζόμενο με το σύστημα ελέγχου της γωνίας pitch και φρενάρει το δρομέα.

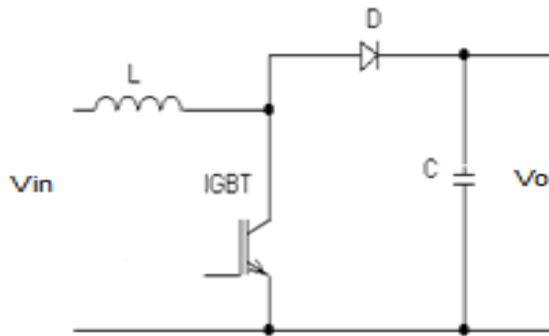


Σχήμα 2.3.2. Σύστημα ελέγχου διέγερσης γεννήτριας.

## 2.4. Μετατροπέας ανύψωσης τάσης συνεχούς σε συνεχές (DC-DCboostconverter)

Οι μετατροπείς DC-DC έχουν ευρεία χρήση σε σταθεροποιημένες dc τροφοδοσίες διακοπτικού τύπου καθώς και σε εφαρμογές dc κινητήριων συστημάτων. Οι μετατροπείς αυτοί έχουν ως είσοδο συνήθως μια μη σταθεροποιημένη dc τάση και η έξοδος τους είναι μια ελεγχόμενη dc τάση.[9]

Στο υπό μελέτη σύστημα χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας ανύψωσης (boost converter), ο οποίος αναπαρίσταται στο παρακάτω σχήμα(2.4.1.) Ο μετατροπέας αυτός περιλαμβάνει μια δίοδο και ένα διακοπτικό στοιχείο (εδώ IGBT) με την αντιπαράλληλη δίοδο του. Επίσης, διαθέτει δύο αποθηκευτικά στοιχεία: ένα πηνίο και τον πυκνωτή εξομάλυνσης.



Σχήμα 2.4.1. : Τοπολογία μετατροπέα ανύψωσης.

Προς ανάλυση της λειτουργίας του μετατροπέα ανύψωσης, όταν ο διακόπτης είναι κλειστός τότε η δίοδος είναι πολωμένη ανάστροφα και αποθηκεύεται ενέργεια στο πηνίο. Όταν ο διακόπτης ανοίγει, η δίοδος είναι πολωμένη ορθά και η ενέργεια που έχει αποθηκευτεί στο πηνίο διοχετεύεται στην έξοδο.[9]

Η τάση στα άκρα του πηνίου δίνεται από τη σχέση:

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (1)$$

Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός ( $t_{on}$ ) τότε στα άκρα του πηνίου εφαρμόζεται η τάση εισόδου ( $V_L = V_{in}$ ) και όταν ο διακόπτης είναι ανοικτός ( $t_{off}$ ) η τάση στα άκρα του πηνίου είναι ίση με τη διαφορά της τάσης εξόδου από την τάση εισόδου ( $V_L = V_{in} - V_o$ ). Σε λειτουργία συνεχούς ρεύματος και σε κατάσταση ισορροπίας το ρεύμα είναι ίδιο στην αρχή και στο τέλος της περιόδου  $T$  ( $T = t_{on} + t_{off}$  (2)). Επομένως, το ολοκλήρωμα της τάσης του πηνίου στο διάστημα μιας περιόδου είναι μηδέν, όπως και η μέση τιμή της τάσης του πηνίου. Άρα :

$$V_{in} t_{on} + (V_{in} - V_o) t_{off} = 0 \quad (3)$$

Ο λόγος κατάτμησης (duty cycle) είναι ίσος με:

$$D = \frac{t_{on}}{T}$$

Αν διαιρέσουμε την (3) με  $T$  και χρησιμοποιήσουμε την (2) προκύπτει:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{T}{t_{off}} = \frac{1}{1-D}$$

Αν οι απώλειες στο κύκλωμα θεωρηθούν ιδανικές ισχύει:

$$V_{in} I_{in} = V_o I_o$$

Επομένως:

$$\frac{I_o}{I_{in}} = (1 - D) \quad (4)$$



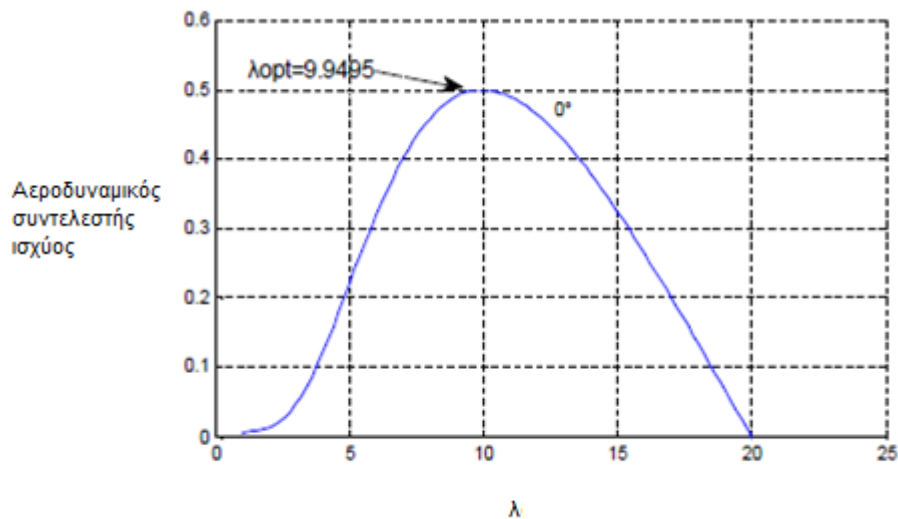
Κύκλωμα προστασίας  $R_s - C_s$  ( $R_s - C_s$  snubber) έχει συμπεριληφθεί στις διόδους του ανορθωτή, με τιμές αντίστασης  $R_s = 9,04 \Omega$  και τιμή χωρητικότητας  $C_s = 110\mu\text{F}$ . Ο διακόπτης (IGBT) του μετατροπέα ανύψωσης έχει τιμή αντίστασης snubber  $10\text{k}\Omega$ . Τα κυκλώματα αυτά που προστίθενται ως εξωτερική προστασία επιτελούν στην μείωση των καταπονήσεων των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος σε ασφαλή επίπεδα[9]. Το πηνίο που χρησιμοποιείται στον μετατροπέα ανύψωσης έχει τιμή αυτεπαγωγής  $L_{\text{boost}} = 1.2 \text{ mH}$  και αντίσταση  $R_{\text{boost}}=5\text{m}\Omega$ . Ο πυκνωτής εξομάλυνσης έχει χωρητικότητα  $C_{\text{boost}} = 90\text{mF}$ . Η τάση στα άκρα του πυκνωτή ελέγχεται μέσω του αντιστροφέα στην πλευρά του δικτύου να παραμένει σταθερή και ίση με  $1100 \text{ V}$ .

#### 2.4.1. Ανίχνευση σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT).

Η χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος – γωνιακής ταχύτητας ακολουθείται από τον ανεμοκινητήρα ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο. Για κάθε ταχύτητα ανέμου ο ανεμοκινητήρας μπορεί να παράξει συγκεκριμένη ισχύ και η μέγιστη τιμή της επιτυγχάνεται όταν ισχύει :

$$\lambda_{\text{opt}} = \frac{R\omega_r}{V_w}, \text{ όπου } \omega_r \text{ γωνιακή ταχύτητα του δρομέα και } V_w \text{ η ταχύτητα του ανέμου.}$$

Στόχος λοιπόν των αλγορίθμων εύρεσης μέγιστης ισχύος είναι να ακολουθεί η A/Γ την καμπύλη βέλτιστης ισχύος, δηλαδή για κάθε ταχύτητα ανέμου, τα σημεία λειτουργίας του συστήματος να διατηρούνται στο μέγιστο συντελεστή  $C_{p\text{max}}$ .



Σχήμα 2.4.2. Αναπαράσταση του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος συναρτήσει του  $\lambda$  για γωνία βήματος έλικας  $\beta=0^\circ$

Όσο η ανεμογεννήτρια προσπαθεί να φτάσει τις ονομαστικές της στροφές, η γωνία βήματος της έλικας είναι μηδενική και το σύστημα λειτουργεί βάσει της καμπύλης που φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Όταν το σύστημα λειτουργεί αριστερά του  $\lambda_{opt}$  ο ελεγκτής μετακινεί το σημείο λειτουργίας προς τα δεξιά, αυξάνοντας τις στροφές μέχρι το σημείο βέλτιστης απόδοσης. Αντίθετη εντολή δίνεται από τον ελεγκτή όταν το σύστημα λειτουργεί δεξιά του  $\lambda_{opt}$ . Η εντολή αυτή του ελεγκτή ουσιαστικά μεταφράζεται σε παλμούς PWM που στέλνονται προς το IGBT του boost converter. Μέσω των παλμών αυτών καθορίζεται ο λόγος κατάτμησης (duty cycle – D) του IGBT. Μέσω του D, όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, ελέγχεται το ρεύμα της γεννήτριας και μέσω αυτού η ηλεκτρική της ροπή κάτι που συνεπάγεται τον έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα.

Για την ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point) χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές, οι οποίες χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

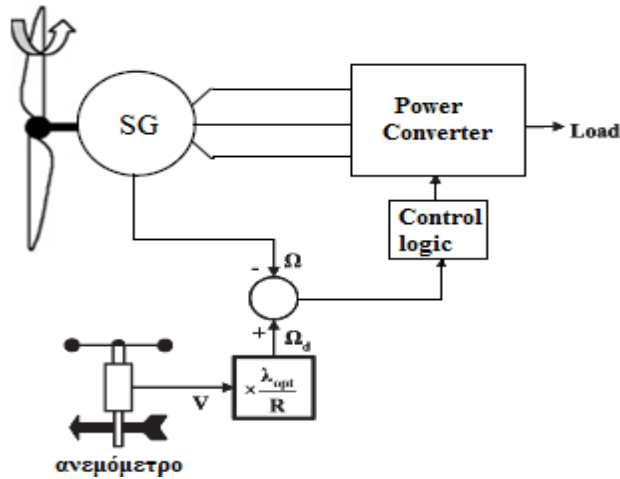
- Εύρεση του MPP από δοσμένες χαρακτηριστικές καμπύλες.
- Εύρεση του MPP χωρίς χρήση χαρακτηριστικών καμπυλών:
  - i) Έλεγχος μέσω συνεχών αλλαγών και συγκρίσεων
  - ii) Έλεγχος βασισμένος σε ασαφή λογική.[10]

#### **2.4.1.1. Εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος από δοσμένες χαρακτηριστικές καμπύλες.**

Η μέθοδος αυτή είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη και σε αυτή βασίζεται κι ο MPPT ελεγκτής της συγκεκριμένης εργασίας. Προαπαιτούμενο χρήσης αυτής της μεθόδου είναι η γνώση της σχέσης  $C_p(\lambda, \beta)$ , μέσω της οποίας προκύπτουν οι χαρακτηριστικές καμπύλες ισχύος – στροφών ή ροπής – στροφών και αποθηκεύονται σε έναν μικροεπεξεργαστή.[10][11]

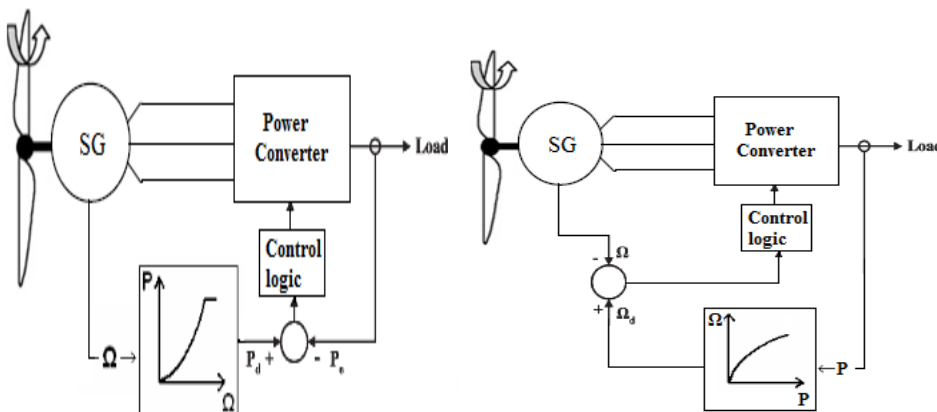
Εφόσον γνωρίζουμε τη σχέση του  $C_p$  αρκεί να μετράται είτε η ταχύτητα ανέμου είτε η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα και μέσω της αποθηκευμένης χαρακτηριστικής καμπύλης θα προκύπτει η τιμή αναφοράς του μη μετρούμενου μεγέθους. Αναλυτικά:

- Μέτρηση ταχύτητας ανέμου: Για τη χρήση αυτής της μεθόδου απαιτείται ανεμόμετρο. Μέσω του  $\lambda$  ( $\lambda = \lambda_{opt}$ ) ανακτάται η τιμή αναφοράς της απαιτούμενης ταχύτητας περιστροφής του δρομέα  $\omega_{ref}$ . Γνωρίζοντας την  $\omega_{ref}$  και για  $C_p = C_{pmax}$  προκύπτει η απαιτούμενη ενεργός ισχύς  $P_{ref}$ . Στη συνέχεια, οι τιμές αναφοράς συγκρίνονται με τις μετρούμενες και τα σφάλματα των συγκρίσεων προωθούνται στον ελεγκτή του μετατροπέα ανύψωσης.[12]



Σχήμα 2.4.3. Μέθοδος MPPT με μετρούμενη την ταχύτητα ανέμου[11]

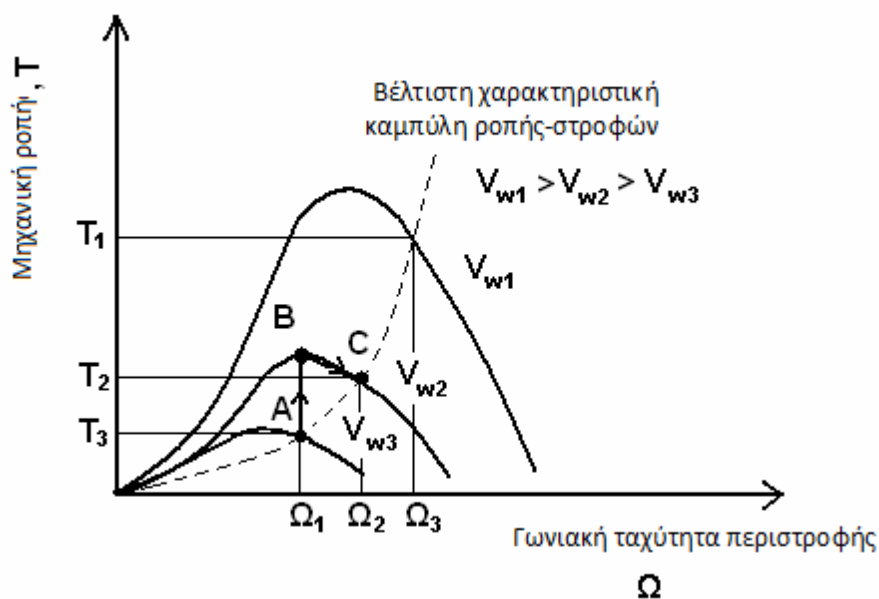
- Μέτρηση ταχύτητας περιστροφής του δρομέα: Προφανώς δεν απαιτείται χρήση ανεμόμετρου σε αυτή τη μέθοδο. Εδώ, μετράται η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα και μέσω της χαρακτηριστικής καμπύλης αντιστοιχίζεται στην μέγιστη δυνατή παραγόμενη ισχύ  $P_{ref}$ . Η τιμή αυτή αναφοράς συγκρίνεται με την τιμή της ενεργού ισχύος εξόδου και το σφάλμα που προκύπτει αποτελεί εντολή ελέγχου του μετατροπέα ανύψωσης. Αντί για την ισχύ ως μέγεθος αναφοράς μπορούμε να έχουμε την ροπή ή και το ρεύμα. Στο μοντέλο προσομοίωσης που χρησιμοποιείται η διαδικασία ακολουθείται αντίστροφα καθώς μετράται η ισχύς εξόδου κι από αυτή προκύπτει η τιμή της βέλτιστης ταχύτητας περιστροφής του δρομέα  $\omega_{ref}$ . Η εντολή ελέγχου του μετατροπέα δίνεται από το σφάλμα μεταξύ αυτής και της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα που έχει αναπτυχθεί εκείνη τη στιγμή. Στα παρακάτω διαγράμματα διακρίνεται η μέθοδος με μετρούμενη την ταχύτητα περιστροφής και την ισχύ εξόδου.[12][26]



Σχήμα 2.4.4. Αριστερά: Μέθοδος MPPT με μετρούμενη την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα.

Δεξιά: Μέθοδος MPPT με μετρούμενη την ισχύ εξόδου[11].

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται συνοπτικά το πώς αναζητείται το σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος. Αρχικά, το σύστημα λειτουργεί στο σημείο A, δηλαδή η ταχύτητα του ανέμου είναι  $V_{w3}$  και η ροπή της γεννήτριας  $T_g$  είναι ίση με την μηχανική στον άξονα  $T_m$ . Όταν η ταχύτητα του ανέμου αυξηθεί και φτάσει την τιμή  $V_{w2}$  η μηχανική ροπή θα περάσει στο σημείο B αλλά η ροπή της γεννήτριας θα παραμείνει στο A. Η γεννήτρια επιταχύνεται οδηγούμενη από την επιπλέον ισχύ λόγω της διαφοράς  $T_m - T_g$ , μέχρι οι δύο ροπές να γίνουν ίσες. Η αυξημένη ισχύς θα δώσει μεγαλύτερη τιμή αναφοράς για την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Η  $T_g$  ακολουθεί τη χαρακτηριστική βέλτιστη ροπής μέχρι το σύστημα να αποκτήσει την νέα ισορροπία του στο σημείο C. Παρόμοια διαδικασία ακολουθείται για μείωση της ταχύτητας του ανέμου[26].



Σχήμα 2.4.5 Αναζήτηση σημείου λειτουργίας μέγιστης ισχύος[12].

#### 2.4.1.2. Μοντέλο προσομοίωσης ρυθμιστή στροφών και γωνίας βήματος έλικας.

Το μοντέλο προσομοίωσης φροντίζει ώστε να έχουμε την μέγιστη απολαβή ισχύος διατηρώντας την ισχύ εξόδου και την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στις ονομαστικές τιμές. Όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι τόσο υψηλή ώστε οι μηχανικές αντοχές του εξοπλισμού να δοκιμάζονται ο ρυθμιστής φροντίζει ώστε να αυξάνεται η γωνία βήματος έλικας και η μηχανική ισχύς που μεταφέρεται στον άξονα διατηρείται στα επιτρεπτά επίπεδα. Προφανώς, για χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου, η γωνία βήματος έλικας είναι μηδενική ώστε να μεγιστοποιείται η ισχύς εξόδου. Η ρύθμιση αυτή λαμβάνει χώρα σε δύο διαφορετικά επίπεδα: στο ηλεκτρικό και στο αεροδυναμικό. Ηλεκτρικά γίνεται μέσω της ρύθμισης των παλμών που οδηγούν το διακοπτικό στοιχείο (IGBT) στον μετατροπέα ανύψωσης και αεροδυναμικά μέσω της ρύθμισης της γωνίας βήματος έλικας. Η λειτουργία του ελεγκτή χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες :

**α) Περίπτωση 1: Ισχύς και γωνιακή ταχύτητα δρομέα μικρότερες από την ονομαστική τους τιμή.**

Εδώ η ταχύτητα ανέμου βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα τέτοια ώστε το σύστημα δεν έχει καταφέρει να αποκτήσει τις ονομαστικές τιμές ισχύος και ταχύτητας δρομέα. Σε αυτήν την περίπτωση ακολουθείται η στρατηγική απολαβής μέγιστης ισχύος έτσι όπως αναφέρθηκε προηγουμένως και χωρίς αλλοιώσεις. Προκειμένου δηλαδή το σημείο λειτουργίας της Α/Γ (σημείο Α στο σχήμα 2.4.7) να παραμένει πάνω στην καμπύλη βέλτιστης απόδοσης, μετράται η ισχύς εξόδου της Α/Γ, αντιστοιχίζεται στην ταχύτητα δρομέα, η οποία αποτελεί την ταχύτητα αναφοράς του δρομέα  $\omega_{ref}$ . Η ταχύτητα αυτή συγκρίνεται με την πραγματική τιμή της ταχύτητας του δρομέα και η διαφορά τους περνά σε έναν PI ελεγκτή (Speed Regulator). Το αποτέλεσμα του ελεγκτή αποτελεί το ρεύμα αναφοράς. Αυτό συγκρίνεται με το ρεύμα που του μετατροπέα που μετράται και περνά από νέο ελεγκτή PI. Μέσω του ελεγκτή αυτού έχουμε τον λόγο κατάτμησης D του IGBT του μετατροπέα ανύψωσης. Έτσι, ελέγχεται η ταχύτητα του δρομέα ώστε ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου λ να παραμένει στην ιδανική του τιμή ( $\lambda_{opt} = 9,9495$ ). Για τον PI ελεγκτή έχουμε  $K_p = 3$  και  $K_i = 0.6$ .

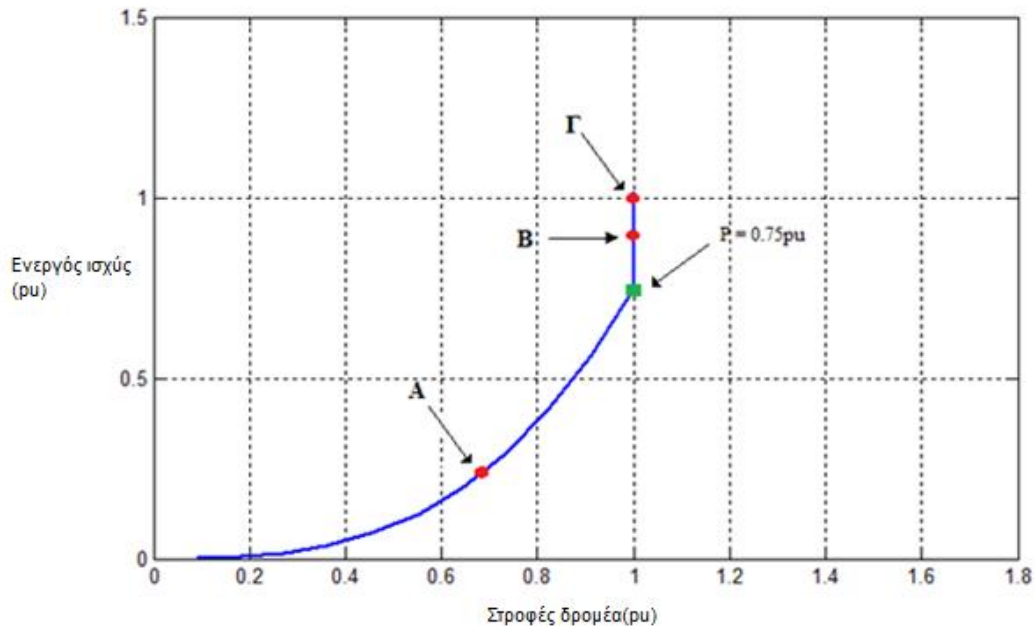
**β) Περίπτωση 2: Ταχύτητα δρομέα ίση με την ονομαστική της τιμή – Ισχύς μικρότερη από την ονομαστική της τιμή.**

Εδώ η ταχύτητα του ανέμου είναι τέτοια ώστε για να παρέχει η Α/Γ το μέγιστο της ισχύος που δύναται να παράξει, η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα πρέπει να ξεπερνά την ονομαστική της τιμή. Επειδή αυτό δεν είναι επιτρεπτό η ταχύτητα αναφοράς για την περιστροφή του δρομέα ορίζεται ως  $\omega_{ref} = 1$  pu. Το σημείο λειτουργίας της ανεμογεννήτριας βρίσκεται έτσι στην τομή της καμπύλης  $P_w - \omega_r$  με την  $\omega_r = 1$  pu (σημείο Β στο σχήμα 2.4.7)[12]. Είναι προφανές ότι σε αυτήν την περίπτωση η ισχύς εξόδου της Α/Γ είναι μικρότερη από την ονομαστική ισχύ και δεν είναι η μέγιστη που μπορεί να αποδοθεί .

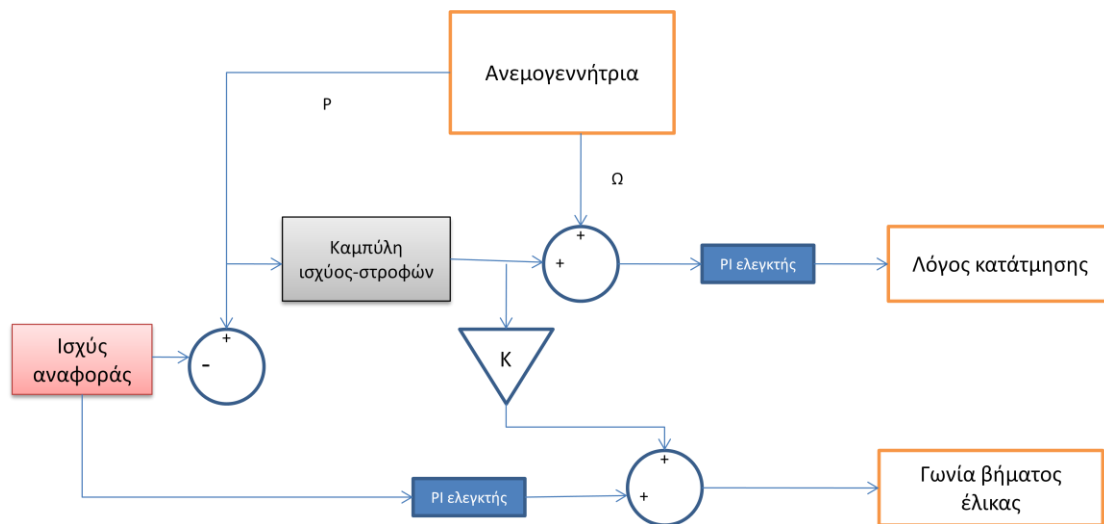
**γ) Περίπτωση 3: Ισχύς και γωνιακή ταχύτητα δρομέα ίσες με την ονομαστική τους τιμή.**

Σε αυτή την περίπτωση η ταχύτητα του ανέμου είναι τόσο υψηλή ώστε ο ηλεκτρικός έλεγχος να μην είναι αρκετός να διατηρήσει την ισχύ στα ονομαστικά επίπεδα, αλλά να χρειάζεται και η συμβολή του αεροδυναμικού ελέγχου (σημείο Γ στο σχήμα 2.4.7). Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι αν και οι στροφές του δρομέα διατηρούνται στην ονομαστική τιμή δεν φτάνει μόνο η μείωση του λ για να κρατηθεί η ισχύς μέσα στα επιτρεπτά όρια λειτουργίας αλλά μέσω του τύπου του  $C_p(\lambda, \beta)$  είναι φανερό ότι πρέπει να αυξηθεί και η γωνία βήματος έλικας β. Παρόμοια με τον ηλεκτρικό έλεγχο μέσω του λόγου κατάτμησης, η ισχύς εξόδου συγκρίνεται με την ονομαστική και η διαφορά περνά σε έναν PI ελεγκτή (Pitch Compensation). Μέσω του ελεγκτή αυτού δίδεται η εντολή για τη γωνία βήματος έλικας β, η οποία μας εξασφαλίζει ονομαστική τιμή ισχύς εξόδου. Για τον PI ελεγκτή έχουμε  $K_p = 1,5$  και  $K_i = 6$ . Η μέγιστη γωνία βήματος έλικας είναι  $27^\circ$  και ο μέγιστος ρυθμός μεταβολής  $10^\circ/\text{sec}$ . Σε περιπτώσεις απότομης αύξησης της γωνιακής ταχύτητας δρομέα (μεγάλες ριπές ανέμου) έχουμε επίσης βοηθητική δράση του αεροδυναμικού

ελέγχου. Η διαφορά  $\omega - \omega_{ref}$  ταυτόχρονα με τον πρώτο ελεγκτή PI αποτελεί είσοδο για ένα κέρδος  $K_{p\_pitch}$  η έξοδος του οποίου αθροίζεται στην τιμή της γωνίας βήματος έλικας (Pitch Control). Η συμβολή του αεροδυναμικού ελέγχου σε αυτήν την περίπτωση δίνει στο σύστημα μας τη δυνατότητα πολύ γρήγορης αντίδρασης σε περιπτώσεις απότομων μεταβολών [12].



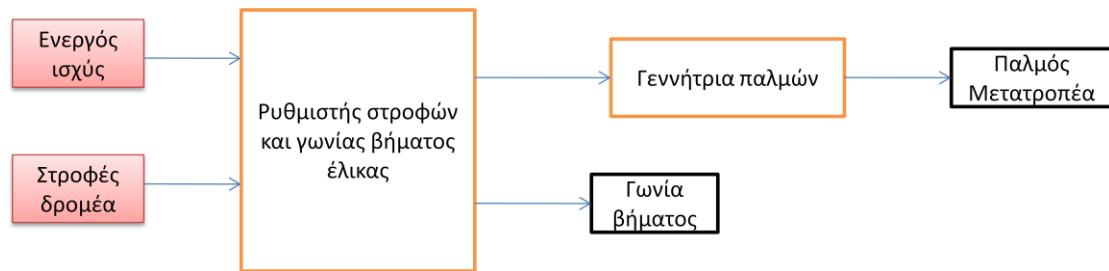
Σχήμα 2.4.6. Χαρακτηριστική ελέγχου Ισχύος – Στροφών A/Γ [12].



Σχήμα 2.4.7. Μοντέλο προσομοίωσης ρυθμιστή στροφών και γωνίας βήματος έλικας.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το μπλοκ ελέγχου στροφών και γωνίας βήματος έλικας, εντός του οποίου περιλαμβάνεται το μοντέλο προσομοίωσης που περιγράφηκε. Ο λόγος κατάτμησης  $D$ , όπως φαίνεται, περνά πρώτα από τη γεννήτρια παλμών η οποία καθορίζει το λόγο κατάτμησης του διακοπτικού στοιχείου στον μετατροπέα ανύψωσης

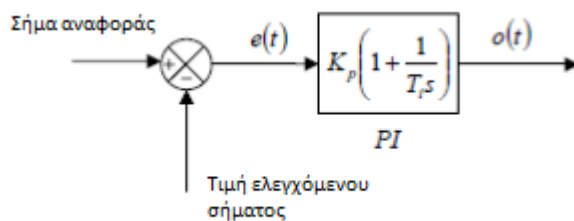
τάσης. Η διακοπτική συχνότητα ορίζεται από τη συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής και είναι 2000Hz.



Σχήμα 2.4.9 Μπλοκ ελέγχου στροφών και γωνίας βήματος έλικας.

### 2.4.1.3. Αναλογικός – ολοκληρωτικός ελεγκτής(PI).

Ο PI (proportional – integral δηλαδή αναλογικός – ολοκληρωτικός) αλγόριθμος υπολογίζει και μεταδίδει ένα σήμα το οποίο επιθυμείται να είναι ελεγχόμενο. Το σήμα εξόδου που προκύπτει από τον ελεγκτή  $o(t)$  εξαρτάται από τις παραμέτρους του, οι οποίες είναι το αναλογικό κέρδος  $K_p$ , ο ολοκληρωτικός χρόνος  $T_i$  και το σφάλμα  $e(t)$ . Το σχήμα 2.4.10 παρουσιάζει ένα γενικό σχήμα του PI ελεγκτή[13].

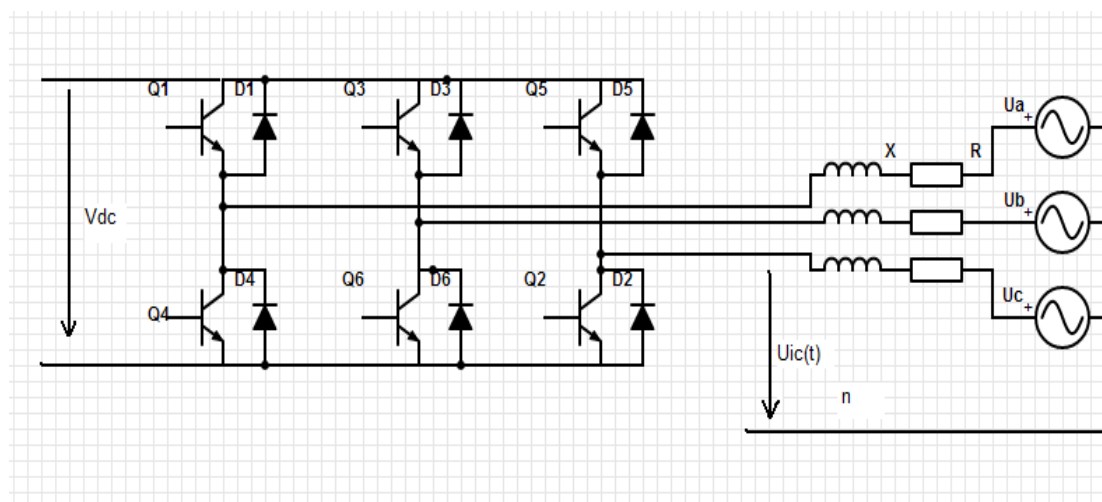


Σχήμα 2.4.10. PI ελεγκτής.

Το αναλογικό κέρδος  $K_p$  δημιουργεί σήμα εξόδου ανάλογο προς το σφάλμα του σήματος  $e(t)$  που έχουμε στην είσοδο. Αν το αναλογικό κέρδος είναι πολύ υψηλό τότε το σύστημα μας μπορεί να υποπέσει σε αστάθεια. Αντίστοιχα, μια μικρή τιμή αναλογικού κέρδους θα δώσει μικρή έξοδο για ένα μεγάλο σφάλμα στην είσοδο καθιστώντας έτσι το σύστημα λιγότερο ευαίσθητο. Ένας απλός αναλογικός ελεγκτής δεν θα ήταν ικανός να οδηγήσει το σήμα στην επιθυμητή τιμή. Θα παρέμενε ένα σφάλμα μόνιμης κατάστασης (offset). Για να γίνει το σφάλμα αυτό μηδενικό είναι απαραίτητη η συμβολή του ολοκληρωτικού ελεγκτή. Η συμβολή του ολοκληρωτικού όρου είναι ανάλογη με το μέγεθος και τη διάρκεια του σφάλματος. Το ολοκλήρωμα δίνει το συσσωρευμένο σφάλμα μόνιμης κατάστασης, το οποίο στη συνέχεια πολλαπλασιάζεται με το αντίστροφο του χρόνου ολοκλήρωσης και προστίθεται στην έξοδο του ελεγκτή. Το μέγεθος της συνεισφοράς του ολοκληρωτικού όρου στον γενικότερο έλεγχο καθορίζεται από τον ολοκληρωτικό χρόνο  $T_i$ . Ο ολοκληρωτικός όρος προσθέτει ταχύτητα στην απόκριση του ελεγκτή εξαλείφει το σφάλμα μόνιμης κατάστασης που προκύπτει από τον αναλογικό ελεγκτή. Ωστόσο, από τη στιγμή που ο ολοκληρωτικός όρος αποκρίνεται σε συσσωρευμένα παρελθόντα σφάλματα, μπορεί να οδηγήσει την παρούσα τιμή να ξεπεράσει την τιμή αναφοράς[13].

## 2.5 Τριφασικός αντιστροφέας τύπου πηγής τάσης συνεχές σε εναλλασσόμενο (DC-AC)

Ο τριφασικός αντιστροφέας που χρησιμοποιείται στο συγκεκριμένο μοντέλο για να μετατρέψει την συνεχή τάση που δέχεται στην είσοδο του από τον μετατροπέα ανύψωσης σε εναλλασσόμενη στην έξοδο του, με μέτρο και συχνότητα αυτών της τάσης του δικτύου, διαθέτει 6 IGBTs και 6 αντιπαράλληλες διόδους. Ο αντιστροφέας έχει ως στόχο την μεταγωγή της ισχύος που δίνει ο μετατροπέας ανύψωσης, διατηρώντας παράλληλα σταθερή την τιμή της τάσης στην είσοδο του. Αυτό επιτυγχάνεται με την αποστολή κατάλληλων παλμών στα διακοπτικά του στοιχεία. Χαρακτηριστικό του είναι η δυνατότητα ρύθμισης του συντελεστή ισχύος μέσω της παραγωγής ή κατανάλωσης άεργου ισχύος[11][12].



Σχήμα 2.5.1. Τριφασικός αντιστροφέας συνδεδεμένος στο δίκτυο.

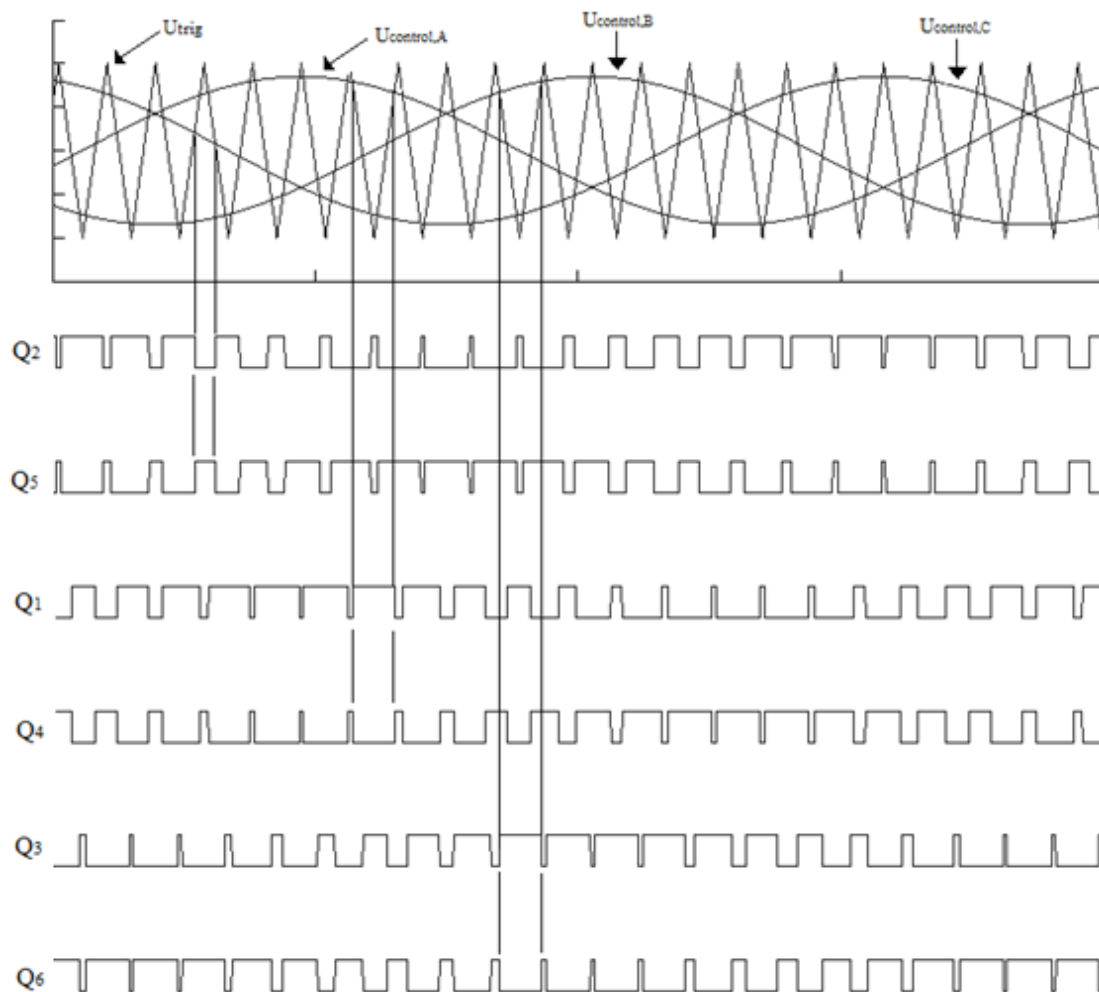
Η διακοπτική λειτουργία των διακοπτικών στοιχείων του αντιστροφέα (IGBTs) προκαλούν αρμονικές ρεύματος και τάσης, οι οποίες καθιστούν απαραίτητη την ύπαρξη ενός φίλτρου LC ανάμεσα στον αντιστροφέα και στο δίκτυο.

### 2.5.1.Τεχνική ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών(SPWM).

Η τάση στην έξοδο του αντιστροφέα είναι ουσιαστικά ένας τετραγωνικός παλμός, αποτελούμενος από τη βασική αρμονική συνιστώσα κι από τις ανώτερες αρμονικές συνιστώσες, οι οποίες είναι ανεπιθύμητες και πρέπει να εξαλειφθούν ή να μειωθούν. Αυτό μπορεί να συμβεί με τη χρήση ενός φίλτρου στην έξοδο του αντιστροφέα, του οποίου όμως το μέγεθος, το βάρος και το κόστος θα εξαρτάται από το πλάτος και τη συχνότητα της πρώτης ανώτερης αρμονικής σε σχέση με το πλάτος και τη συχνότητα της βασικής αρμονικής. Όσο περισσότερο απέχει η πρώτη ανώτερη αρμονική από τη βασική τόσο μικρότερο θα είναι και το φίλτρο εξόδου[14].Για την κατανόηση της τεχνικής SPWM είναι απαραίτητο να αναλυθούν τα εξής:



- $F_c$  : Είναι η συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής  $U_{trig}$  και καθορίζει τη συχνότητα αλλαγής κατάστασης των διακοπών του αντιστροφέα. Ονομάζεται διακοπτική συχνότητα.
- $F_r$ : Είναι η συχνότητα της κυματομορφής αναφοράς  $U_{control}$  και αποτελεί την επιθυμητή θεμελιώδη συχνότητα της τάσης εξόδου του αντιστροφέα. Ονομάζεται συχνότητα διαμόρφωσης.
- $m_a = U_{control} / U_{trig}$ : Είναι ο λόγος του πλάτους της κυματομορφής αναφοράς προς το πλάτος της τριγωνικής κυματομορφής και ονομάζεται συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους.
- $m_f = F_c / F_r$ : Είναι ο λόγος της διακοπτικής συχνότητας προς τη συχνότητα διαμόρφωσης και ονομάζεται συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας.



Σχήμα 2.5.2 Ορισμός της τεχνικής SPWM[14].

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα [14] κάθε ζεύγος διακοπών του αντιστροφέα έχει τη δική του κυματομορφή αναφοράς, ενώ υπάρχει μια τριγωνική κυματομορφή φορέα. Οι κυματομορφές αναφοράς είναι οι κυματομορφές που επιδιώκουμε να έχουμε στην έξοδο και δημιουργούνται από το κύκλωμα ελέγχου. Συγκρίνοντας τις κυματομορφές  $U_{control,A}$  και  $U_{trig}$  μέσω ενός συγκριτή, προκύπτουν οι κυματομορφές των Q1,Q4 από τα σημεία τομής. Όταν  $U_{control,A} > U_{trig}$  δίνεται παλμός έναυσης στο διακοπτικό στοιχείο Q1, ενώ όταν

$U_{trig} > U_{control,A}$  τότε δίνεται παλμός έναυσης στο Q4. Έτσι τα δύο αυτά διακοπτικά στοιχεία δεν θα άγουν ποτέ ταυτόχρονα. Ίδια διαδικασία ακολουθείται και για τους παλμούς έναυσης των λοιπών διακοπτικών στοιχείων.

Τα σημεία τομής των κυματομορφών αναφοράς και της τριγωνικής κυματομορφής καθορίζονται από το συντελεστή διαμόρφωσης  $m_a$ . Καθορίζεται έτσι και το πλάτος της βασικής συνιστώσας της τάσης εξόδου[9]. Διακρίνονται οι περιπτώσεις:

- ❖  $0 < m_a < 1$ : Η βασική συνιστώσα σε αυτή την περίπτωση μεταβάλλεται γραμμικά με τον  $m_a$ . Το πλάτος της βασικής συνιστώσας σε ένα σκέλος του αντιστροφέα είναι :

$$(\widehat{V}_{AN})_1 = m_a \frac{V_d}{2}$$

Άρα, η πολική τάση rms γράφεται ως εξής:

$$V_{LL1}(\text{πολική}, \text{rms}) = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} (\widehat{V}_{AN})_1 \Leftrightarrow$$

$$V_{LL1} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} m_a \frac{V_d}{2}$$

$$m_a = \frac{V_{LL1}}{V_d} 2 \sqrt{\frac{2}{3}}$$

- ❖  $1 < m_a < 3,24$ : Σε αυτή την περίπτωση το πλάτος των κυματομορφών αναφοράς επιτρέπεται να υπερβαίνει το πλάτος της τριγωνικής κυματομορφής και έχουμε υπερδιαμόρφωση. Εδώ, το πλάτος της βασικής συνιστώσας δεν αυξάνεται γραμμικά με την τιμή του  $m_a$ , αλλά η σχέση μεταξύ τους εξαρτάται από το λόγο διαμόρφωσης συχνότητας. Η κυματομορφή στην έξοδο παίρνει μια μορφή ανάμεσα σε SPWM και σε τετραγωνικό παλμό.
- ❖  $m_a > 3,24$ : Αύξηση του  $m_a$  δεν συνεπάγεται αύξηση του πλάτους της βασικής και έχουμε καθαρό τετραγωνικό παλμό.

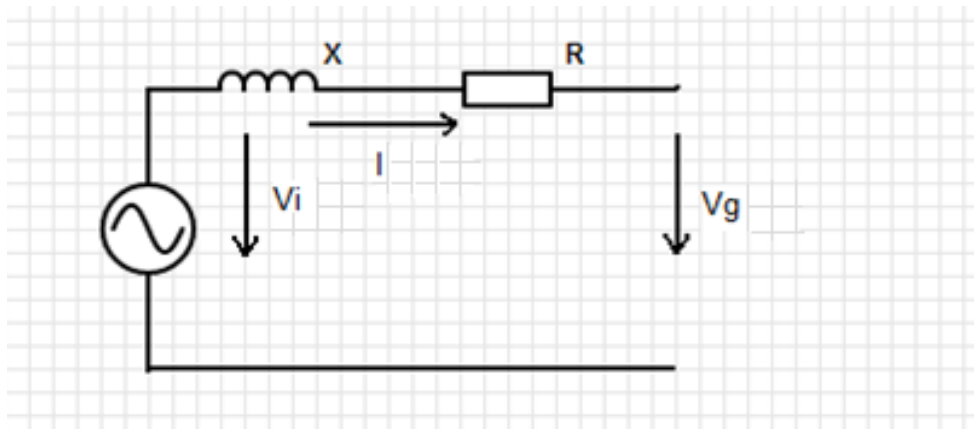
Όταν βρισκόμαστε στη γραμμική περιοχή, η μέγιστη τιμή της τάσης λαμβάνεται για  $m_a=1$ , οπότε βάσει του παραπάνω τύπου, η μέγιστη ενεργός τιμή της πολικής τάσης εξόδου είναι:

$$V_{LL1} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \frac{V_d}{2}$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι αρμονικές συνιστώσες υψηλής συχνότητας είναι αρκετά πιο εύκολο να φιλτραριστούν από τις αρμονικές χαμηλής συχνότητας. Πολύ σημαντικό ρόλο παίζει έτσι η συχνότητα μετάβασης  $F_c$ , αφού για να έχουμε αρμονικές υψηλής συχνότητας πρέπει η  $F_c$  να είναι κι αυτή αρκετά υψηλή. Ωστόσο, όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα μετάβασης τόσο περισσότερες είναι οι απώλειες μετάβασης στα διακοπτικά στοιχεία του αντιστροφέα[9]. Στην παρούσα εργασία η συχνότητα μετάβασης  $F_c$  είναι 3 kHz.

## 2.5.2. Λειτουργία του τριφασικού αντιστροφέα στο κομμάτι της ισχύος.

Μπορούμε να θεωρήσουμε τον αντιστροφέα ως μια ιδανική πηγή που παράγει τη θεμελιώδη τάση. Για την αναπαράσταση του δικτύου χρησιμοποιείται το ισοδύναμο Thevenin. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός αντιστροφέα τύπου πηγής τάσης συνδεδεμένου στο δίκτυο [12].



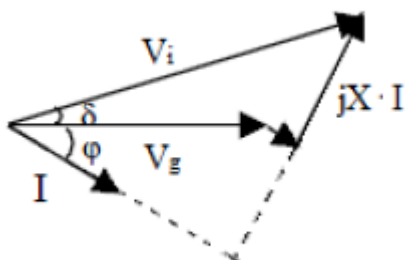
Σχήμα 2.5.3. Ισοδύναμο κύκλωμα αντιστροφέα συνδεδεμένου στο δίκτυο.

Η αντίδραση  $X$  παίρνει τη θέση της επαγωγικής αντίδρασης του δικτύου στο σημείο κοινής σύνδεσης (PCC) μαζί με την αντίδραση του φίλτρου[13]. Η αντίδραση του φίλτρου είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή του δικτύου. Έτσι αντίδραση του δικτύου κι αντίσταση μπορούν να αγνοηθούν[12].

Σύμφωνα με τα παραπάνω έχουμε:

$$\tilde{V}_i = \tilde{V}_g + jX\tilde{I} \Leftrightarrow \tilde{I} = \frac{\tilde{V}_i - \tilde{V}_g}{jX}$$

Το διανυσματικό διάγραμμα αυτής της σχέσης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα[12].



Σχήμα 2.5.4. Διανυσματικό διάγραμμα[15].

Η μιγαδική εγχεόμενη στο δίκτυο ισχύς, αν θεωρηθεί η φασική τάση του δικτύου  $\tilde{V}_g$  ως διάνυσμα αναφοράς, δίνεται από τον τύπο:

$$S = P + jQ = 3\tilde{V}_g\tilde{I}^*$$

Από τον τύπο του ρεύματος, αναλύοντας το σε πραγματικό και φανταστικό μέρος, για το συζυγές ρεύμα έχουμε:

$$\tilde{I}^* = \left(\frac{\tilde{V}_i - \tilde{V}_g}{jX}\right)^* \Leftrightarrow \tilde{I}^* = \frac{V_i \sin(\delta) + j(V_i \cos(\delta) - V_g)}{X}$$

Έτσι για την μιγαδική ισχύ έχουμε:

$$S = 3V_g \tilde{I}^* = 3V_g \frac{V_i \sin(\delta) + j(V_i \cos(\delta) - V_g)}{X} \Leftrightarrow$$

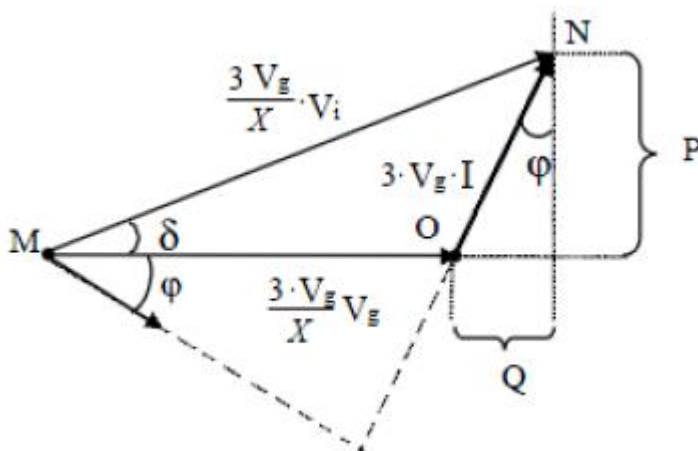
$$P + jQ = \frac{3V_g V_i \sin(\delta)}{X} + j \frac{3V_g(V_i \cos(\delta) - V_g)}{X}$$

Επομένως, για την ενεργό και άεργο ισχύ στο σημείο κοινής σύνδεσης έχουμε:

$$P = \frac{3V_g V_i \sin(\delta)}{X} \quad (1) \quad \text{και}$$

$$Q = \frac{3V_g(V_i \cos(\delta) - V_g)}{X} \quad (2)$$

Αν πολλαπλασιάσουμε το κάθε διάνυσμα του διανυσματικού διαγράμματος που απεικονίζεται στο σχήμα 2.5.4 με την ποσότητα  $3V_g/X$  προκύπτει ένα P-Q σύστημα συντεταγμένων με αρχή το σημείο Ο στο άκρο του διανύσματος  $3V_g^2/X$ [12]. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5.5 ο x άξονας αναπαριστά την άεργο ισχύ και ο y την ενεργό ισχύ.



Σχήμα 2.5.5. PQ διανυσματικό διάγραμμα[15].

Από τις παραπάνω σχέσεις μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι εφόσον ελέγχουμε το πλάτος της τάσης και τη γωνία ισχύος, ο αντιστροφείας μπορεί να εγχέει ή να απορροφά ενεργό ή άεργο ισχύ. Για να έχουμε έγχυση ενεργού ισχύος στο δίκτυο θα πρέπει η τάση του αντιστροφείας  $V_i$  να προηγείται της τάσης του δικτύου  $V_g$ . Επίσης, για να έχουμε έγχυση άεργου ισχύος στο δίκτυο θα πρέπει το πλάτος της τάσης του αντιστροφείας να είναι μεγαλύτερο από το πλάτος της τάσης δικτύου. Για μικρές γωνίες  $\delta$  ο τύπος της άεργου ισχύος απλουστεύεται ακόμα περισσότερο:

$$Q = \frac{3V_g(V_i - V_g)}{X}$$

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω τύπο για  $V_i > V_g \Rightarrow Q > 0 \Rightarrow$  χωρητικός συντελεστής ισχύος.

Η ικανότητα της ανεμογεννήτριας όσον αφορά στην ενεργό και άεργο ισχύ που έχει τη δυνατότητα να ανταλλάσει με το δίκτυο καθορίζεται από τα όρια λειτουργίας του αντιστροφέα. Τα όρια αυτά περιορίζονται από τα ακόλουθα μεγέθη:

i) Την ονομαστική ενεργό ισχύ που μπορεί να παράξει η σύγχρονη γεννήτρια :

$$P_{max} = P_{gen}^{rated}$$

ii) Την ονομαστική τάση του δικτύου  $V_{nom}$  και το ονομαστικό ρεύμα των διακοπτικών στοιχείων του αντιστροφέα  $I_{inv,max}$  ή γενικότερα από άλλο μέγεθος στο οποίο πρέπει να τεθεί κάποιος περιορισμός. Η μέγιστη μιγαδική ισχύς που μπορεί να προσφέρει ο αντιστροφέας στο δίκτυο σύμφωνα με τους περιορισμούς αυτούς είναι  $S = 3 V_{nom} I_{inv,max}$  [12].

iii) Την μέγιστη ενεργό τιμή της βασικής συνιστώσας της τάσης που παράγει ο αντιστροφέας  $V_{i,1}^{rms}$ . Την τιμή αυτή επηρεάζουν το επίπεδο της συνεχούς τάσης καθώς και η μέγιστη τιμή του συντελεστή  $m_\alpha$  υπό σταθερές συνθήκες λειτουργίας. Αν η τιμή αυτή του  $m_\alpha$  θεωρηθεί δεδομένη η ικανότητα παραγωγής άεργου ισχύος εξαρτάται μόνο από τη συνεχή τάση στην είσοδο του αντιστροφέα.

Χρησιμοποιώντας τους παραπάνω τύπους για την ενεργό και άεργο ισχύ στο σημείο κοινής σύνδεσης προκύπτουν:

$$P^2 = \left( \frac{3V_g V_i \sin(\delta)}{X} \right)^2 \Leftrightarrow P^2 = \left( \frac{3V_g V_i}{X} \right)^2 \sin^2(\delta)$$

και

$$Q^2 = \left\{ \frac{3V_g(V_i \cos(\delta) - V_g)}{X} \right\}^2 \Leftrightarrow Q^2 = \left( \frac{3V_g V_i}{X} \right)^2 \cos^2(\delta) + \left( \frac{3V_g^2}{X} \right)^2 - 2 \frac{3V_g V_i \cos(\delta)}{X} \frac{3V_g^2}{X}$$

Αθροίζοντας τις δύο παραπάνω σχέσεις κατά μέλη προκύπτει:

$$P^2 + Q^2 = \left( \frac{3V_g V_i}{X} \right)^2 \sin^2(\delta) + \left( \frac{3V_g V_i}{X} \right)^2 \cos^2(\delta) + \left( \frac{3V_g^2}{X} \right)^2 - 2 \frac{3V_g V_i \cos(\delta)}{X} \frac{3V_g^2}{X} \Leftrightarrow$$

$$P^2 + Q^2 = \left( \frac{3V_g V_i}{X} \right)^2 + 2 \left( \frac{3V_g^2}{X} \right)^2 - \frac{3V_g^2}{X} - 2 \frac{3V_g V_i \cos(\delta)}{X} \left( \frac{3V_g^2}{X} \right) \Leftrightarrow$$

$$P^2 + Q^2 + \frac{3V_g^2}{X} + 2 \frac{3V_g^2}{X} \left( \frac{3V_g V_i \cos(\delta)}{X} - \frac{3V_g^2}{X} \right) = \left( \frac{3V_g V_i}{X} \right)^2$$

Μέσω της (2) προκύπτει :

$$P^2 + Q^2 + \frac{3V_g^2}{X} + 2 \frac{3V_g^2}{X} Q = \left( \frac{3V_g V_i}{X} \right)^2 \Leftrightarrow$$

$$P^2 + \left( Q + \frac{3V_g^2}{X} \right)^2 = \left( \frac{3V_g V_i}{X} \right)^2 \quad (3)$$

Από τη σχέση (3) προκύπτει ότι ο γεωμετρικός τόπος του 3<sup>ου</sup> περιορισμού είναι κύκλος με κέντρο το  $K(-\frac{3V_g^2}{X}, 0)$  και ακτίνα  $\rho = \frac{3V_g V_i}{X}$ .

### 2.5.3. Επιλογή της συνεχούς τάσης εισόδου του αντιστροφέα.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, από τον τύπο της άεργου ισχύος προκύπτει ότι για να είναι δυνατή η έγχυση άεργου ισχύος στο δίκτυο θα πρέπει :

$$V_i > V_g.$$

Η ενεργός τιμή της πολικής τάσης του δικτύου ισούται με:

$$V_g^{LL} = \sqrt{3}V_g = 575 \text{ V}.$$

Η μέγιστη ενεργός τιμή της πολικής τάσης του αντιστροφέα προκύπτει για  $m_\alpha = 1$  και είναι:

$$V_i^{LL} = \frac{\sqrt{3} V_d}{\sqrt{2} \cdot 2}$$

$$\text{Άρα, } V_i^{LL} > V_g^{LL} \Leftrightarrow \frac{\sqrt{3} V_d}{\sqrt{2} \cdot 2} > V_g^{LL} \Leftrightarrow V_d > 1,633 V_g^{LL}$$

Στη συγκεκριμένη εργασία είναι  $V_g^{LL} = 575 \text{ V}$  οπότε προκύπτει:

$$V_d > 938,97 \text{ V}.$$

Η τιμή της dc τάσης επιλέχθηκε να είναι 1100 V.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

---

### 3. Έλεγχος του αντιστροφέα.

Η ενεργειακή διείσδυση των αιολικών πάρκων αυξάνεται συνεχώς, με αποκορύφωμα η ισχύς που προέρχεται από την αιολική ενέργεια να ξεπερνά το 20% της συνολικά εγκατεστημένης σε ορισμένες ευρωπαϊκές χώρες, όπως η Γερμανία και η Ισπανία. Αυτό έχει άμεσο αντίκτυπο τόσο – προφανώς – στο ενεργειακό ισοζύγιο, όσο και στην ευστάθεια του δικτύου.

Παλαιότερα, και με δεδομένο ότι η διείσδυση της αιολικής ενέργειας δεν ήταν τόσο μεγάλη, σε περίπτωση διαταραχών θεωρούνταν προτιμότερη η απομάκρυνση των αιολικών πάρκων από το ζυγό. Με τα σημερινά δεδομένα και τη συνεχώς αυξανόμενη τοποθέτηση αιολικών πάρκων κάτι τέτοιο θα μπορούσε να αποβεί καταστροφικό για την ευστάθεια του δικτύου, ακόμα και να προκαλέσει ολικό μπλακ – άουτ. Κρίνεται επομένως απαραίτητη η συμμετοχή των αιολικών πάρκων στον έλεγχο συγκεκριμένων παραμέτρων του συστήματος, έτσι ώστε να καθίσταται δυνατή η συνεισφορά ενός μεγάλου ποσοστού της συνολικής παραγωγής από τα πάρκα αυτά.

Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιείται μέσω του αντιστροφέα πηγής τάσης και πραγματεύεται την άεργο ισχύ που διαχέεται στο δίκτυο, όπως και την ενεργό διαμέσου της DC τάσης στην είσοδο του αντιστροφέα. Μάλιστα, ορισμένες φορές κατά τη διάρκεια διαταραχής κρίνεται σκόπιμο να υπάρχει αυξημένη παραγωγή άεργου ισχύος προκειμένου να υποστηριχτεί η τάση του δικτύου.

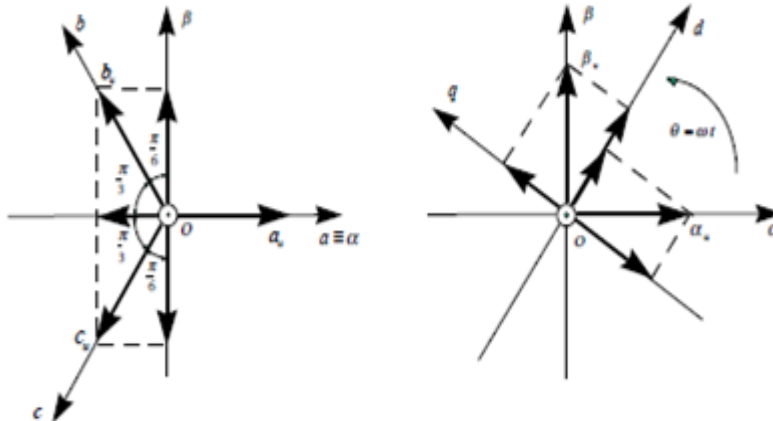
#### 3.1. Μετασχηματισμός δύο αξόνων (D-Q).

Ο μετασχηματισμός δύο αξόνων (dq) χρησιμοποιείται ώστε να απλοποιηθεί η ανάλυση των τάσεων και των ρευμάτων σε τριφασικά συστήματα. Στην ουσία πρόκειται για μια μετατροπή των τριφασικών μεγεθών από ένα τριφασικό (abc) σταθερό σύστημα συντεταγμένων σε ένα σύστημα δύο φάσεων (dq) [16]. Ο μετασχηματισμός αυτός λαμβάνει χώρα σε δύο βήματα:

1)μετασχηματισμός από το abc σταθερό σύστημα συντεταγμένων στο αβ σταθερό σύστημα συντεταγμένων.

2)μετασχηματισμός από το αβ σταθερό σύστημα συντεταγμένων στο dq στροφόμενο σύστημα.

Τα παραπάνω βήματα παρουσιάζονται στο σχήμα 3.1.1.



$$[\alpha \quad \beta \quad 0] = [\alpha_u \quad b_u \quad c_u] \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$[d_\omega \quad q_\omega \quad o_\omega] = [\alpha \quad \beta \quad 0] \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[d_\omega \quad q_\omega \quad o_\omega] = [\alpha_u \quad b_u \quad c_u] \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & \frac{1}{2} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{2} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

Σχήμα 3.1.1. Μετασχηματισμός από το τριφασικό abc σταθερό σύστημα στο στροφόμενο dq σύστημα συντεταγμένων[16].

Η αναπαράσταση ενός διανύσματος στο τρισδιάστατο χώρο έχει ως εξής:

$$X_{abc} = [\alpha_u \quad b_u \quad c_u] \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (3.1.1)$$

Αν θεωρήσουμε ένα τριφασικό σύστημα σε ισορροπία ( $x_o=0$ ), η τριφασική αναπαράσταση του διανύσματος μετασχηματίζεται σε dq διανυσματική αναπαράσταση μέσω του πίνακα μετασχηματισμού  $T_\alpha$ , ο οποίος ορίζεται ως εξής:



$$T = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\omega t & \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin\omega t & -\sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (3.1.2)$$

Δηλαδή, ο μετασχηματισμός από το  $X_{abc} = \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix}$  στο  $X_{dq} = \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix}$ , ο οποίος ονομάζεται μετασχηματισμός Park, επιτυγχάνεται πολλαπλασιάζοντας το διάνυσμα  $X_{abc}$  με τον πίνακα T:

$$X_{dq} = TX_{abc} \quad (3.1.3)$$

Ο πίνακας αντίστροφου μετασχηματισμού (από το dq στο abc) ορίζεται ως εξής:

$$T' = \begin{bmatrix} \cos\omega t & -\sin\omega t \\ \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \\ \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (3.1.4)$$

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός υπολογίζεται:

$$X_{abc} = T' X_{dq} \quad (3.1.5)$$

Για τα διανύσματα της τάσης και του ρεύματος στο dq πλαίσιο έχουμε:

$$\widetilde{V}_{dq} = V_d + jV_q$$

$$\widetilde{I}_{dq} = I_d + jI_q$$

Όπου:

$$V_q = -\frac{2}{3}(V_a \sin\omega_e t + V_b \sin(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}) + V_c \sin(\omega_e t + \frac{2\pi}{3}))$$

$$V_d = \frac{2}{3}(V_a \cos\omega_e t + V_b \cos(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}) + V_c \cos(\omega_e t + \frac{2\pi}{3}))$$

$$V_o = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c)$$

$$I_q = -\frac{2}{3}(I_a \sin\omega_e t + I_b \sin(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}) + I_c \sin(\omega_e t + \frac{2\pi}{3}))$$

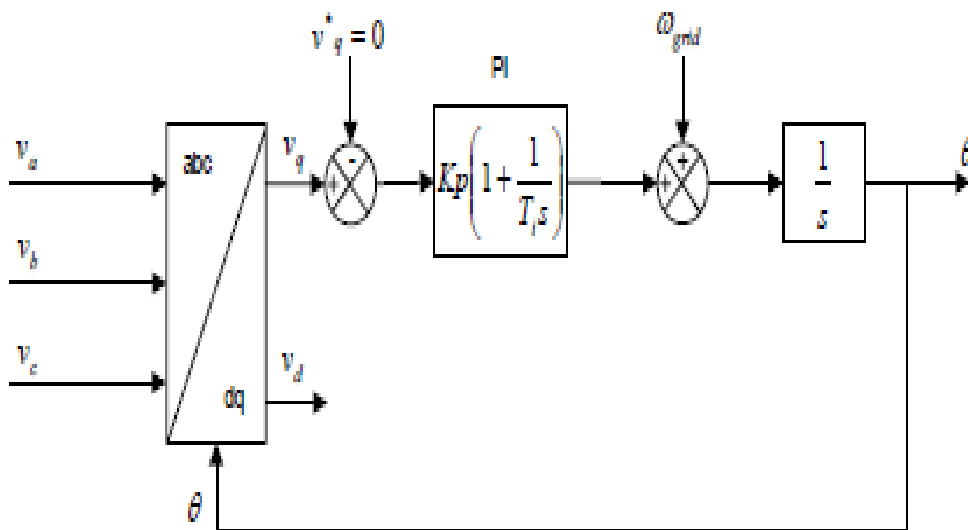
$$I_d = \frac{2}{3}(I_a \cos\omega_e t + I_b \cos(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}) + I_c \cos(\omega_e t + \frac{2\pi}{3}))$$

$$I_o = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c)$$

Μεταξύ των αξόνων d και α σχηματίζεται μηδενική γωνία  $\phi=0^\circ$ . Σε συνθήκες συμμετρίας δεν έχουμε μηδενική συνιστώσα των μεγεθών. Ο dq μετασχηματισμός πραγματοποιείται στο Simulink μέσω block της βιβλιοθήκης που υπάρχει στο πρόγραμμα προσομοίωσης.

### 3.2. Βρόχος κλειδωμένης φάσης (Phase-Locked-Loop - PLL).

Όπως είναι φανερό από την προηγούμενη ανάλυση του dq μετασχηματισμού είναι απαραίτητη ανά πάσα στιγμή η γνώση της συχνότητας δικτύου, ώστε να είναι γνωστή και η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής των διανυσμάτων της τάσης του δικτύου που πρέπει να είναι ίδια με τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του dq πλαισίου. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός PLL. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η λειτουργία ενός PLL.



Σχήμα 3.2.1. Διάγραμμα λειτουργίας PLL[13].

### 3.3. Τριφασική ισχύς στο dq σύστημα συντεταγμένων

Σε ένα τριφασικό σύστημα η ισχύς υπολογίζεται ως εξής:

$$P(t) = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = [v_a \quad v_b \quad v_c][i_a \quad i_b \quad i_c]^T$$

Αν χρησιμοποιήσουμε τον dq μετασχηματισμό τότε για την τριφασική φαινόμενη ισχύ έχουμε:

$$\tilde{S} = \frac{3}{2} \tilde{V}_{dq} \tilde{I}_{dq}^* = \frac{3}{2} (V_d I_d + V_q I_q) + j \frac{3}{2} (V_q I_d - V_d I_q)$$

Επομένως για την ενεργό και άεργο ισχύ έχουμε αντίστοιχα:

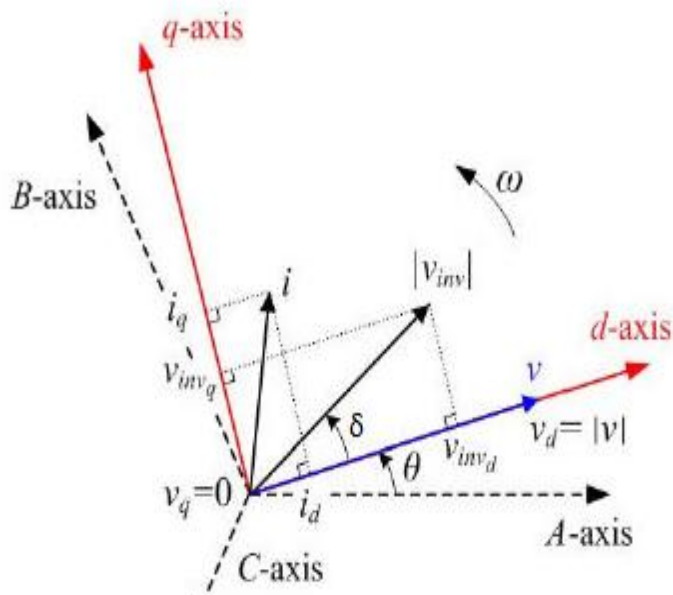
$$P = \frac{3}{2} (V_d I_d + V_q I_q) \text{ και}$$

$$Q = \frac{3}{2} (V_q I_d - V_d I_q)$$

Στο παρακάτω σχήμα παριστάνονται τα διανύσματα της τάσης και της έντασης στο στρεφόμενο dq σύστημα συντεταγμένων. Αν θεωρήσουμε ότι το διάνυσμα της τάσης συμπίπτει με τον d άξονα θα έχουμε,  $V_d = |V|$  και  $V_q = 0$ . Επομένως για την ενεργό και άεργο ισχύ ισχύουν:

$$P = \frac{3}{2} |V| I_d \text{ και}$$

$$Q = -\frac{3}{2} |V| I_q.$$

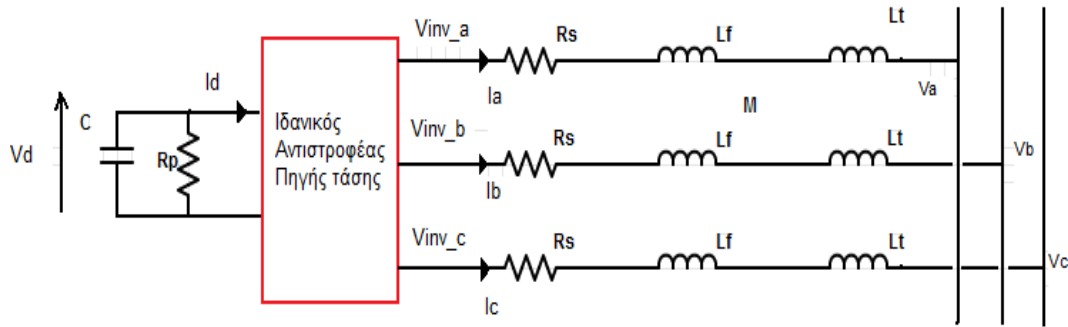


Σχήμα 3.3.1. Διανύσματα τάσης και ρεύματος στο dq σύστημα συντεταγμένων[12].

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω σχέσεις, αν ισχύει  $V_q = 0$ , τότε η ενεργός ισχύς μεταβάλλεται συναρτήσει της d συνιστώσας του ρεύματος, ενώ η άεργος συναρτήσει της q συνιστώσας αυτού. Επομένως, μπορεί να επιτευχθεί ρύθμιση της ενεργού και της άεργου ισχύος που παράγεται αν ρυθμίζονται μέσω του αντιστροφέα οι αντίστοιχες συνιστώσες του ρεύματος.

### 3.4. Σύστημα ελέγχου του αντιστροφέα.

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, στην έξοδο του αντιστροφέα τοποθετείται ένα φίλτρο εξόδου, το οποίο φιλτράρει τις βλαβερές αρμονικές, οι οποίες έχουν «απομακρυνθεί» από τη θεμελιώδη μέσω της τεχνικής SPWM. Επομένως, μπορούμε να θεωρήσουμε τον αντιστροφέα μια ιδανική πηγή τάσης[18]. Επίσης, πολύ συχνή είναι η τοποθέτηση μεταξύ αντιστροφέα και δικτύου ενός μετασχηματιστή έτσι ώστε να προσαρμόζει την τάση εξόδου του αντιστροφέα με την τάση του δικτύου. Αν σχεδιαστεί το ισοδύναμο κύκλωμα σύνδεσης του αντιστροφέα με το δίκτυο λοιπόν, πρέπει να υπολογιστούν η αντίδραση σκέδασης  $L_t$  του μετασχηματιστή και η αντίδραση του φίλτρου  $L_f$  και να συνδεθούν σε σειρά με την αντίσταση  $R_s$ , η οποία αντιστοιχεί στις απώλειες του μετασχηματιστή και του φίλτρου. Ένα άλλο μέγεθος που πρέπει να υπολογιστεί είναι η αλληλεπαγωγή  $M$  των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή καθώς και οι απώλειες  $R_p$  του πυκνωτή που βρίσκεται στην πλευρά σύνδεσης αντιστροφέα-ανεμογεννήτριας. Βάσει των παραπάνω, το ισοδύναμο κύκλωμα σύνδεσης αντιστροφέα – δικτύου παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.4.1. Ισοδύναμο κύκλωμα σύνδεσης αντιστροφέα με το δίκτυο.

Χρησιμοποιώντας τον νόμο του Kirchhoff προκύπτουν οι εξισώσεις του παραπάνω κυκλώματος:

$$\begin{bmatrix} V_{inva} \\ V_{invb} \\ V_{invc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} + (R_s + sL_s) \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.4.1)$$

$$\text{Όπου } s = \frac{d}{dt}, R_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \text{ και } L_s = \begin{bmatrix} L_f + L_t & M & M \\ M & L_f + L_t & M \\ M & M & L_f + L_t \end{bmatrix}$$

Μετασχηματίζοντας τα παραπάνω μεγέθη στο dq στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς προκύπτουν οι εξισώσεις:

$$\begin{bmatrix} V_{invd} - V_d \\ V_{invq} - V_q \\ V_{inv0} - V_0 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} V_{inva} - V_a \\ V_{invb} - V_b \\ V_{invc} - V_c \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.4.2)$$

Αξίζει να σημειώσουμε ότι ο d άξονας ταυτίζεται με το διάνυσμα της τάσης ( $V_d=|V|$  και  $V_q=0$ ) και ότι ο T είναι ο πίνακας μετασχηματισμού abc-dq και παρατίθεται στο κεφάλαιο του dq μετασχηματισμού. Αν συνδυάσουμε τις εξισώσεις (3.4.1) και (3.4.2) και δεν λάβουμε υπόψη τις μηδενικές συνιστώσες της τάσης και του ρεύματος τότε προκύπτει:

$$\begin{bmatrix} v_{invd} \\ v_{invq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} + (R_s + sL'_s) \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega & 0 \\ 0 & \omega \end{bmatrix} \cdot L'_s \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (3.4.3)$$

$$\text{Όπου } R_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix}, L'_s = \begin{bmatrix} L'_s & 0 \\ 0 & L'_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_f + L_t - M & 0 \\ 0 & L_f + L_t - M \end{bmatrix}$$

και  $\omega$  είναι η γωνιακή ταχύτητα της τάσης του δικτύου για τη θεμελιώδη συχνότητα.

Μεταξύ της ac και της dc πλευράς πρέπει να τηρείται το στιγμιαίο ισοζύγιο ισχύος, οπότε:

$$P_{ac} = P_{dc} \Leftrightarrow \frac{3}{2} (v_d^{inv} i_d + v_q^{inv} i_q) = -\frac{C_d}{2} V_d \cdot sV_d - \frac{V_d^2}{R_p} \quad (3.4.4)$$

Από το κεφάλαιο 2.5.1 κι αν ο λόγος ανύψωσης του μετασχηματιστή είναι  $\alpha=n_2/n_1$ , τότε η τάση του αντιστροφέα στο σημείο σύνδεσης με το δίκτυο είναι:

$$v_{inv} = a \cdot m_a \cdot \frac{V_d}{2} \quad (3.4.5)$$

Μέσω του σχήματος 3.3.1 προκύπτουν οι d,q συνιστώσες της παραπάνω τάσης:

$$\begin{bmatrix} v_{invd} \\ v_{invq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta \\ \sin\delta \end{bmatrix} \cdot v_{inv} \quad (3.4.6)$$

Άρα μέσω των (3.4.5), (3.4.6) έχουμε τη σχέση:

$$\begin{bmatrix} v_{invd} \\ v_{invq} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \alpha \cdot m_a \begin{bmatrix} \cos\delta \\ \sin\delta \end{bmatrix} \cdot V_d \quad (3.4.7)$$

Μέσω των σχέσεων (3.4.3), (3.4.4) και (3.4.7) μπορούμε να εξάγουμε την εξίσωση κατάστασης του υπό έλεγχο συστήματος[18]:

$$s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ V_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{L_s'} & \omega & \frac{m_a \cos\delta}{2L_s'} \\ -\omega & \frac{-R_s}{L_s'} & \frac{m_a \sin\delta}{2L_s'} \\ -\frac{3}{2C} m_a \cos\delta & -\frac{3}{2C} m_a \sin\delta & -\frac{2}{R_p C} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ V_d \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} |v| \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Η παραπάνω εξίσωση κατάστασης αποτελεί τη βάση της λειτουργίας και του σχεδιασμού του μοντέλου προσομοίωσης για το σύστημα ελέγχου. Είναι εύκολο να παρατηρήσει κανείς ότι οι δύο συνιστώσες του ρεύματος του αντιστροφέα  $i_d, i_q$  αλληλοεξαρτώνται (cross-coupling) μέσω της γωνιακής ταχύτητας της τάσης του δικτύου  $\omega$ . Επειδή επιθυμούμε η ενεργός και η άεργος ισχύς να ελέγχονται ξεχωριστά και ανεξάρτητα, οι συνιστώσες ρεύματος του αντιστροφέα ανεξαρτητοποιούνται αφού δημιουργήσουμε δύο σήματα ελέγχου  $x_1, x_2$  έτσι ώστε:

$$s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s'} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{cases} x_1 = L_s' \cdot s i_d \\ x_2 = L_s' \cdot s i_q \end{cases}$$

Τα σήματα ελέγχου  $x_1, x_2$  παράγονται μέσω PI ελεγκτών και κατάλληλης ανατροφοδότησης των  $i_d, i_q$ . Μέσω των PI ελεγκτών η παραπάνω σχέση μπορεί να αποδοθεί ως εξής:

$$x_1 = PI\{i_d^{ref} - i_d\}$$

$$x_2 = PI\{i_q^{ref} - i_q\}$$

Αν παρατηρήσουμε την εξίσωση κατάστασης θα δούμε ότι οι d,q συνιστώσες του ρεύματος του αντιστροφέα αλληλεξαρτώνται και μέσω της τάσης του πυκνωτή στην είσοδο του αντιστροφέα  $V_d$ . Η τάση αυτή πρέπει να παραμένει σε σταθερή τιμή έτσι ώστε να μειωθεί η επίδραση της όσον αφορά στις συνιστώσες του ρεύματος. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ένας ακόμα PI ελεγκτής, ο οποίος επιτρέποντας μικρές μεταβολές στην ανταλλαγή ισχύος με το δίκτυο διατηρεί την τάση σταθερή. Υποθέτουμε λοιπόν ότι το

σύστημα παρέχει συγκεκριμένη ενεργό ισχύ στο δίκτυο λειτουργώντας υπό μια αντίστοιχη ταχύτητα ανέμου. Αν η ανεμογεννήτρια δεχθεί μια ριπή ανέμου τότε θα αυξηθεί η αεροδυναμική ροπή και λόγω της λειτουργίας του MPPT ελεγκτή θα αυξηθεί το ρεύμα στην είσοδο του αντιστροφέα ενώ και η τάση του πυκνωτή στην είσοδο του αντιστροφέα θα τείνει να αυξηθεί. Ωστόσο, ο ελεγκτής, προγραμματισμένος έτσι ώστε να μην μεταβάλλεται η τάση στην είσοδο του αντιστροφέα, θα ρυθμίσει κατάλληλα τους παλμούς του αντιστροφέα ώστε να αυξηθεί η μεταγωγή ενεργού ισχύος στο δίκτυο και η τάση στην είσοδο του να παραμείνει σταθερή. Η αντίστροφη διαδικασία θα ακολουθηθεί σε περίπτωση μείωσης του ανέμου. Για να αυξηθεί η παραγόμενη ισχύς από την ανεμογεννήτρια ο ελεγκτής αυξάνει την εντολή ρεύματος  $i_d^{ref}$  και ο αντιστροφέας τροφοδοτεί το δίκτυο με μεγαλύτερη ποσότητα ισχύος. Επομένως, για την τιμή αναφοράς της d συνιστώσας του ρεύματος του αντιστροφέα έχουμε:

$$i_d^{ref} = PI\{V_{dc}^{ref} - V_{dc}\}$$

Στο μοντέλο προσομοίωσης μας λαμβάνουμε και δειγματοληπούμε την τάση του δικτύου  $V_{abc\_grid}$  πριν τον μετασχηματιστή, άρα η σύνθετη αντίσταση του δεν υπολογίζεται. Μέσω της (3.4.3) λοιπόν, οι d,q συνιστώσες της τάσης αναφοράς του αντιστροφέα είναι οι ακόλουθες:

$$v_d^{inv} = v_d + R_s \cdot i_d + x_1 - \omega L_s \cdot i_q$$

και

$$v_q^{inv} = v_q + R_s \cdot i_q + x_2 - \omega L_s \cdot i_d$$

(3.4.8)

Στην πραγματικότητα ο έλεγχος μας διενεργείται σε δύο επίπεδα:

- Έλεγχος της d συνιστώσας της τάσης αναφοράς του αντιστροφέα. Περιλαμβάνονται δύο βρόχοι ελέγχου, ένας εξωτερικός κι ένας εσωτερικός. Ο εξωτερικός φροντίζει ώστε να διατηρείται σταθερή η  $V_{dc}$  αλλά και να ανταλλάσσεται ενεργός ισχύς με το δίκτυο, δίνοντας στο ρεύμα αναφοράς της d συνιστώσας την τιμή  $i_d^{ref}$ . Ο εσωτερικός αποτελεί τον ρυθμιστή του ρεύματος  $i_d$  και ορίζοντας την τάση  $x_1$ , καθορίζει στην ουσία την d συνιστώσα της τάσης αναφοράς.
- Έλεγχος της q συνιστώσας της τάσης αναφοράς του αντιστροφέα. Περιλαμβάνονται δύο βρόχοι ελέγχου, ένας εξωτερικός κι ένας εσωτερικός. Ο εξωτερικός θέτει το ρεύμα αναφοράς της q συνιστώσας  $i_q^{ref}$  και ο εσωτερικός επιτελεί τις ίδιες λειτουργίες με τον εσωτερικό βρόχο του ελεγκτή της d συνιστώσας (εδώ όμως  $i_q$  ρεύμα και  $x_2$  τάση), καθορίζοντας την q συνιστώσα της τάσης αναφοράς[24].

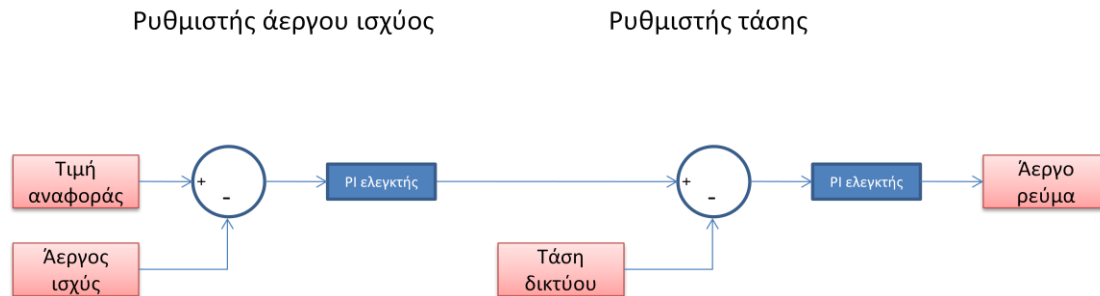
### 3.5 . Έλεγχος της άεργου ισχύος.

Προκειμένου να ελέγξουμε την άεργο ισχύ που αποδίδεται στο δίκτυο μετράμε την τάση στην έξοδο του φίλτρου  $V_{meas}$  και την άεργο ισχύ που παράγει η ανεμογεννήτρια  $Q_{meas}$ . Στην άεργο ισχύ συμπεριλαμβάνεται και η άεργος ισχύς που παράγεται από τον πυκνωτή του

φίλτρου  $Q_{C\_filter}$ . Αν η άεργος ισχύς που παράγεται από τον αντιστροφέα είναι  $Q_{inv}$  τότε έχουμε τη σχέση:

$$Q_{meas} = Q_{inv} + Q_{C\_filter}$$

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα ελέγχου στο σχήμα 3.5.1.



Σχήμα 3.5.1. Δομικό διάγραμμα ελέγχου της άεργου ισχύος.

Παρατηρούμε, λοιπόν, στο παραπάνω διάγραμμα ότι αρχικά συγκρίνουμε την μετρούμενη άεργο ισχύ στην έξοδο της ανεμογεννήτριας  $Q_{meas}$  με την τιμή αναφοράς  $Q_{ref}$  και το εξαγόμενο σφάλμα περνάει σε έναν PI ελεγκτή. Η έξοδος του ελεγκτή είναι η τιμή αναφοράς  $V_{ref}$ , που επιθυμούμε να έχει η τάση στην έξοδο του φίλτρου. Ακολουθώντας την ίδια ακριβώς διαδικασία προκύπτει μέσω ενός PI ελεγκτή η  $q$  συνιστώσα του ρεύματος του αντιστροφέα  $i_{q\_ref}$ , μέσω της οποίας ελέγχεται η παραγωγή της άεργου ισχύος. Η άεργος ισχύς που δύναται να παραχθεί προφανώς δεν είναι απεριόριστη. Αντίθετα, το εύρος της άεργου ισχύος που μπορούμε να παράξουμε περιορίζεται από το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να διατρέξει τα διακοπτικά στοιχεία του αντιστροφέα, χωρίς να τα καταστρέψει. Το ρεύμα αυτό είναι  $I_{inv\_max} = 1.1$  pu και η συνθήκη που πρέπει να τηρείται είναι η εξής:

$$\sqrt{I_d^2 + I_q^2} \leq I_{inv\_max}$$

Επειδή προτεραιότητα του αντιστροφέα αποτελεί το να μεταφέρει την ενεργό ισχύ από την ανεμογεννήτρια στο δίκτυο, η  $d$  συνιστώσα του ρεύματος δεν περιορίζεται. Επομένως, περιορίζεται η  $q$  συνιστώσα έτσι ώστε να τηρείται η παραπάνω συνθήκη. Έτσι έχουμε:

$$I_q \leq \sqrt{I_{inv\_max}^2 - I_d^2} \Leftrightarrow I_q \leq \sqrt{1.1^2 - I_d^2} = I_{q,max} \quad (3.5.1)$$

Από την συνθήκη αυτή προκύπτει ότι η μέγιστη παραγωγή άεργου ισχύος συμβαίνει για  $I_d^2 = 0$  και τότε  $I_q = I_{q,max} = 1.1$  pu. Η κατώτερη τιμή του  $I_{q,max}$  λαμβάνεται όταν η παραγόμενη ενεργός ισχύς της ανεμογεννήτριας είναι στα ονομαστικά επίπεδα. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε  $I_{d,max} \approx 0.9 \Rightarrow I_{q,max} = 0.63$  pu. Επομένως, ακόμα και σε λειτουργία της ανεμογεννήτριας στην ονομαστική ισχύ είναι δυνατή η παραγωγή άεργου ισχύος.

Το σύστημα ελέγχου περιλαμβάνει τέσσερις ελεγκτές/ρυθμιστές έτσι ώστε να επιτελέσει τις απαραίτητες λειτουργίες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Ο  $V_{dc}$  ρυθμιστής ( $V_{dc}$  regulator) συγκρίνει την συνεχή τάση στον πυκνωτή πριν τον αντιστροφέα με την τάση αναφοράς  $V_{dc\_ref} = 1100$  V. Η διαφορά δίνεται σε έναν PI ελεγκτή με κέρδη  $K_p = 1.1$  και  $K_i = 27.5$ , από τον

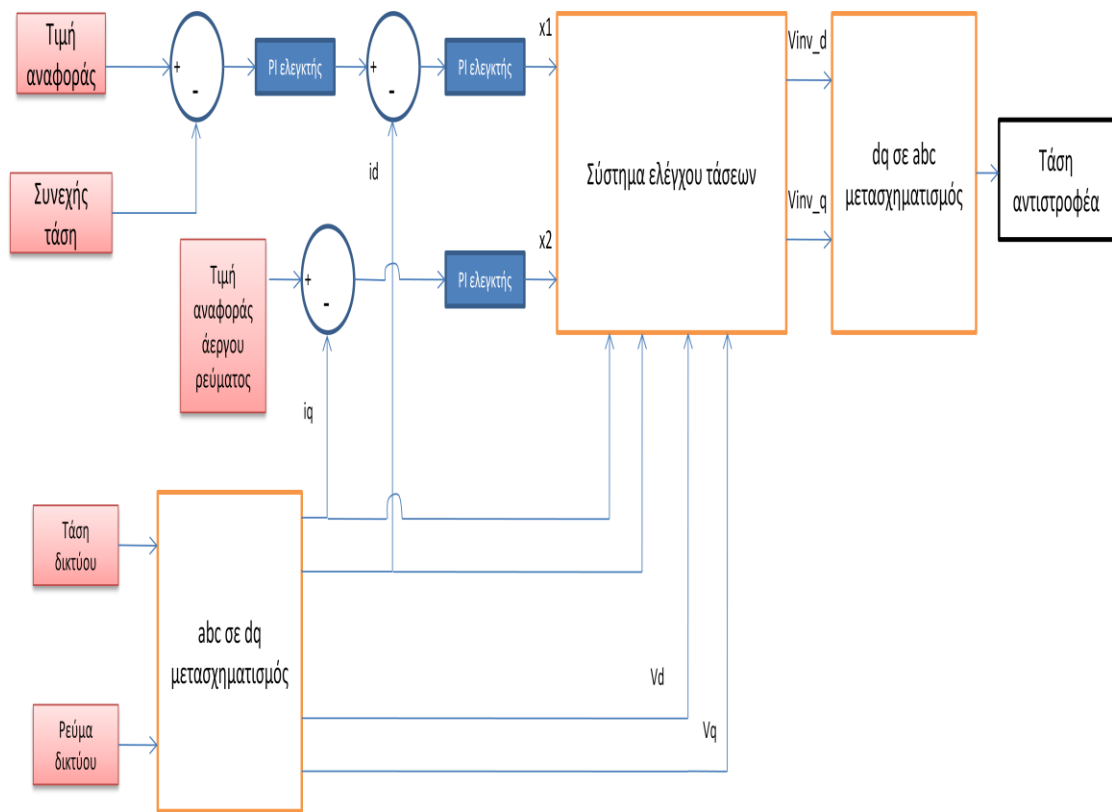


οποίο προκύπτει η τιμή αναφοράς της d συνιστώσας του ρεύματος  $i_{d\_ref}$ . Ο ρυθμιστής αέργου ισχύος (var regulator) συγκρίνει την άεργο ισχύ που μετράται στην έξοδο της ανεμογεννήτριας  $Q_{meas}$  με την τιμή αναφοράς  $Q_{ref}$ . Η διαφορά δίνεται σε έναν PI ελεγκτή με κέρδη  $K_p=3$  και  $K_i=0.05$ , από τον οποίο προκύπτει η τιμή αναφοράς της τάσης  $V_{ref}$ . Ο ρυθμιστής τάσης (voltage regulator) συγκρίνει την τάση που μετράται στην έξοδο της ανεμογεννήτριας  $V_{meas}$  με την τάση αναφοράς  $V_{ref}$  που έχει προκύψει από τον ρυθμιστή αέργου ισχύος. Η διαφορά δίνεται σε έναν PI ελεγκτή με κέρδη  $K_p=1$  και  $K_i=2$ , από τον οποίο προκύπτει η τιμή αναφοράς της q συνιστώσας του ρεύματος  $i_{q\_ref}$ . Ο ρυθμιστής αυτός εκτός από τη διαφορά των δύο τάσεων έχει σαν εισόδους τις συνθήκες που πρέπει να τηρούνται για την μέγιστη και ελάχιστη τιμή της q συνιστώσας του ρεύματος (3.5.1). Ο ρυθμιστής ρεύματος (current regulator) συγκρίνει τις μετρούμενες d,q συνιστώσες του ρεύματος με τις αντίστοιχες τιμές αναφοράς τους και η διαφορά δίνεται σε έναν PI ελεγκτή με κέρδη  $K_p=1$  και  $K_i=50$ , από τον οποίο προκύπτει το διάνυσμα  $X = [v_{d*}, v_{q*}]$ . Σύμφωνα και με τη σχέση (3.4.8) οι συνιστώσες του διανύσματος συμπεριλαμβάνονται στις εξισώσεις:

$$v_d^{inv} = v_d + R_s \cdot i_d + v_{d*} - \omega L_s \cdot i_q$$

$$v_q^{inv} = v_q + R_s \cdot i_q + v_{q*} - \omega L_s \cdot i_d$$

Έξοδος του συστήματος ελέγχου είναι οι κυματομορφές ελέγχου του αντιστροφέα, τις οποίες θα χρησιμοποιήσει η γεννήτρια παλμών για να δώσει τους κατάλληλους παλμούς οδήγησης στα διακοπτικά στοιχεία του αντιστροφέα. Το σύστημα ελέγχου απεικονίζεται στο σχήμα 3.5.2.



Σχήμα 3.5.2. Σύστημα ελέγχου αντιστροφεία.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

---

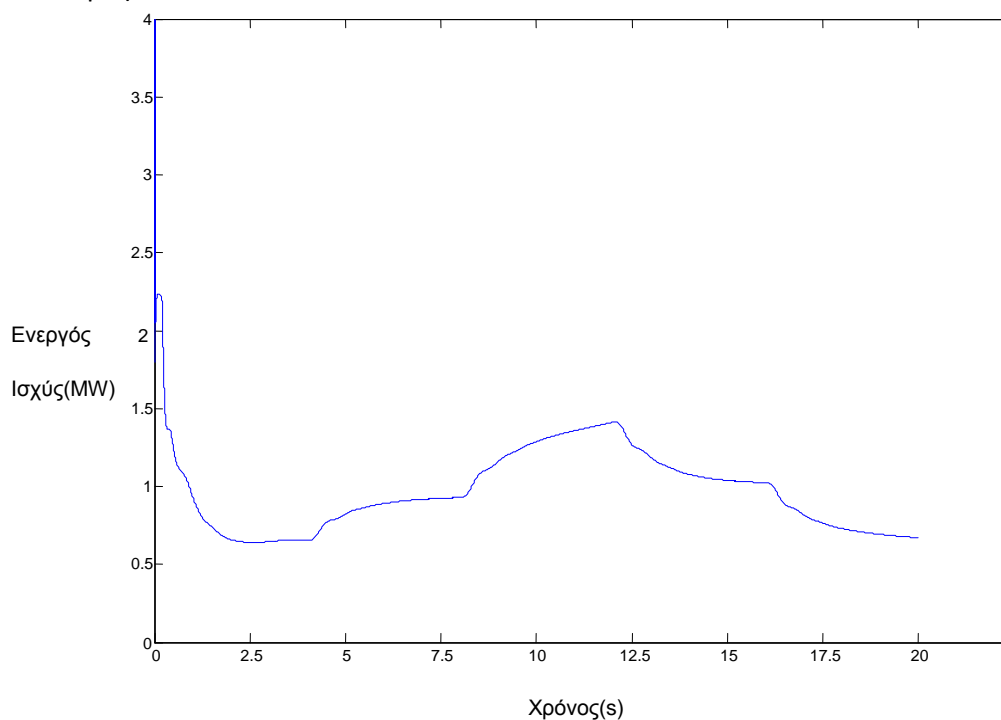
### 4.Απόκριση του μοντέλου προσομοίωσης σε λειτουργία χωρίς διαταραχές.

Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετηθεί η λειτουργία του μοντέλου προσομοίωσης χωρίς να υπάρχουν διαταραχές στο δίκτυο. Θα παρουσιαστούν οι μεταβολές διαφόρων μεγεθών – είτε ηλεκτρικών είτε μηχανικών – μέσω διαγραμμάτων και μέσω αυτών θα αξιολογηθεί το μοντέλο σαν σύνολο.

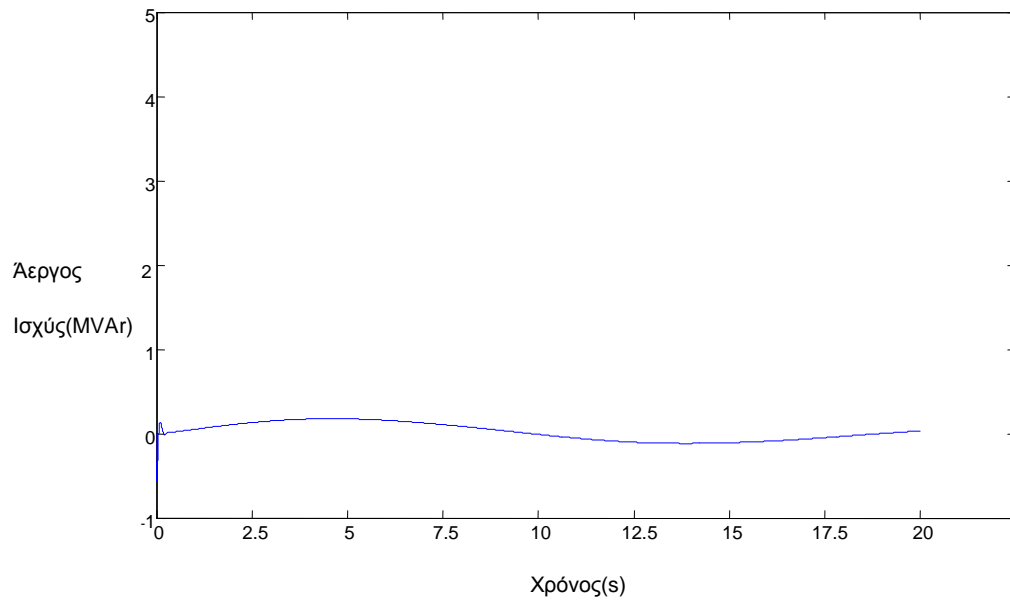
#### 4.1.Απόκριση ανεμογεννήτριας σε βηματικές μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου.

Αρχικά θα εξετάσουμε το κατά πόσο το μοντέλο μας ανταποκρίνεται σε μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου. Η προσομοίωση διαρκεί 20 s και η ταχύτητα του ανέμου εναλλάσσεται ως εξής :8m/s – 10 m/s – 12m/s – 10 m/s – 8m/s ανά 4s.

Στο σχήμα 4.1.1 παρουσιάζεται η τιμή της ενεργού ισχύος εξόδου συναρτήσει του χρόνου για τις παραπάνω ταχύτητες ανέμου. Παρατηρούμε τα «βήματα» που κάνει η ισχύς εξόδου ανάλογα με την μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου. Η τιμή της αέργου ισχύος σε αυτήν την προσομοίωση έχει διατηρηθεί σταθερή και ίση με μηδέν μέσω του ρυθμιστή του αντιστροφέα.

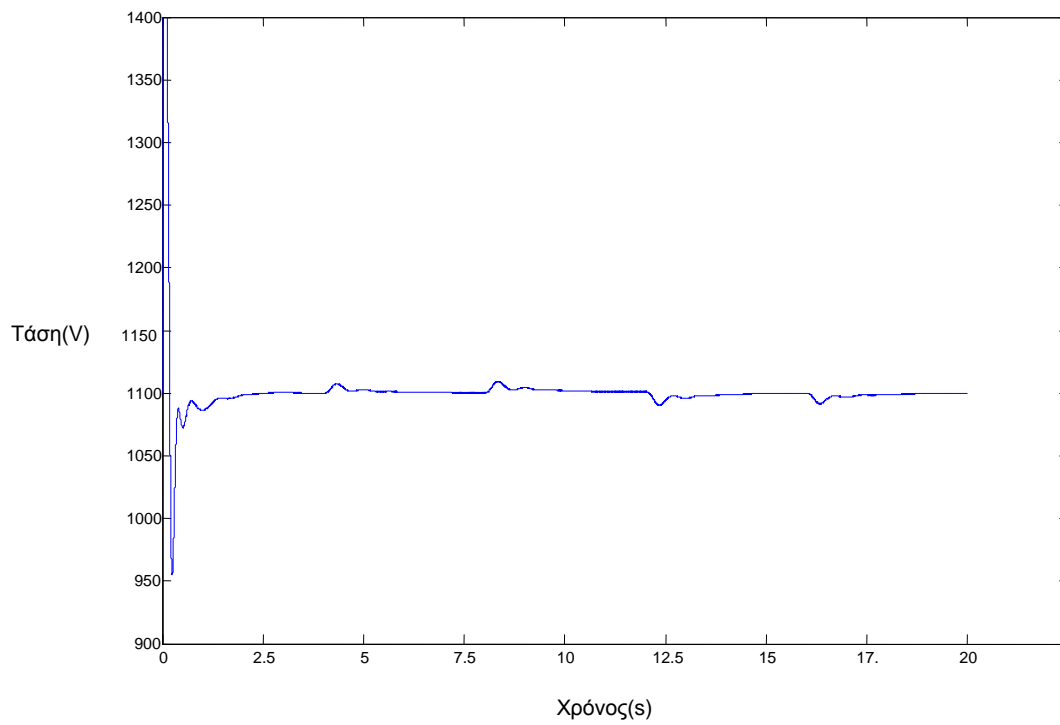


Σχήμα 4.1.1.Ενεργός ισχύς εξόδου.

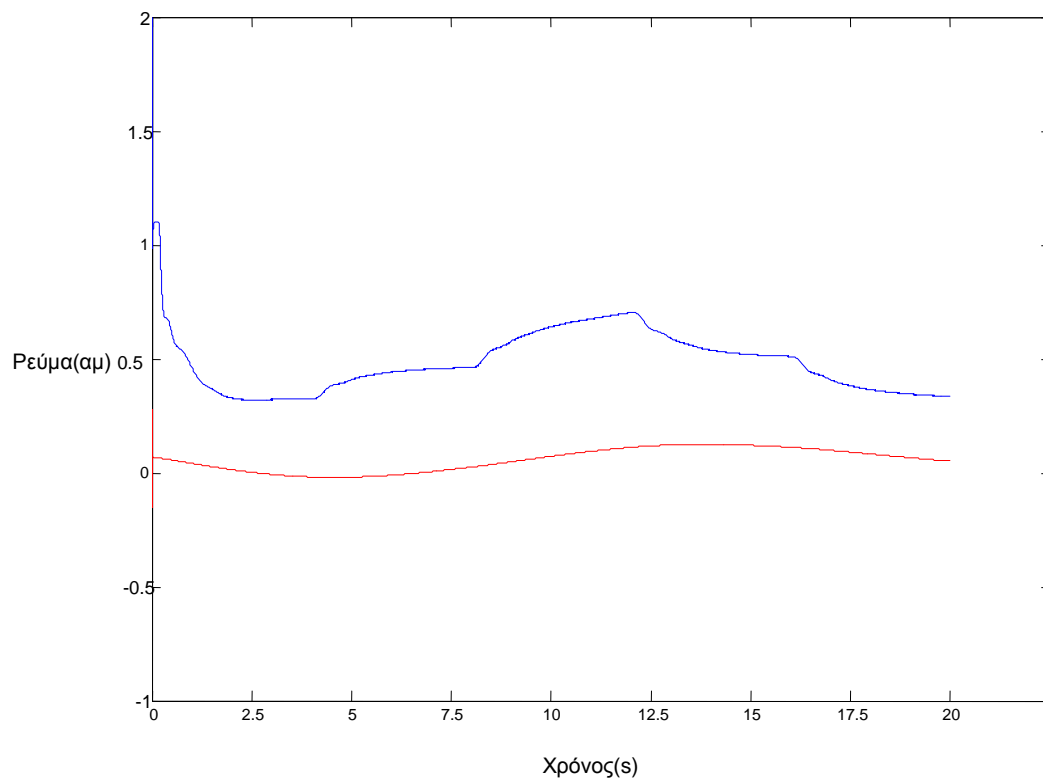


Σχήμα 4.1.2. Άεργος ισχύς.

Στο σχήμα 4.1.3 παρουσιάζεται η συνεχής τάση στην είσοδο του αντιστροφέα. Παρατηρούμε μικρές θετικές μεταβολές της τάσης αυτής στα 4s και στα 8s όπως επίσης μικρές αρνητικές μεταβολές στα 12s και στα 16s. Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο όταν η ανεμογεννήτρια δέχεται μια ριπή ανέμου τότε αυξάνεται η αεροδυναμική ροπή και λόγω της λειτουργίας του MPPT ελεγκτή αυξάνεται το ρεύμα στην είσοδο του αντιστροφέα ενώ και η τάση του πυκνωτή στην είσοδο του αντιστροφέα τείνει να αυξηθεί. Σε αυτό οφείλονται οι μικρές μεταβολές που παρατηρούμε στις χρονικές στιγμές που αναφέρθηκαν καθώς σε αυτές έχουμε αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Ωστόσο, μέσω του συστήματος ελέγχου ρυθμίζονται κατάλληλα οι παλμοί του αντιστροφέα ώστε να αυξηθεί η μεταγωγή ενεργού ισχύος στο δίκτυο και η τάση στην είσοδο του να παραμείνει σταθερή. Η αντίστροφη διαδικασία ακολουθείται σε περίπτωση μείωσης του ανέμου και έτσι δικαιολογούνται οι μικρές αρνητικές μεταβολές στα 12s και στα 16s.



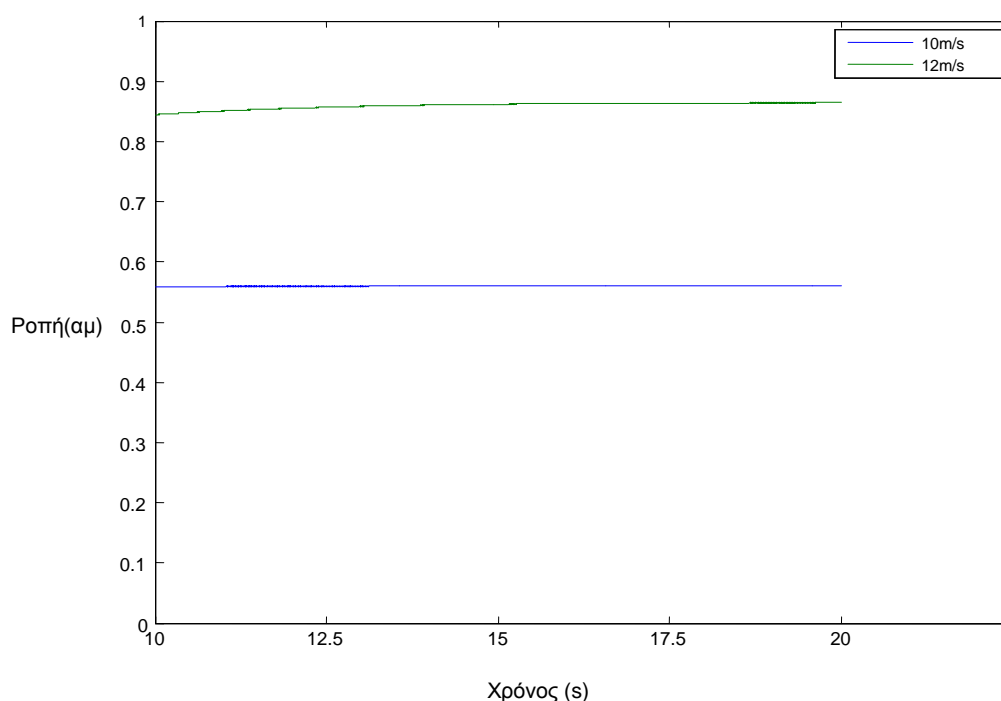
Σχήμα 4.1.3. Συνεχής τάση στην είσοδο του αντιστροφέα.



Σχήμα 4.1.4.d(μπλε) και q(κόκκινη) συνιστώσες του ρεύματος του αντιστροφέα.

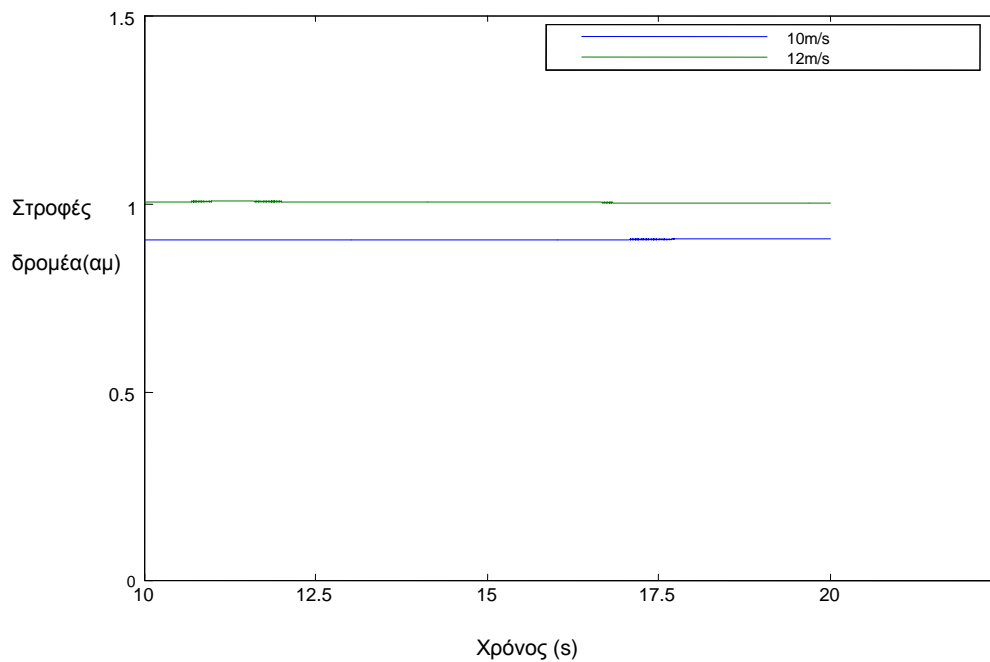
Σύμφωνα και με όσα είπαμε προηγουμένως παρατηρούμε ότι η κυματομορφή της ισχύος εξόδου ακολουθεί αυτήν της  $d$  συνιστώσας του ρεύματος του αντιστροφέα. Αφού η συνεχής τάση στην είσοδο του αντιστροφέα τείνει να αυξηθεί, ο ελεγκτής του αντιστροφέα ρυθμίζει την  $d$  συνιστώσα του ρεύματος (την αυξάνει) ώστε να αυξηθεί και η μεταγωγή ενεργού ισχύος στο δίκτυο. Αντίθετα, η ρσυνιστώσα του ρεύματος παραμένει σχεδόν σταθερή.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται και συγκρίνονται διάφορα ηλεκτρικά και μηχανικά μεγέθη για σταθερές ταχύτητες ανέμου. Στο σχήμα 4.1.7 παρουσιάζεται η μηχανική ροπή για ταχύτητες ανέμου 10m/s και 12m/s μετά τα 10s όπου το σύστημα έχει φτάσει σε κατάσταση ισορροπίας.



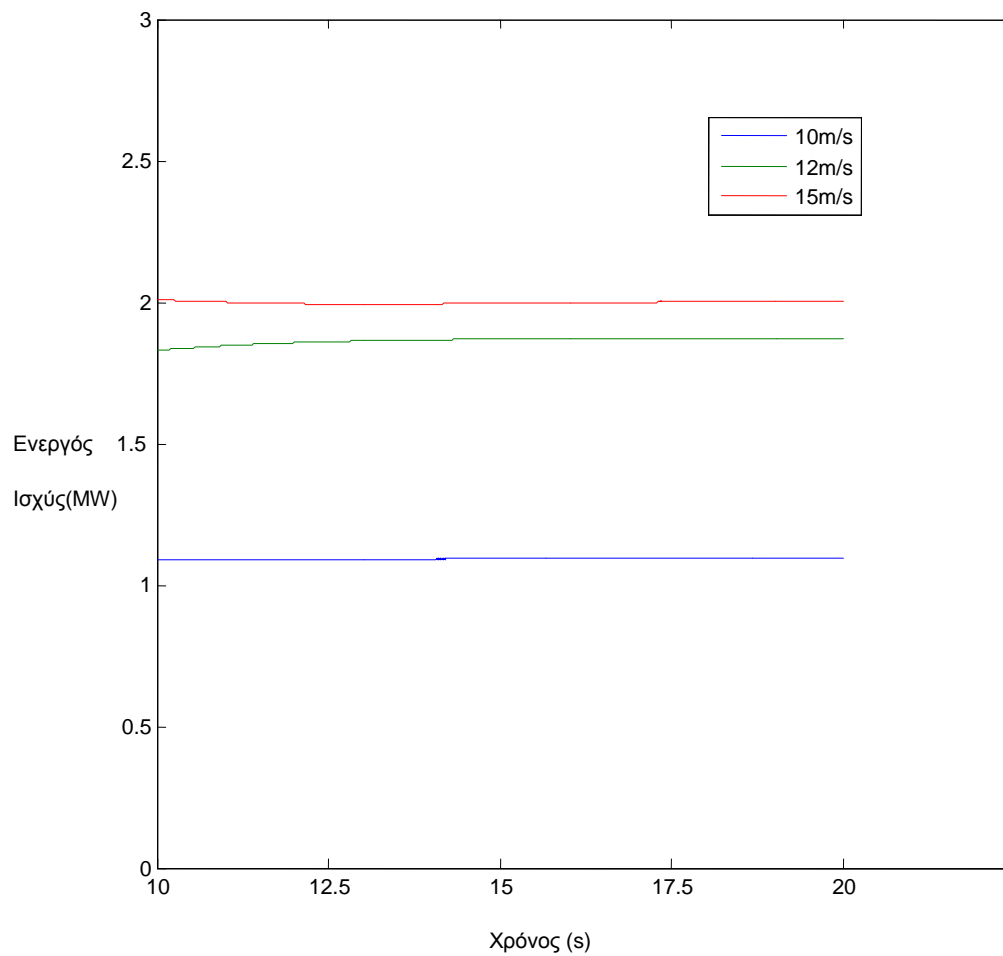
Σχήμα 4.1.7. Μηχανική ροπή για ταχύτητα ανέμου 10m/s και 12m/s.

Στο σχήμα 4.1.8 παρατηρούμε την γωνιακή ταχύτητα του δρομέα για 10m/s και 12m/s.



Σχήμα 4.1.8. Γωνιακή ταχύτητα δρομέα για ταχύτητα ανέμου 10m/s και 12m/s.

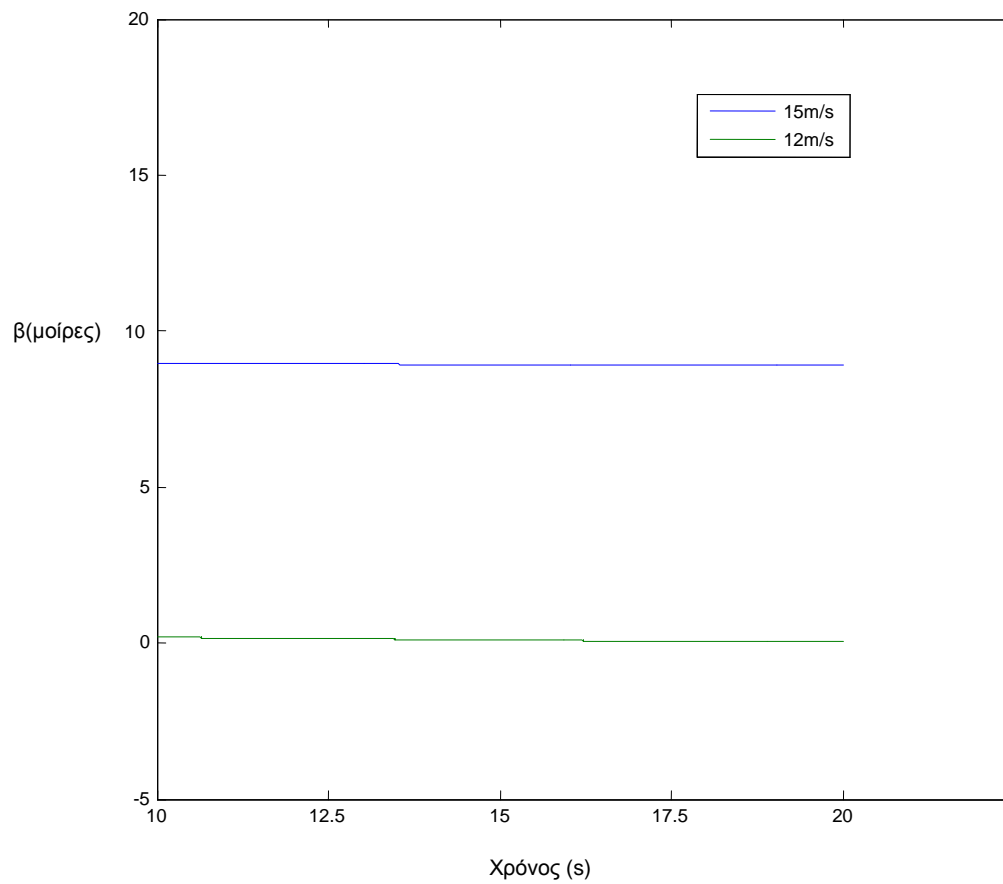
Από τα δύο παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα είναι ίση με 1rad και η μηχανική ροπή ίση με 0.86 pu για ταχύτητα ανέμου 12m/s , ενώ για ταχύτητα ανέμου 10m/s η ταχύτητα του δρομέα είναι ίση με 0.905rad και η μηχανική ροπή είναι ίση με 0.56pu. Βλέπουμε έτσι την αύξηση των τιμών των δύο μεγεθών με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου σύμφωνα πάντα με την στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος. Στο παρακάτω διάγραμμα παρατηρούμε την τιμή της ισχύος αυτής για τις δύο παραπάνω ταχύτητες ανέμου αλλά και για  $V_w=15m/s$ .



Σχήμα 4.1.9. Ισχύς εξόδου.

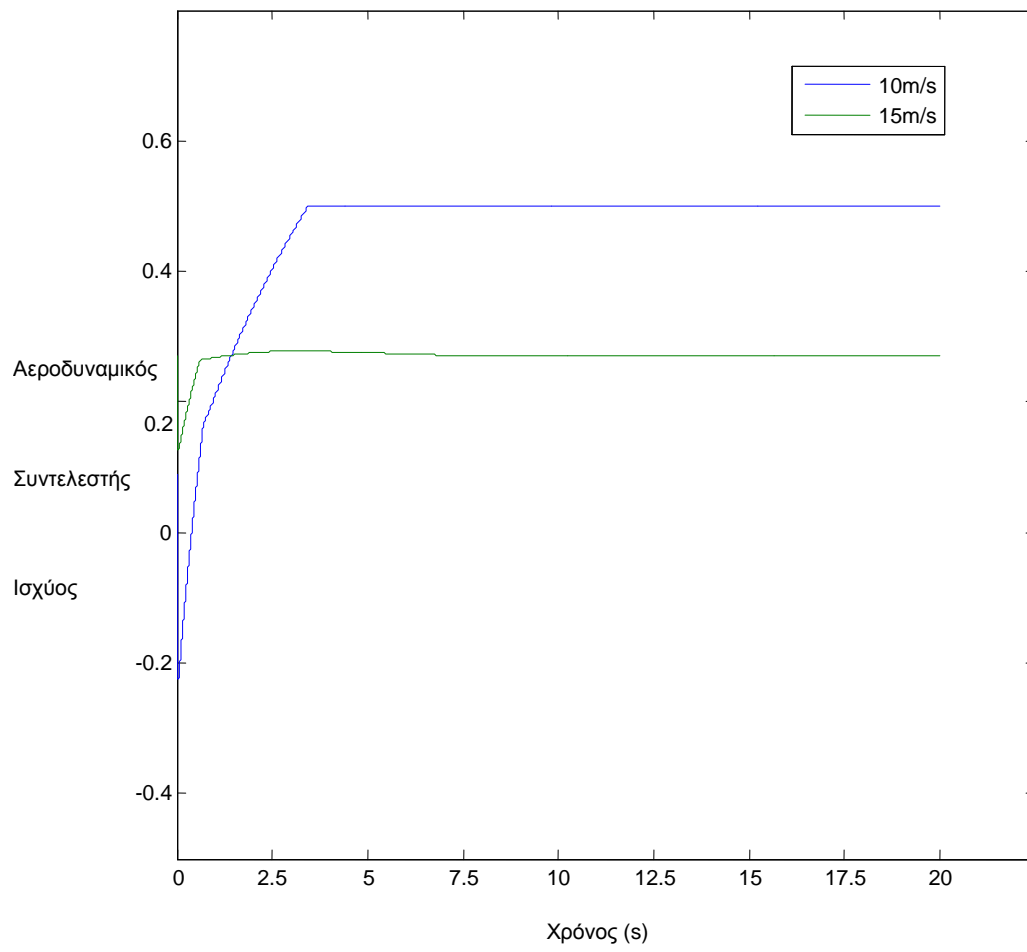
Στη συνέχεια απεικονίζεται η γωνία βήματος έλικας για ταχύτητες ανέμου 12m/s και 15m/s. Στα 12m/s η γωνία είναι ίση με μηδέν ενώ στα 15m/s παρατηρούμε την αύξηση της στις περίπου  $9^\circ$  ώστε η ισχύς να περιοριστεί στα ονομαστικά επίπεδα.



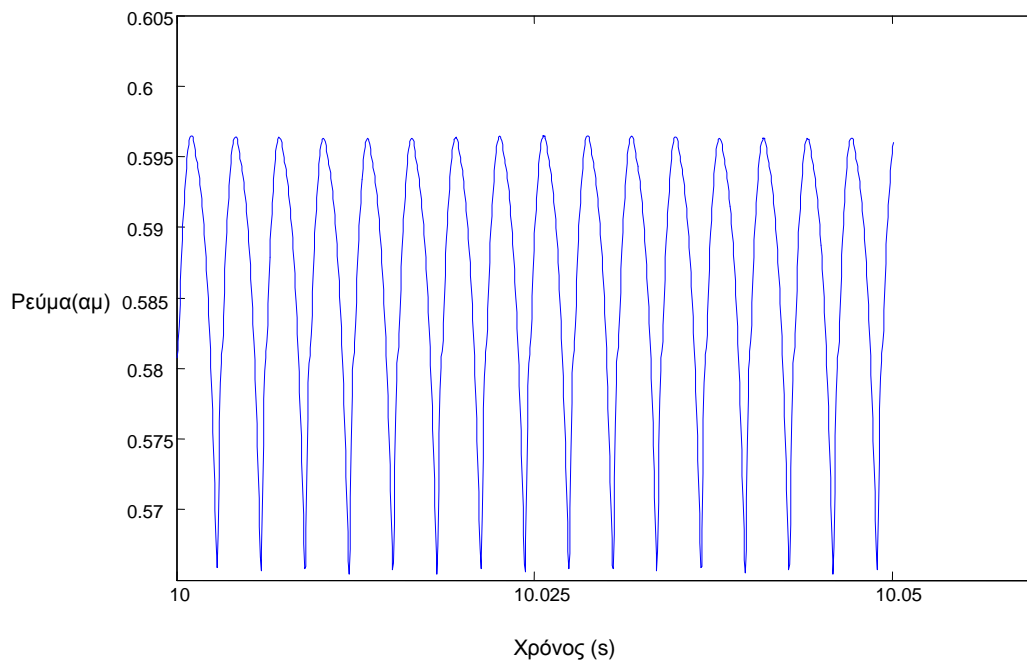


Σχήμα 4.1.10.Γωνία βήματος έλικας.

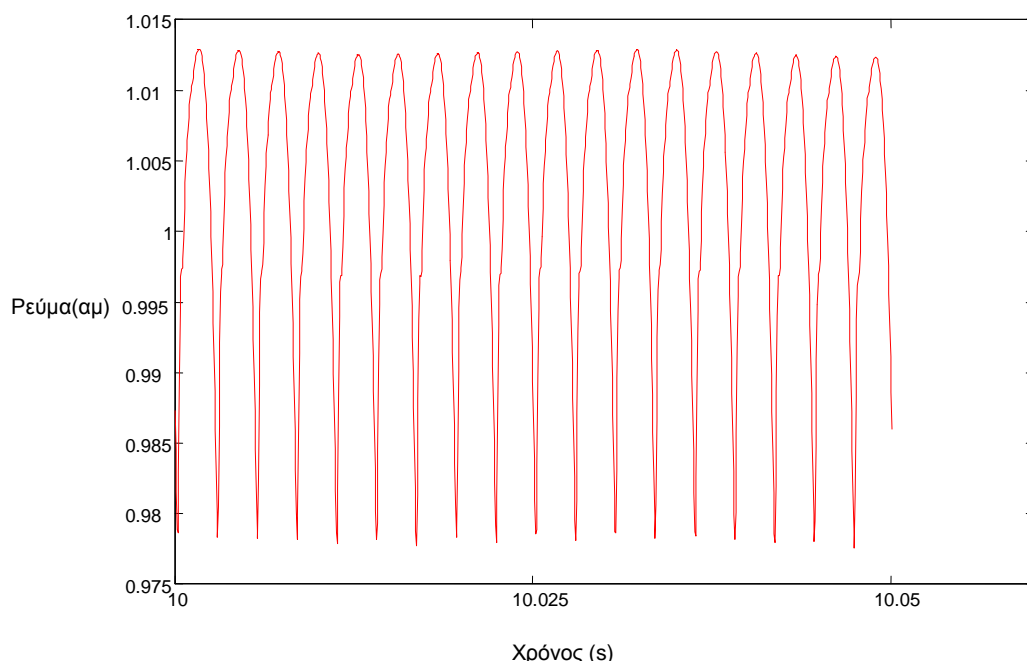
Στη συνέχεια, προς επιβεβαίωση του μοντέλου λαμβάνονται διάφορες ενδεικτικές μετρήσεις με σταθερή ταχύτητα ανέμου, αρχικά για 10m/s και έπειτα για 15m/s.



Σχήμα 4.1.11. Αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος.



Σχήμα 4.1.14.Στιγμιαίο ρεύμα που διαρρέει τον μετατροπέα ανύψωσης για ταχύτητα ανέμου 10m/s.

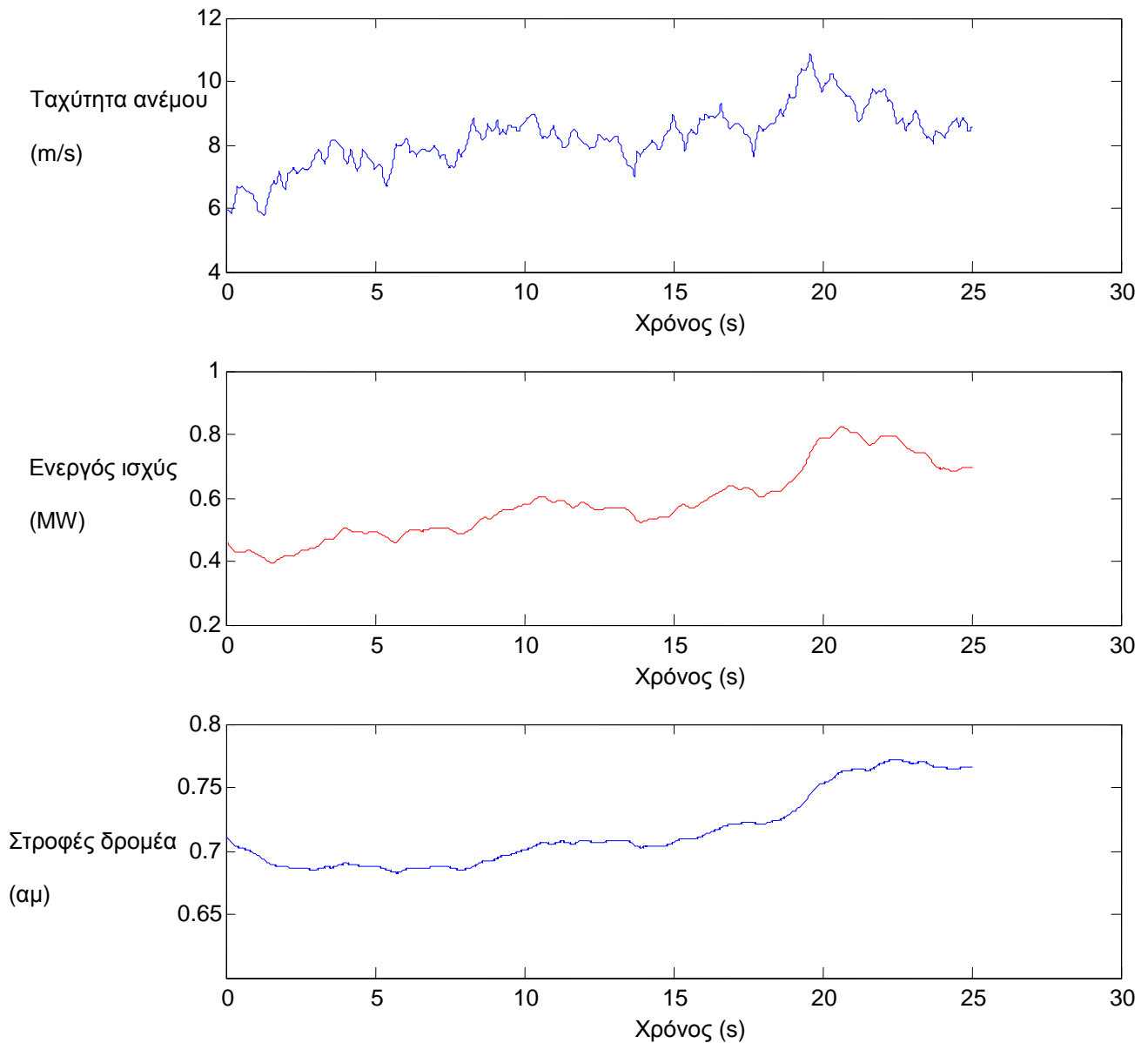


Σχήμα 4.1.15.Στιγμιαίο ρεύμα που διαρρέει τον μετατροπέα ανύψωσης για ταχύτητα ανέμου 15 m/s.

#### 4.2.Απόκριση της ανεμογεννήτριας σε μεταβλητή ταχύτητα ανέμου.

Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται η συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας σε μεταβλητή ταχύτητα ανέμου, κάτι που άλλωστε ανταποκρίνεται πολύ περισσότερο στην πραγματικότητα. Έτσι,

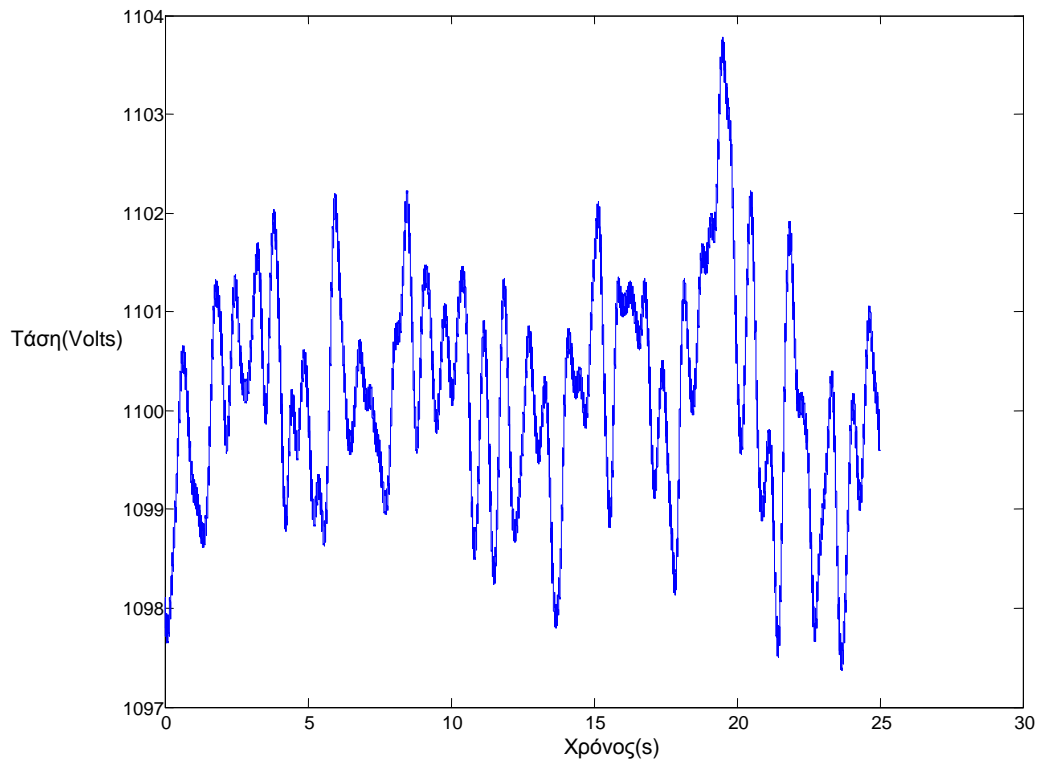
δίνεται μια χρονοσειρά ανέμου και εξάγονται ορισμένα αποτελέσματα μέσω του μοντέλου προσομοίωσης.



Σχήμα 4.2.1.Χρονοσειρά ανέμου, ισχύς εξόδου και γωνιακή ταχύτητα δρομέα.

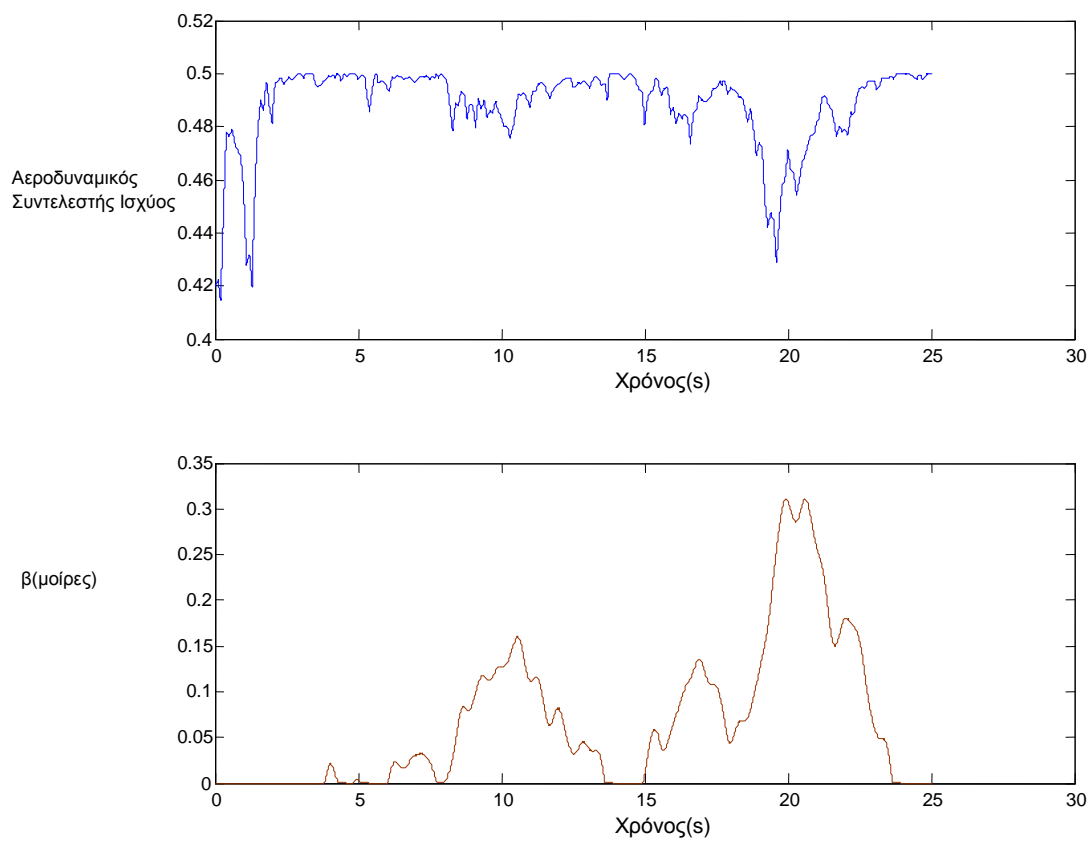
Παρατηρούμε στο παραπάνω σχήμα ότι τόσο η ισχύς εξόδου όσο και η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα βρίσκονται κάτω από την ονομαστική τους τιμή. Επομένως, ο ρυθμιστής φροντίζει ώστε να ακολουθείται η στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος κάτι που φαίνεται και από το γεγονός ότι ισχύς εξόδου και γωνιακή ταχύτητα του δρομέα ακολουθούν ουσιαστικά την καμπύλη της ταχύτητας του ανέμου. Η καμπύλη της ισχύος εξόδου δεν παρουσιάζει φυσικά τις αιχμές που έχει η χρονοσειρά ανέμου λόγω της αδράνειας των μηχανικών μερών. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η συνεχής τάση στην είσοδο του

αντιστροφέα. Παρατηρούμε τις μεταβολές τις γύρω από τα 1100V που εκφράζουν την επιτυχημένη προσπάθεια του ελεγκτή να την διατηρήσει σταθερή μετάγοντας ταυτόχρονα ενεργό ισχύ στο δίκτυο.



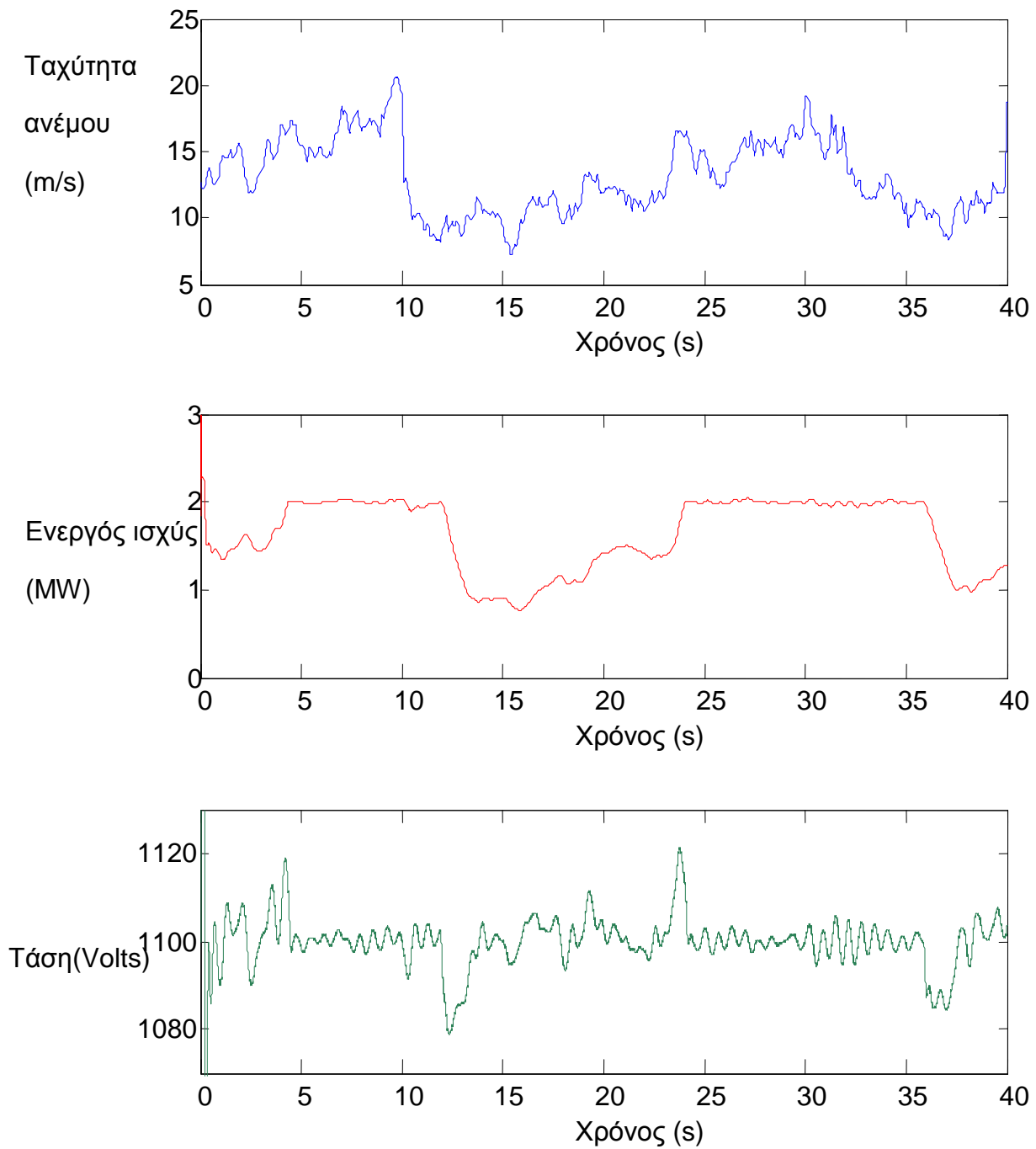
Σχήμα 4.2.2. Συνεχής τάση στην είσοδο του αντιστροφέα.

Θα ήταν επίσης χρήσιμο να δούμε την μεταβολή του αεροδυναμικού συντελεστή  $C_p$  σε συνδυασμό με την γωνία βήματος της έλικας. Παρατηρούμε λοιπόν στο σχήμα 4.2.3 ότι ο αεροδυναμικός συντελεστής λαμβάνει καθόλα σχεδόν τη διάρκεια της προσομοίωσης την μέγιστη του τιμή ( $C_p=0.5$ ) με εξαίρεση τις χρονικές στιγμές όπου έχουμε απότομη αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Σε αυτά τα διαστήματα λόγω της απότομης αύξησης της ταχύτητας του ανέμου, ο ρυθμιστής στροφών δεν προλαβαίνει να ρυθμίσει τις στροφές του δρομεά στην κατάλληλη τιμή, με αποτέλεσμα το  $\lambda$  να μην έχει την τιμή  $\lambda_{opt}$ . Επίσης, διακρίνουμε την ενεργοποίηση του pitch ρυθμιστή σε έναν μικρό βαθμό.



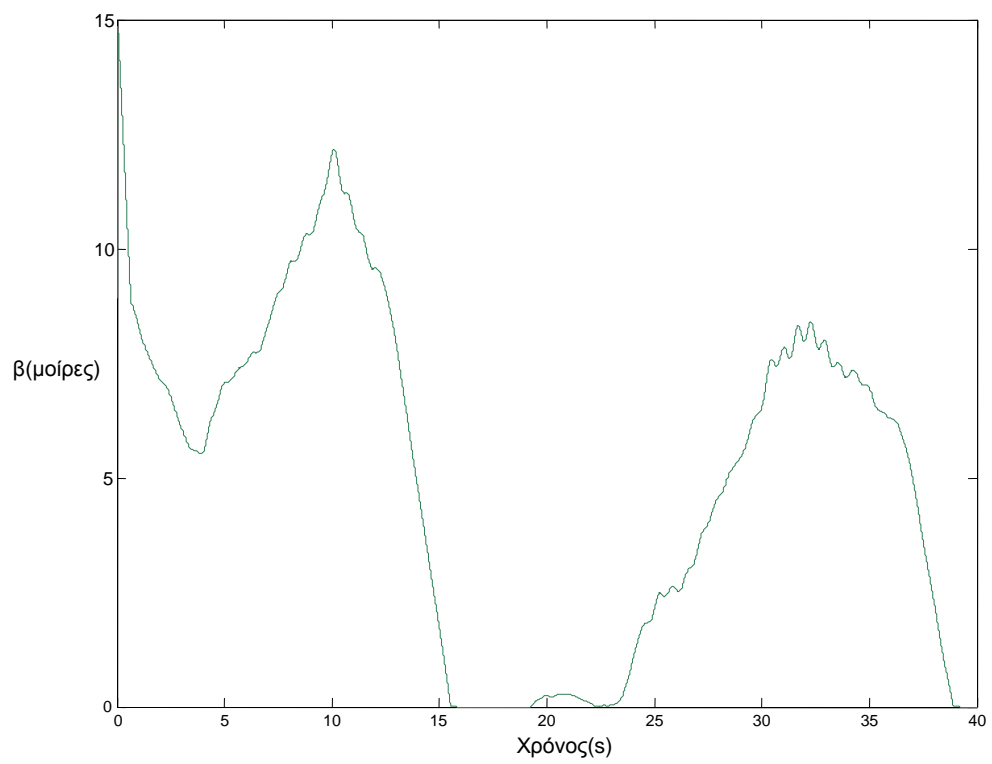
Σχήμα 4.2.3. Αεροδυναμικός συντελεστής και γωνία βήματος έλικας.

Στο σχήμα 4.2.4 μπορούμε να δούμε μια χρονοσειρά ανέμου όπου οι ταχύτητα του ανέμου κυμαίνεται σε υψηλότερα επίπεδα από την προηγούμενη προσομοίωση. Σε αυτήν την περίπτωση παρατηρούμε ότι η ισχύς παραμένει σε υψηλά επίπεδα μέχρι και την ονομαστική της τιμή.



Σχήμα 4.2.4.Χρονοσειρά ανέμου , ισχύς εξόδου και συνεχής τάση στην είσοδο του αντιστροφέα.

Επίσης, είναι προφανές ότι προκειμένου να διατηρηθούν η ισχύς και η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα σε ονομαστικά επίπεδα σε ταχύτητες ανέμου πέρα της ονομαστικής λειτουργήσει ο ρυθμιστής pitch. Η γωνία βήματος έλικας συναρτήσει του χρόνου παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.2.5.Γωνία βήματος έλικας β.

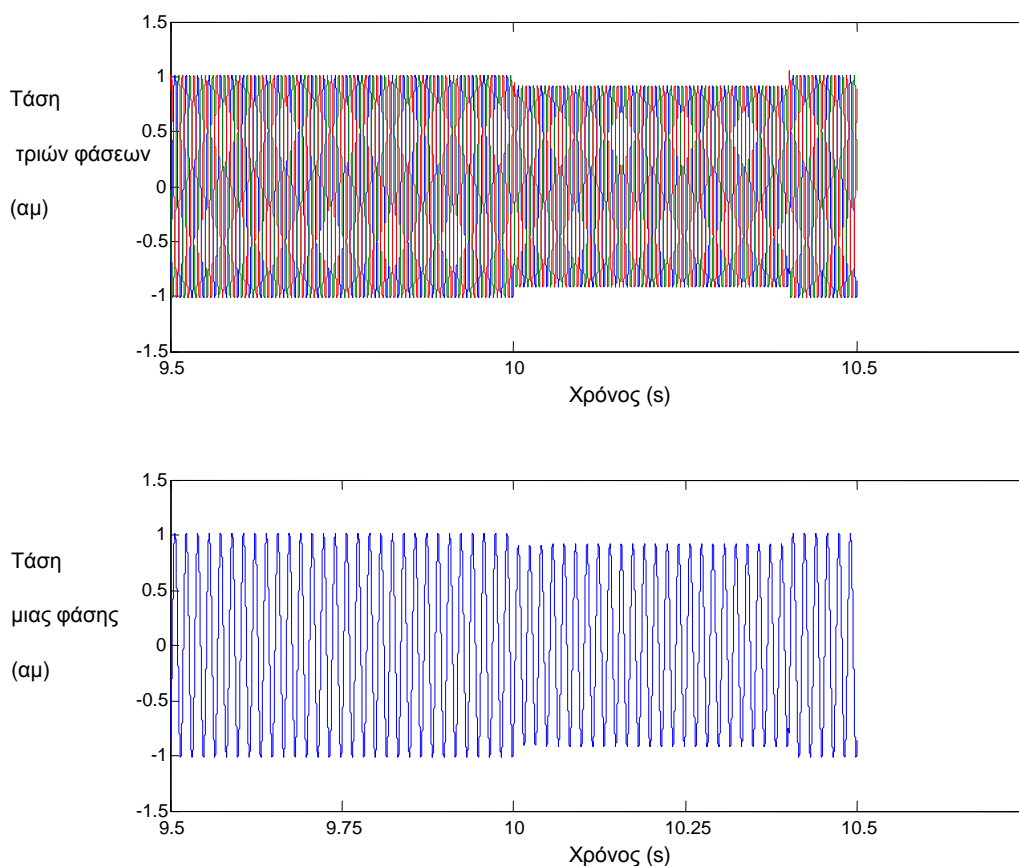


## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### 5.Απόκριση του μοντέλου προσομοίωσης σε διαταραχές της τάσης του δικτύου.

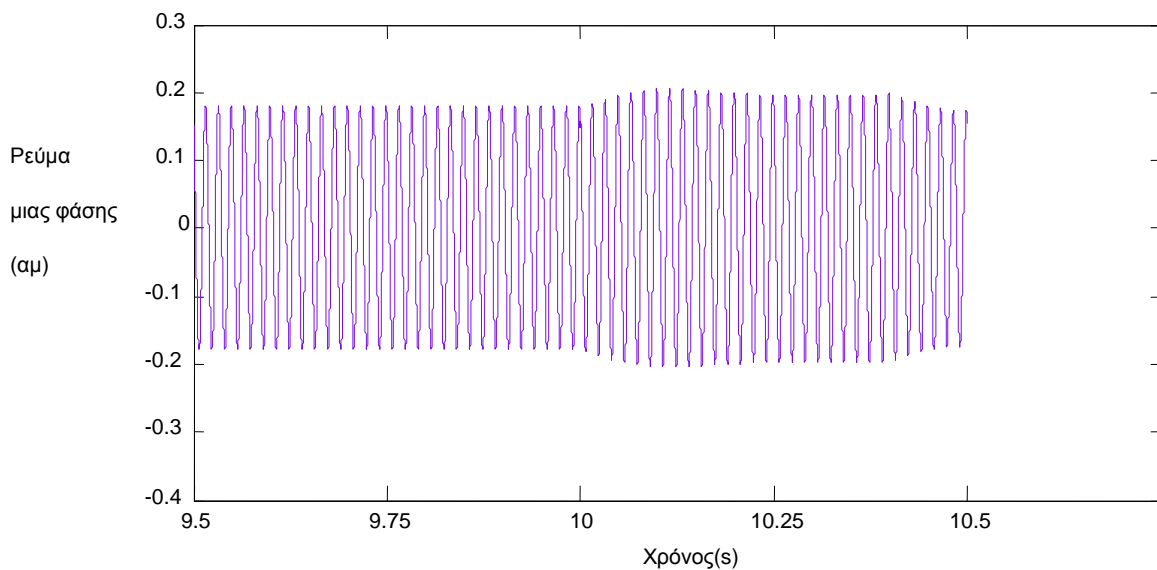
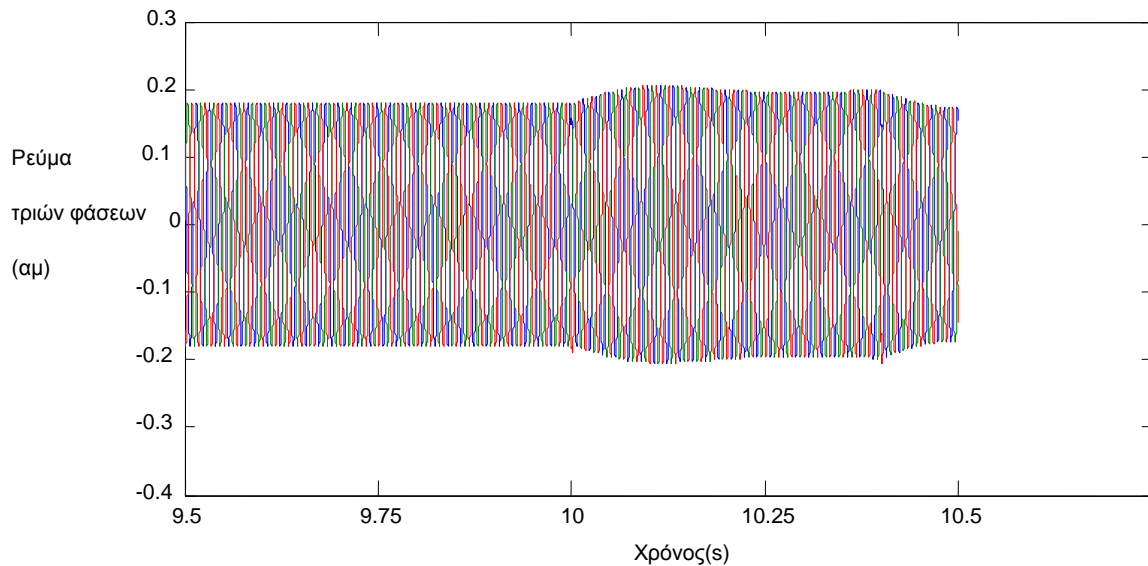
Στη συνέχεια, γίνανε προσομοιώσεις με σκοπό να μελετηθεί η απόκριση του συστήματος για κάποια βύθιση τάσης του δικτύου. Αρχικά, λήφθηκαν μετρήσεις για βύθιση της τάσης του δικτύου στο 90% της ονομαστικής της τιμής για 0,4 s (από 10 έως 10,4 s – η προσομοίωση διαρκεί 20 s) και ύστερα για βύθιση στο 50 % της ονομαστικής τιμής για το ίδιο χρονικό διάστημα. Οι μετρήσεις αυτές λήφθηκαν σύμφωνα με τα πρότυπα δοκιμών πιστοποίησης της συμβατότητας των ανεμογεννητριών. Η ταχύτητα του ανέμου παραμένει σταθερή στα 15m/s. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω:

#### 5.1.Βύθιση στο 90% της ονομαστικής τιμής.



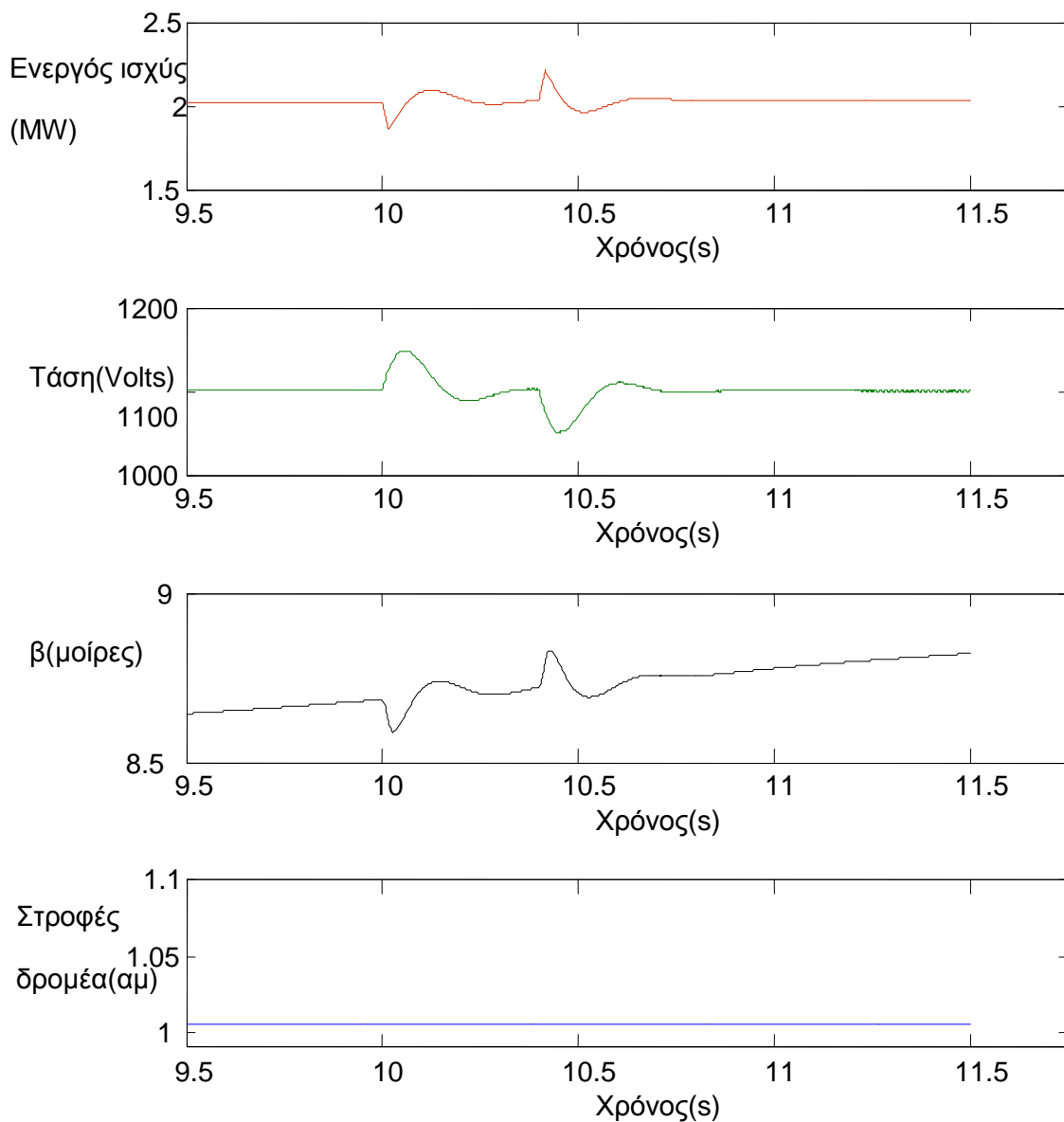
Σχήμα 5.1.1: Τάση δικτύου (τρεις φάσεις) και τάση δικτύου (μία φάση).

Βλέπουμε λοιπόν ότι πραγματοποιείται μια βύθιση της τάσης για 0.4 δευτερόλεπτα, η οποία ξεκινάει στα 10s. Το ρεύμα μετά το φίλτρο του αντιστροφέα έχει την ακόλουθη μορφή.



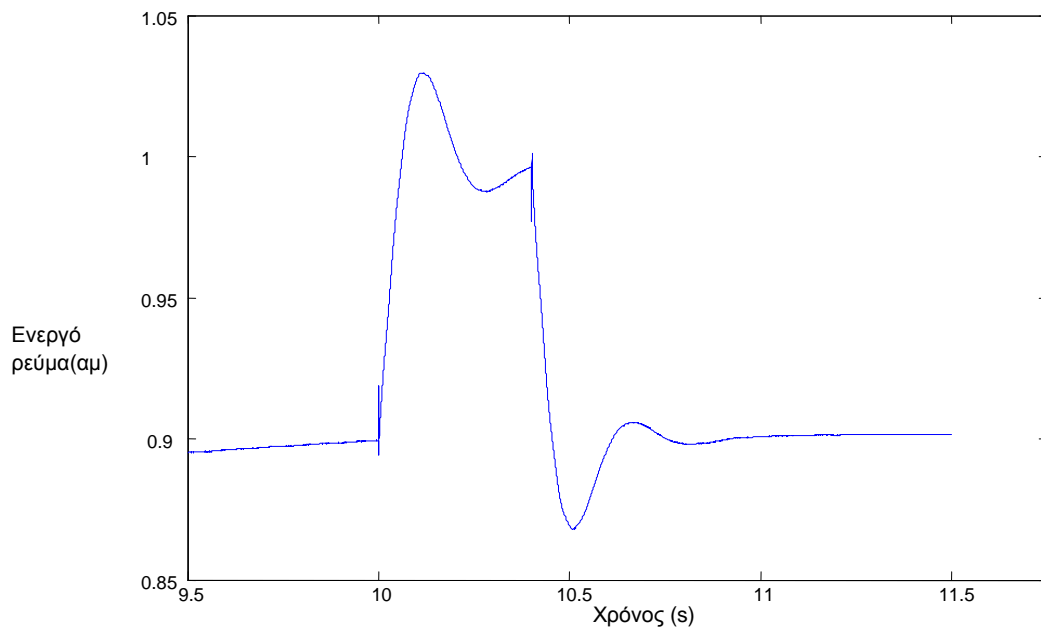
Σχήμα 5.1.2: Ρεύμα στην έξοδο του φίλτρου του αντιστροφέα (τρεις φάσεις) και ρεύμα στην έξοδο του φίλτρου του αντιστροφέα (μία φάση).

Αξίζει να αναφέρουμε εδώ ότι κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων που αφορούν στη βύθιση τάσης η άεργος ισχύς αναφοράς είναι 0 MVar, δηλαδή η ανεμογεννήτρια λειτουργεί με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Στα παρακάτω διαγράμματα παρατηρούμε πως η βύθιση της τάσης επηρεάζει τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 5.1.3. Ισχύς εξόδου A/Γ – DC τάση στην είσοδο του αντιστροφέα-Γωνία βήματος έλικας – Γωνιακή ταχύτητα δρομέα.

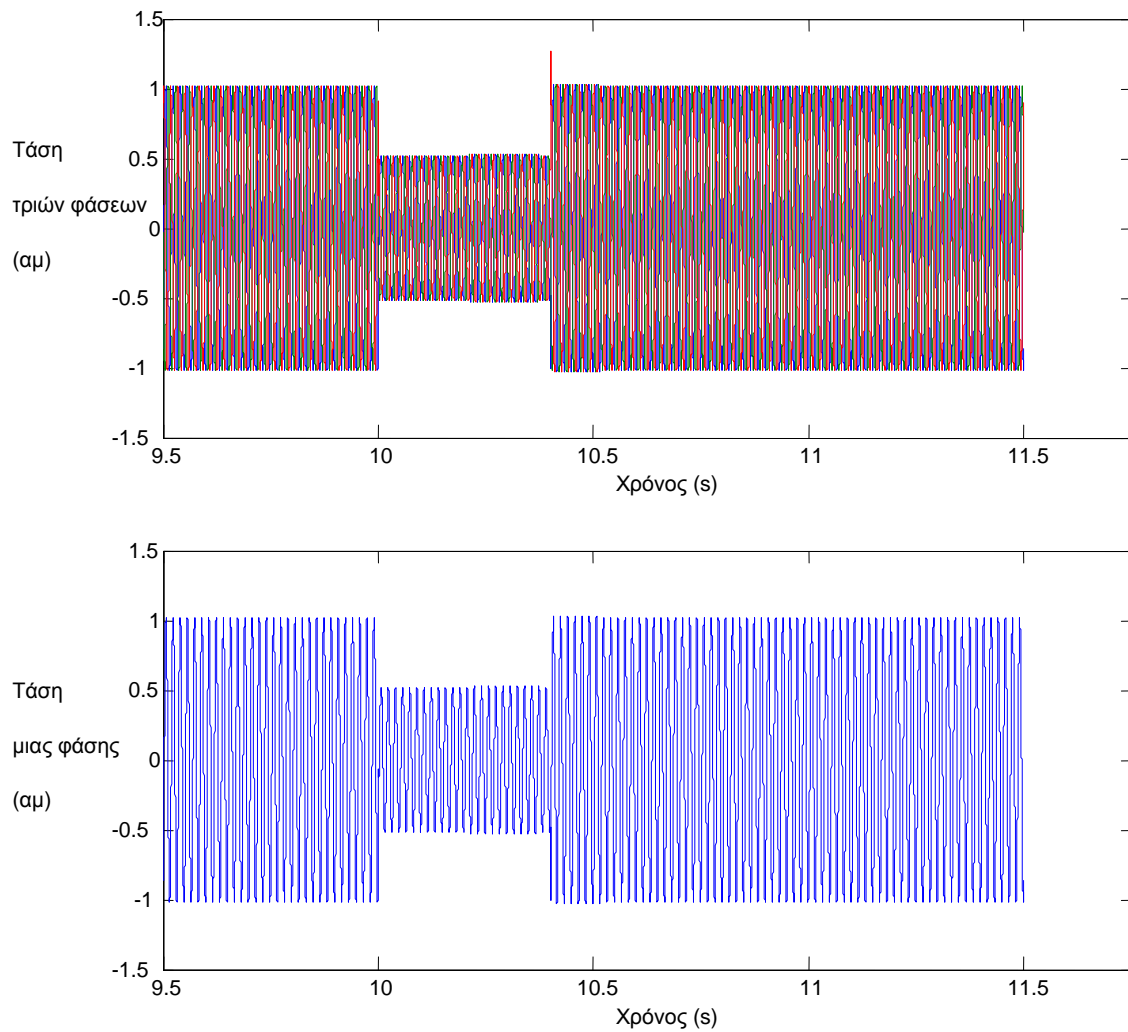
Ο λόγος που τα παραπάνω μεγέθη επηρεάζονται στη βύθιση τάσης, κάτι που θα φανεί ακόμα περισσότερο για μεγαλύτερη βύθιση τάσης, είναι ότι η μείωση της τάσης οδηγεί στην αύξηση του ρεύματος έτσι ώστε η ισχύς να παραμείνει στην ονομαστική της τιμή. Το ρεύμα δεν γίνεται, ωστόσο, να αυξηθεί ακαριαία κάτι που οδηγεί σε αναπόφευκτη μείωση της ισχύος εξόδου. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η ανεμογεννήτρια παράγει έτσι κάποια περίσσεια ισχύος αντιλαμβανόμεστε την αύξηση της συνεχούς τάσης στην είσοδο του αντιστροφέα. Ο ρυθμιστής της τάσης αυτής προσπαθεί να την διατηρήσει σταθερή στην τιμή των 1100V αυξάνοντας το ρεύμα που παρέχει.



Σχήμα 5.1.4.d συνιστώσα του ρεύματος.

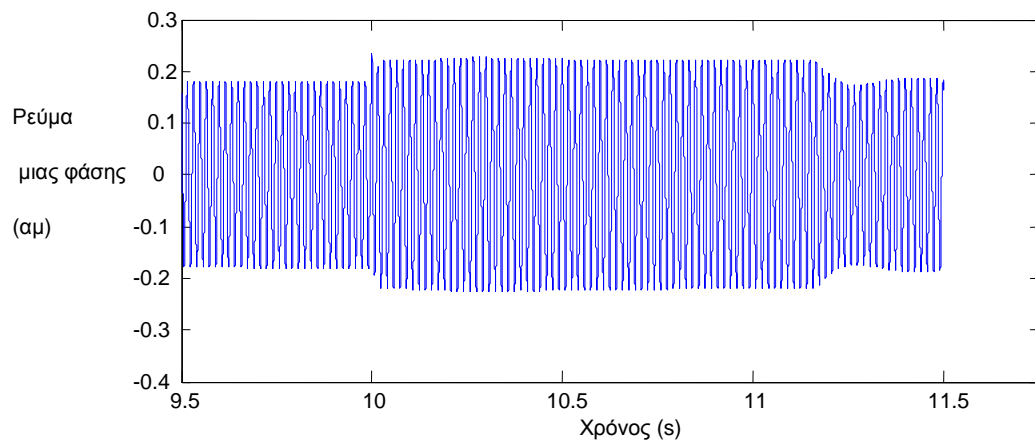
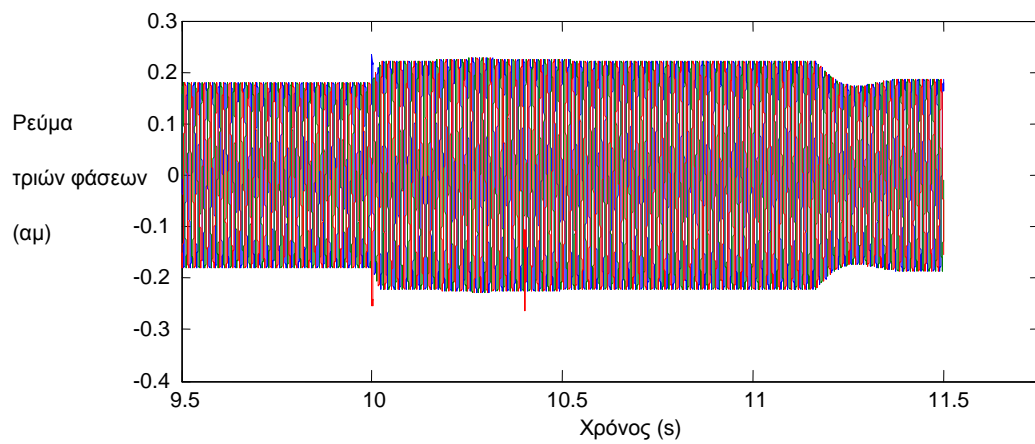
Αντίθετα αποτελέσματα έχουμε προφανώς όταν η βύθιση παύει και η τάση επανέρχεται στην ονομαστική της τιμή. Τα φαινόμενα αυτά μπορούν να παρατηρηθούν καλύτερα για μεγαλύτερη βύθιση της τάσης.

## 5.2. Βύθιση στο 50% της ονομαστικής τιμής.



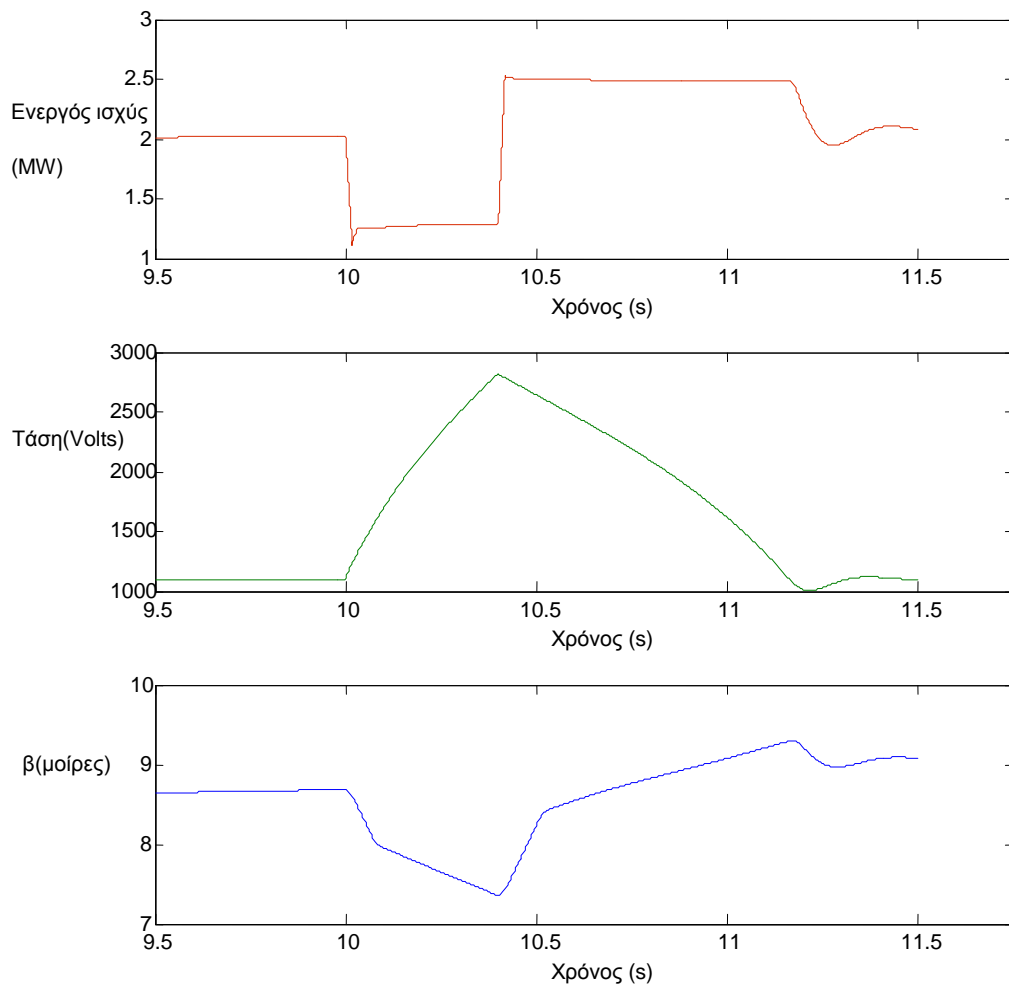
Σχήμα 5,2.1: Τάση δικτύου (τρεις φάσεις) και τάση δικτύου (μία φάση).

Σε αυτή την περίπτωση λοιπόν η βύθιση είναι σαφώς μεγαλύτερη, διατηρείται όμως στα προηγούμενα χρονικά όρια, δηλαδή ξεκινά στα 10 s κι έχει διάρκεια 0.4 s. Το ρεύμα μετά το φίλτρο του αντιστροφέα φαίνεται στο επόμενο διάγραμμα.



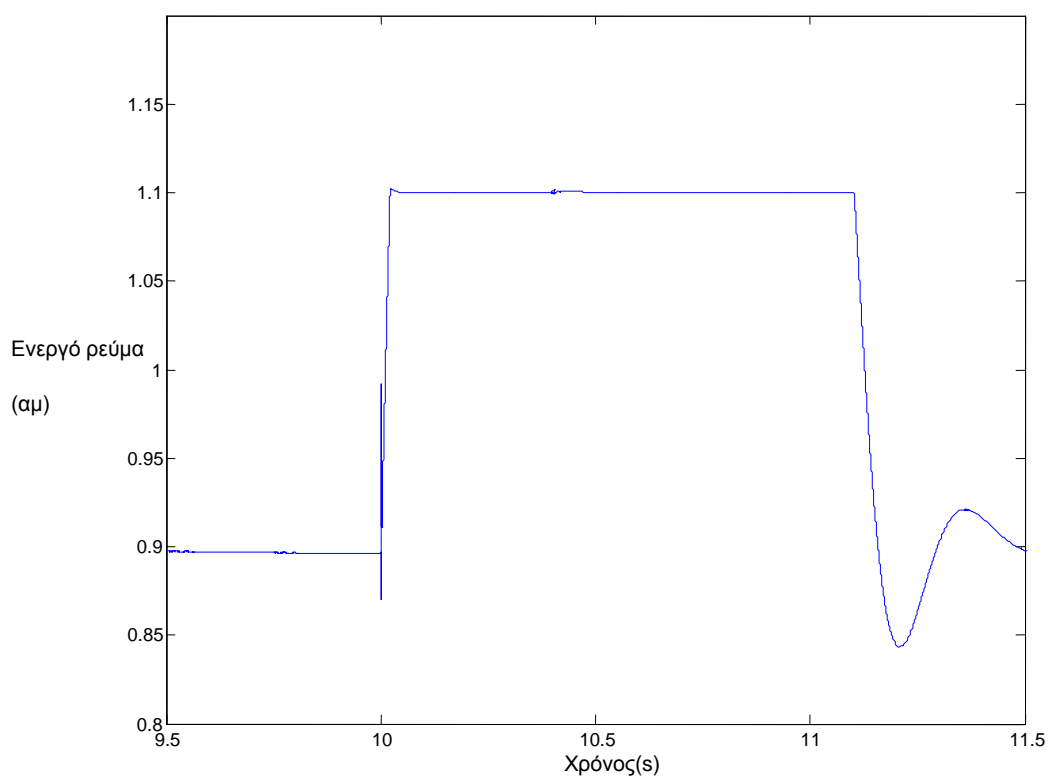
Σχήμα 5.2.2: Ρεύμα στην έξοδο του φίλτρου του αντιστροφέα (τρεις φάσεις) και ρεύμα στην έξοδο του φίλτρου του αντιστροφέα (μία φάση).

Παρακάτω μπορούμε να διακρίνουμε την πολύ μεγαλύτερη επίδραση που έχει στη λειτουργία της ανεμογεννήτριας η βύθιση της τάσης στα 0,5pu.



Σχήμα 5.2.3. Ισχύς εξόδου Α/Γ – DC τάση στην είσοδο του αντιστροφέα – Γωνία βήματος έλικας.

Βλέπουμε λοιπόν ότι κατά τη διάρκεια της βύθισης η τιμή της ισχύος εξόδου δεν σημειώνει στιγμιαία πτώση αλλά παραμένει σε χαμηλά επίπεδα καθ' όλη τη διάρκεια της βύθισης – συγκεκριμένα στα 1.28 MW. Αυτό είναι συνέπεια του ότι το ρεύμα δεν δύναται να ξεπεράσει τα 1,1pu – ονομαστικό ρεύμα του αντιστροφέα.



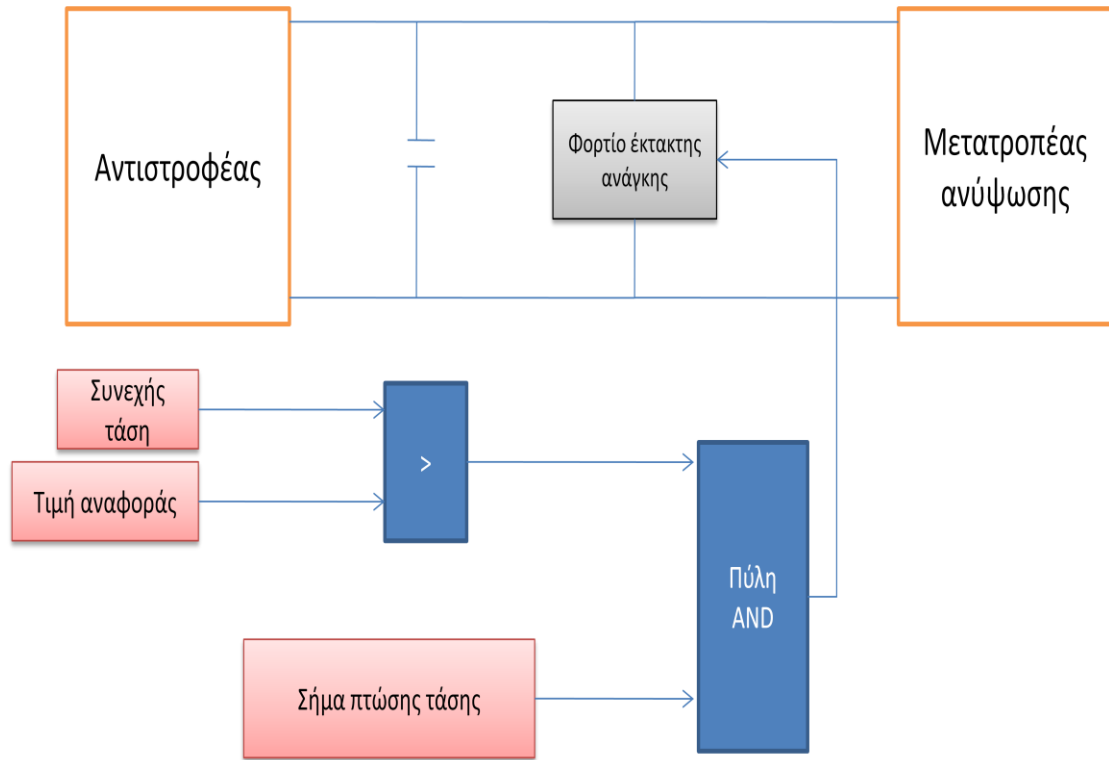
Σχήμα 5.2.4.d συνιστώσα του ρεύματος.

Επομένως, αφού όπως φαίνεται το ρεύμα έχει φτάσει στο μέγιστο όριο του δεν μπορεί να γίνει μεταγωγή της παραγόμενης ενεργού ισχύος στο δίκτυο με αποτέλεσμα η τιμή της συνεχούς τάσης πριν τον αντιστροφέα να αυξάνεται συνεχώς, μέχρι η τάση δικτύου να επανέλθει στην ονομαστική της τιμή. Αφού αποκατασταθεί η τιμή της τάσης το ρεύμα εξακολουθεί να έχει την μέγιστη δυνατή τιμή, η ισχύς αυξάνεται και φτάνει τα 2.5MW μέχρι να απελευθερωθεί η περίσσεια ενέργειας. Τέλος, και η dc τάση επανέρχεται στα 1100V.

Με τις παρούσες συνθήκες προφανώς η καταλληλότητα του συστήματος ελέγχου τίθεται υπό αμφισβήτηση, από τη στιγμή που η συνεχής τάση είναι στην ουσία μη ελεγχόμενη κατά τη διάρκεια της διαταραχής, παρασύροντας στη συνέχεια και τη διαχεόμενη ισχύ. Η προφανής, αλλά και ακριβή λύση, είναι η αύξηση της ονομαστικής ισχύος του αντιστροφέα, έτσι ώστε η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του ρεύματος να είναι μεγαλύτερη των 1,1pu και να είναι δυνατή η μεταγωγή των 2MW στο δίκτυο. Μια πιο οικονομική λύση είναι η προσθήκη στην dc πλευρά του αντιστροφέα ενός φορτίου έκτακτης ανάγκης (dumpload). Το dumpload είναι στην ουσία ένα ωμικό φορτίο σε σειρά με ένα ημιαγωγικό στοιχείο (εδώ IGBT) και τοποθετείται παράλληλα στον πυκνωτή πριν τον αντιστροφέα. Το σύστημα αυτό ενεργοποιείται σε περίπτωση πτώσης τάσης του δικτύου και είναι υπεύθυνο για τη διατήρηση της συνεχούς τάσης στα 1100V. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της διαταραχής και εφόσον η d συνιστώσα του ρεύματος φτάσει στην μέγιστη τιμή της ώστε να μην μπορεί να διοχετευθεί όλο το ποσό της παραγόμενης ενεργού ισχύος στο δίκτυο, το IGBT άγει και

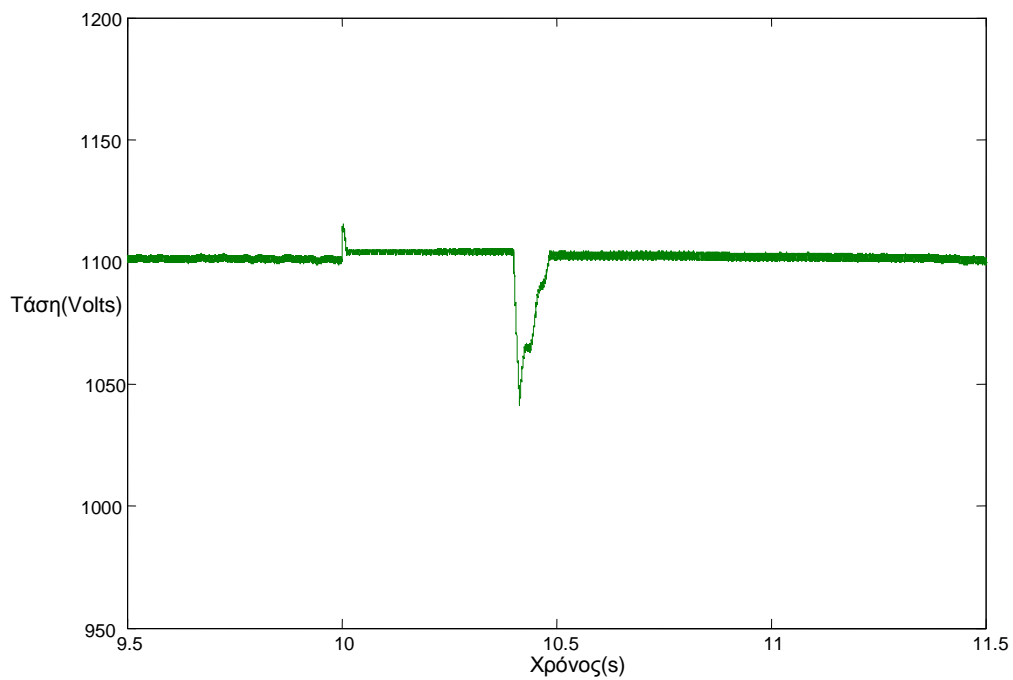


το ωμικό φορτίο καταναλώνει την περίσσεια ενέργειας μην επιτρέποντας έτσι την ανεξέλεγκτη αύξηση της dc τάσης πριν τον αντιστροφέα. Επίσης, μετά το πέρας της διαταραχής η ισχύς επανέρχεται στην ονομαστική της τιμή χωρίς να την ξεπεράσει. Έτσι, το σύστημα προστατεύεται και μπορεί να επανέλθει άμεσα σε ομαλή λειτουργία.



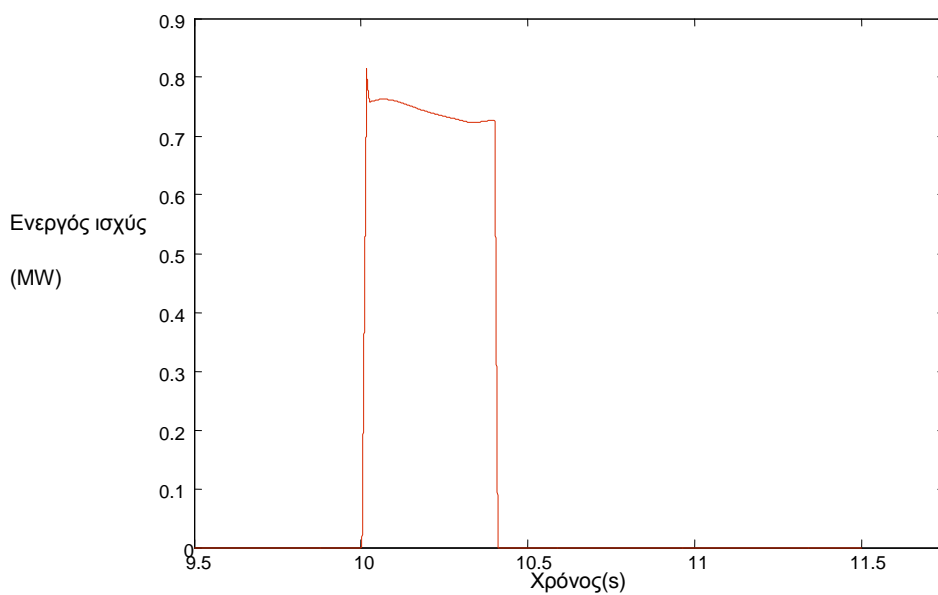
Σχήμα 5.2.5.Θέση του φορτίου έκτακτης ανάγκης(dumpload) στο σύστημα ελέγχου.

Για την ίδια διαταραχή, λοιπόν, το διάγραμμα της συνεχούς τάσης πριν τον αντιστροφέα φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 5.2.6.Συνεχής τάση στην είσοδο του αντιστροφέα.

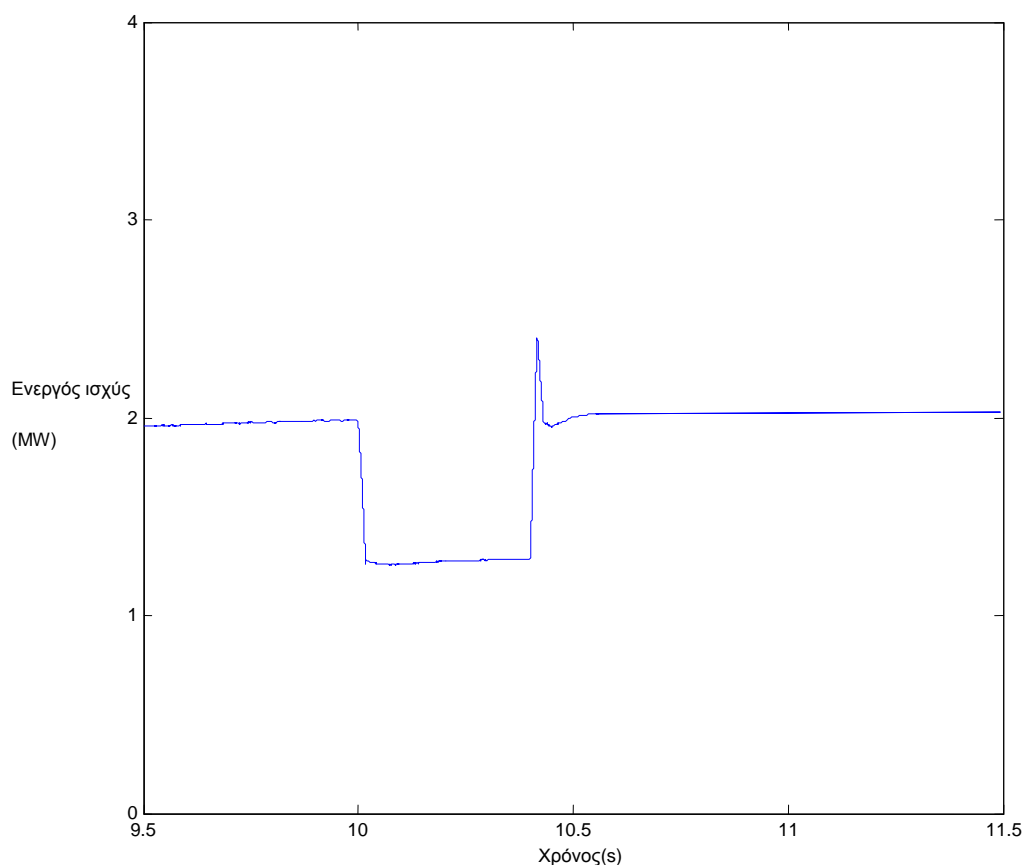
Βλέπουμε ότι η τάση διατηρείται σταθερή, παρά τη διαταραχή, στα 1100 V επιβεβαιώνοντας έτσι την ορθή λειτουργία του φορτίου έκτακτης ανάγκης. Παρατηρείται πτώση της τάσης στο τέλος της διαταραχής, λόγω της αύξησης της ενεργού ισχύος που μπορεί πλέον να εγχυθεί στο δίκτυο. Η ισχύς αυτή καταναλωνόταν στο φορτίο έκτακτης ανάγκης.



5.2.7.Ισχύς που καταναλώνεται στο φορτίο έκτακτης ανάγκης.

Σχήμα

Τέλος, στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο. Παρατηρούμε ότι μετά το τέλος της διαταραχής η ισχύς ξεπερνά την ονομαστική της τιμή για ένα μικρό χρονικό διάστημα λόγω ταχείας μεταβολής της αποδιδόμενης στο δίκτυο ενεργού ισχύος, αλλά επανέρχεται σε αυτήν. Έτσι το σύστημα μας με τη χρησιμοποίηση του φορτίου έκτακτης ανάγκης εξασφαλίζει τη σταθερότητα της συνεχούς τάσης στην είσοδο του αντιστροφέα και την άμεση επαναφορά του σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας.



Σχήμα 5.2.8. Ισχύς που παρέχεται στο δίκτυο.

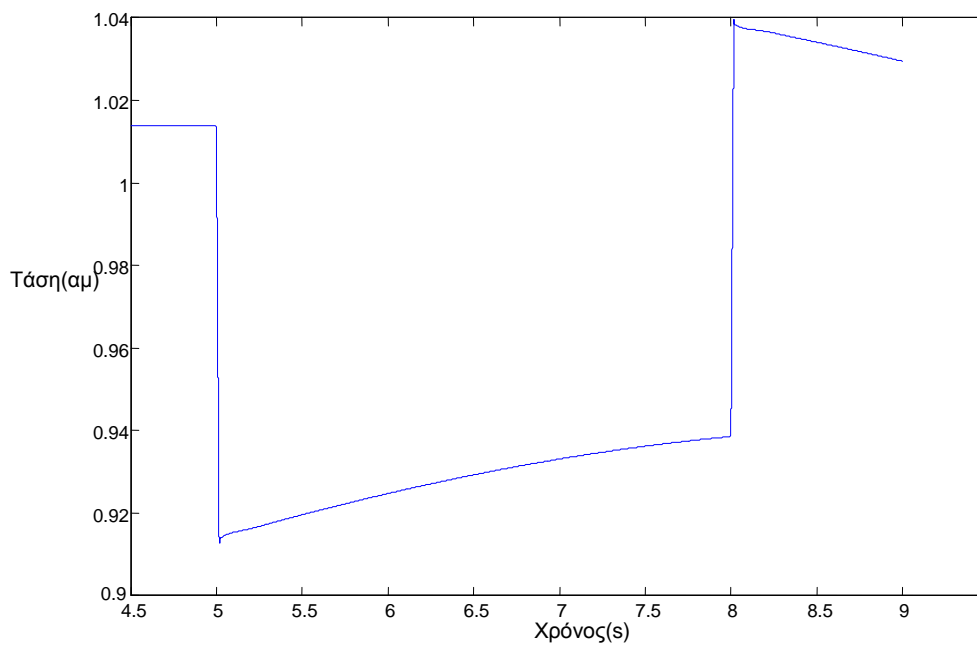
### 5.3. Παροχή άεργου ισχύος σε βύθιση τάσης.

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, κατά τη διάρκεια βύθισης τάσεως είναι απαραίτητη η υποστήριξη του δικτύου μέσω της παροχής άεργου ισχύος από την ανεμογεννήτρια. Έτσι, το σύστημα μας θα πρέπει να αναγνωρίζει μια βύθιση τάσης και να παρέχει άμεσα άεργο ισχύ στο δίκτυο.

### 5.3.1. Βύθιση στο 90% της ονομαστικής τιμής.

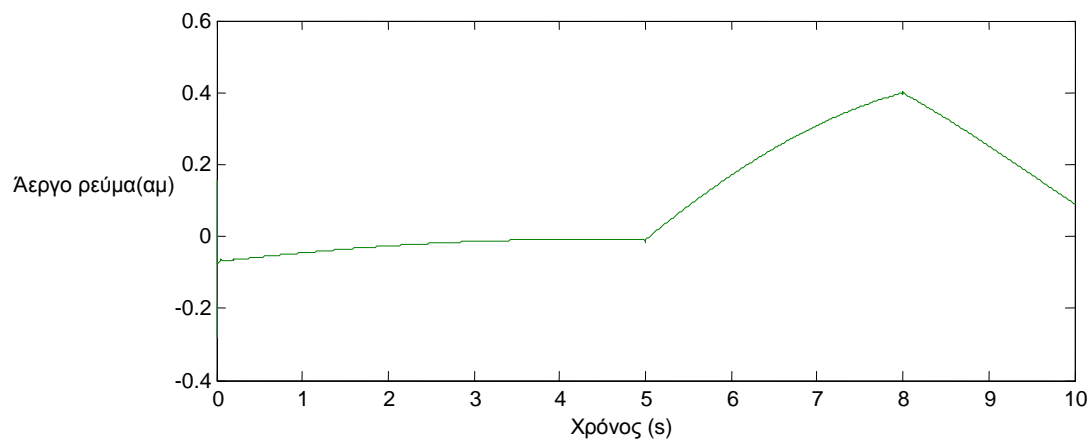
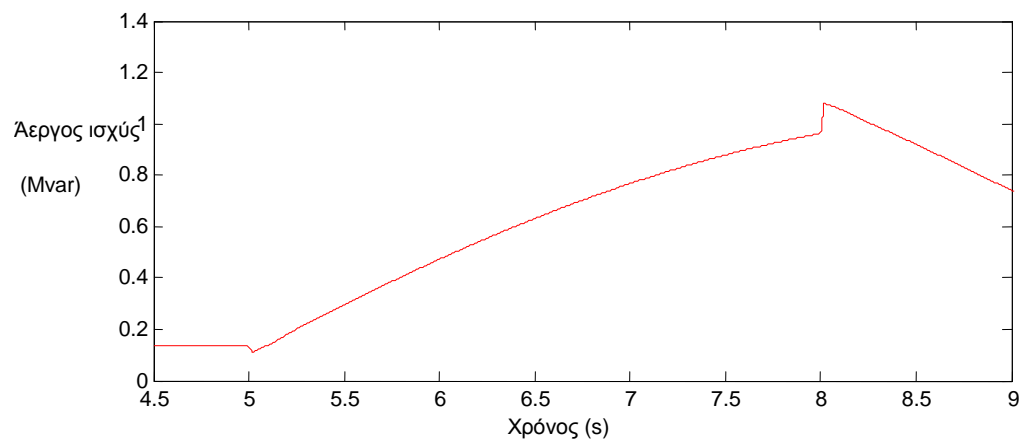
Αρχικά, λαμβάνονται αποτελέσματα για βύθιση τάσης στο 90% της ονομαστικής τιμής διάρκειας τριών δευτερολέπτων.

Η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης με το δίκτυο υποστηρίζεται μέσω της παροχής άεργου ισχύος όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα. Παρατηρούμε ότι η τάση δεν πέφτει μέχρι τα 0.9 pu, ενώ στο τέλος της διαταραχής λόγω της υποστήριξης από την ανεμογεννήτρια έχει αυξηθεί στα 0.94 pu.



#### 5.3.1.1. Τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης με το δίκτυο.

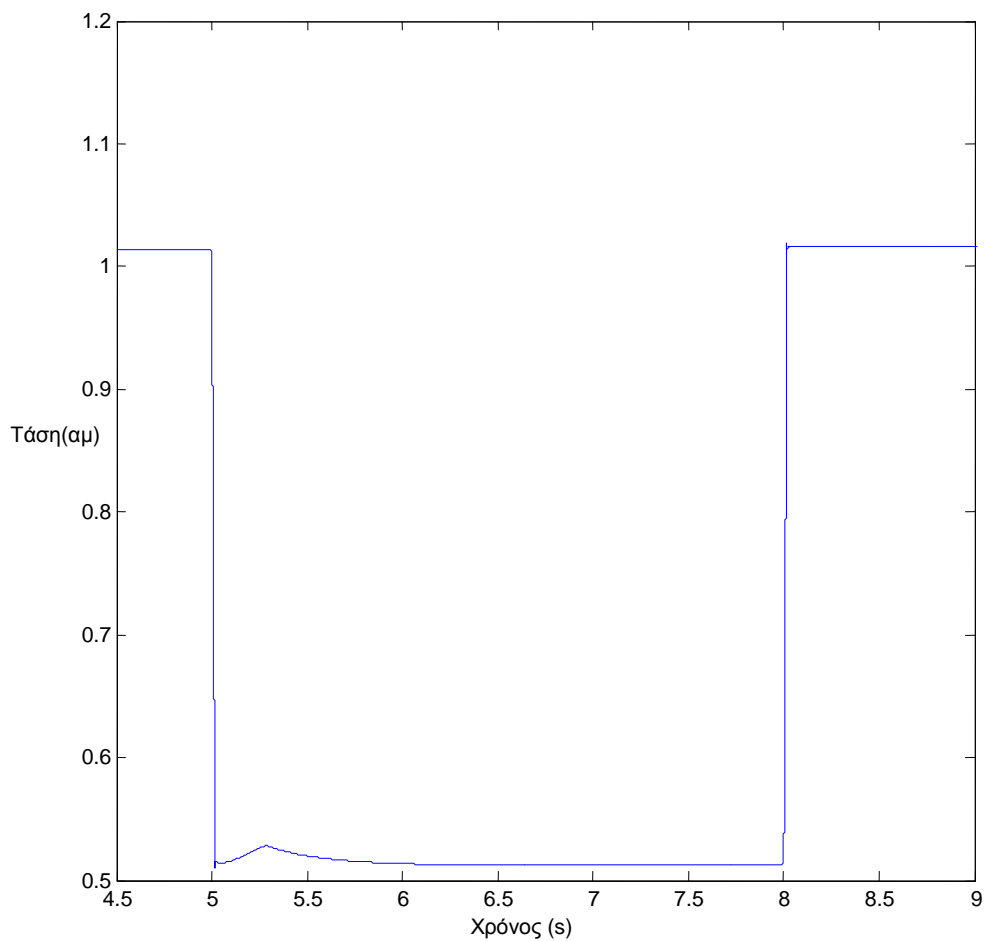
Στο σχήμα 5.3.1.3 είναι φανερό η αύξηση της άεργου ισχύος και της  $q$  συνιστώσας του ρεύματος κατά τη διάρκεια της διαταραχής.



5.3.1.2. Άεργος ισχύς και  $q$  συνιστώσα του ρεύματος.

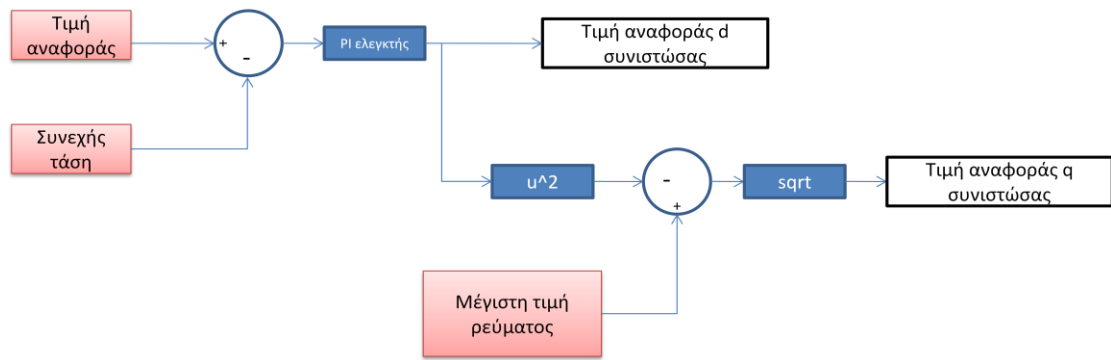
### 5.3.2. Βύθιση στο 50% της ονομαστικής τιμής.

Αντίστοιχα, στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης με το δίκτυο για βύθιση τάσης στο 50% της ονομαστικής τιμής διάρκειας τριών δευτερολέπτων.

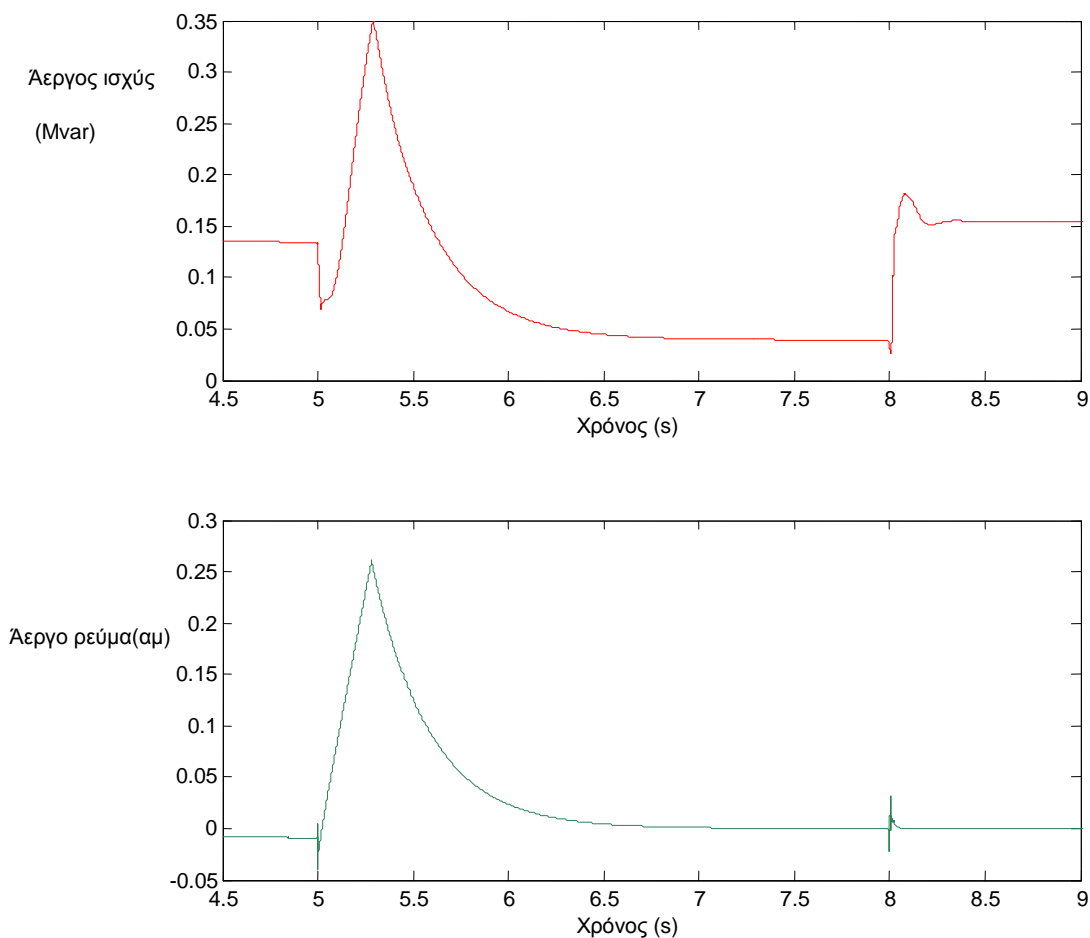


Σχήμα 5.3.2.1. Τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης με το δίκτυο.

Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει ουσιαστική υποστήριξη της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης για τη συγκεκριμένη διαταραχή. Το πρόβλημα αυτό είναι απόρροια της αύξησης της  $d$  συνιστώσας του ρεύματος του αντιστροφέα κατά τη διάρκεια της διαταραχής. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, με την πτώση της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης έχουμε αύξηση της  $d$  συνιστώσας του ρεύματος προκειμένου να συνεχίσει να παρέχεται στο δίκτυο η ενεργός ισχύς που παράγει η ανεμογεννήτρια. Ωστόσο, με την αύξηση της  $d$  συνιστώσας στο 1,1 pu, σύμφωνα με τον περιορισμό της τιμής του ρεύματος του αντιστροφέα, η  $q$  συνιστώσα αναγκάζεται να παραμείνει στο μηδέν. Έτσι, παρ' ότι ενεργοποιείται το σύστημα ελέγχου για παροχή άεργου ισχύος, η εντολή του συγκρούεται με τον περιορισμό αυτό.



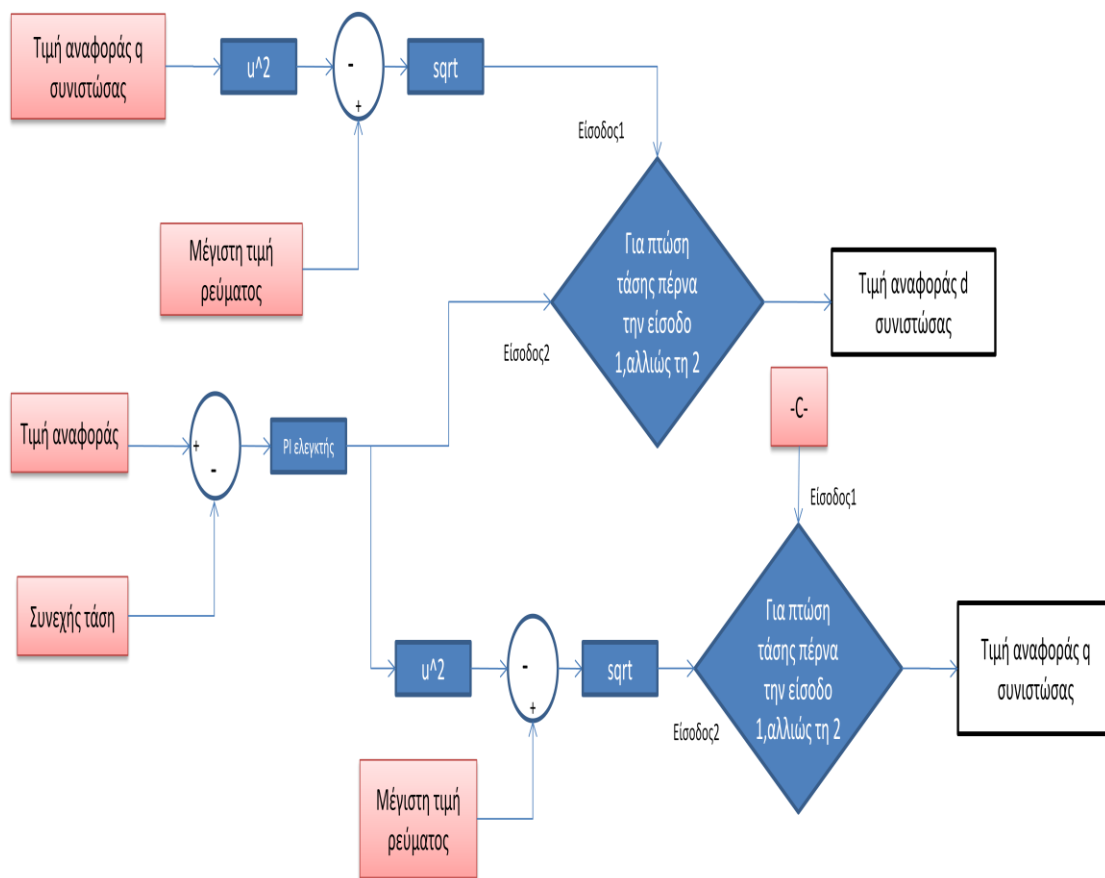
Σχήμα 5.3.2.2.Περιορισμός τιμής αναφοράς q συνιστώσας.



Σχήμα 5.3.2.3.Άεργος ισχύς και q συνιστώσα του ρεύματος.

Βλέπουμε ότι στα 5 δευτερόλεπτα υπάρχει απότομη αύξηση της q συνιστώσας του ρεύματος, την οποία ακολουθεί η άεργος ισχύς, η οποία όμως δεν διατηρεί την αυξημένη τιμή της αλλά επανέρχεται στο μηδέν. Το πρόβλημα αυτό δεν παρουσιαζόταν για πτώση της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης στο 0.9 της ονομαστικής της τιμής, καθώς η μείωση της τάσης ήταν μικρή και η d συνιστώσα του ρεύματος δεν αυξανόταν τόσο ώστε να εμποδίζεται η παραγωγή άεργου ισχύος.

Για να είναι δυνατή η παραγωγή άεργου ισχύος κατά τη διάρκεια μιας τέτοιας μεγάλης διαταραχής καθίσταται απαραίτητη η τροποποίηση του συστήματος ελέγχου της τιμής αναφοράς της  $d$  και  $q$  συνιστώσας του ρεύματος. Αν αντιστρέψουμε τον έλεγχο σε περίπτωση διαταραχής περιορίζοντας την τιμή της  $d$  συνιστώσας και αφήνοντας μη ελεγχόμενη την  $q$  συνιστώσα θα έχουμε τα ακριβώς αντίθετα αποτελέσματα. Μπορεί να παράγεται άεργος ισχύς, ωστόσο περιορίζεται ταυτόχρονα η  $d$  συνιστώσα στο μηδέν, εμποδίζοντας την έγχυση ενεργού ισχύος στο δίκτυο. Για να έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα είναι απαραίτητο να γίνεται έλεγχος και των δύο συνιστωσών ανάλογα με τις απαιτήσεις του δικτύου. Σε περίπτωση ομαλής λειτουργίας, προφανώς δεν χρειάζεται παραγωγή άεργου ισχύος, επομένως το σύστημα ελέγχου μπορεί να παραμείνει ως έχει. Σε περίπτωση όμως διαταραχής, όπως η πτώση της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης δίνεται προτεραιότητα στην παραγωγή άεργου ισχύος έτσι ώστε να αποφευχθεί η απομάκρυνση της ανεμογεννήτριας από το δίκτυο διατηρώντας ωστόσο την τιμή της παρεχόμενης ενεργού ισχύος σε αποδεκτά επίπεδα. Το σύστημα ελέγχου παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



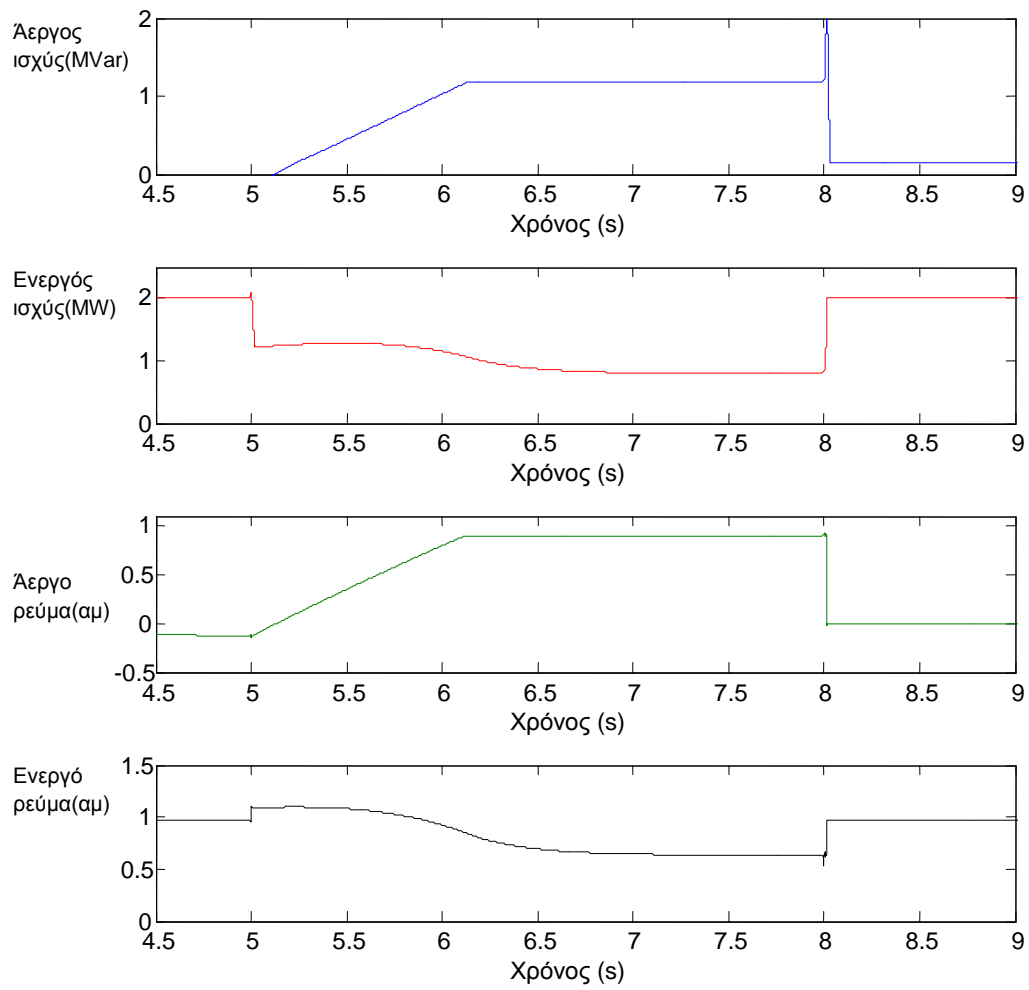
Σχήμα 5.3.2.4. Τροποποιημένο σύστημα ελέγχου για τις τιμές αναφοράς  $d, q$  συνιστωσών.



Προστίθενται λοιπόν δύο συγκριτές οι οποίοι τροφοδοτούν δύο διακόπτες με το λογικό σήμα 1 σε περίπτωση υπότασης ή υπερέντασης. Αν δεν συμβαίνει κάποια διαταραχή η έξοδος των διακοπών (κάτω ακροδέκτης) δεν διαφέρει από την έξοδο που θα είχαμε χωρίς κάποια τροποποίηση του συστήματος. Αν υπάρχει διαταραχή, τότε η έξοδος του πάνω διακόπτη είναι η τιμή αναφοράς της  $d$  συνιστώσας του ρεύματος. Η τιμή αυτή προκύπτει μετά από αφαίρεση του τετραγώνου της τιμής αναφοράς της  $q$  συνιστώσας από το τετράγωνο της μέγιστης τιμής του ρεύματος ( $1.1^2=1.21$ ) βρίσκοντας στη συνέχεια την τετραγωνική ρίζα του αποτελέσματος που προκύπτει. Η τιμή αναφοράς της  $q$  συνιστώσας προκύπτει από τον ρυθμιστή της τάσης (var regulator). Παράλληλα, στον κάτω διακόπτη η έξοδος είναι το όριο της  $q$  συνιστώσας το οποίο μπορεί να μεταβάλλεται. Αξίζει να σημειωθεί ότι με το συγκεκριμένο έλεγχο της  $d$  συνιστώσας η συνεχής τάση πριν τον αντιστροφή είναι ανεξέλεγκτη. Ωστόσο, διατηρεί την ονομαστική της τιμή με τη χρήση του φορτίου έκτακτης ανάγκης, όπως αναλύθηκε εκτενώς προηγουμένως. Παρακάτω δίνονται διαγράμματα της άεργου, ενεργού ισχύος καθώς και των δύο συνιστωσών για διαφορετικά όρια αναφοράς της  $q$  συνιστώσας.

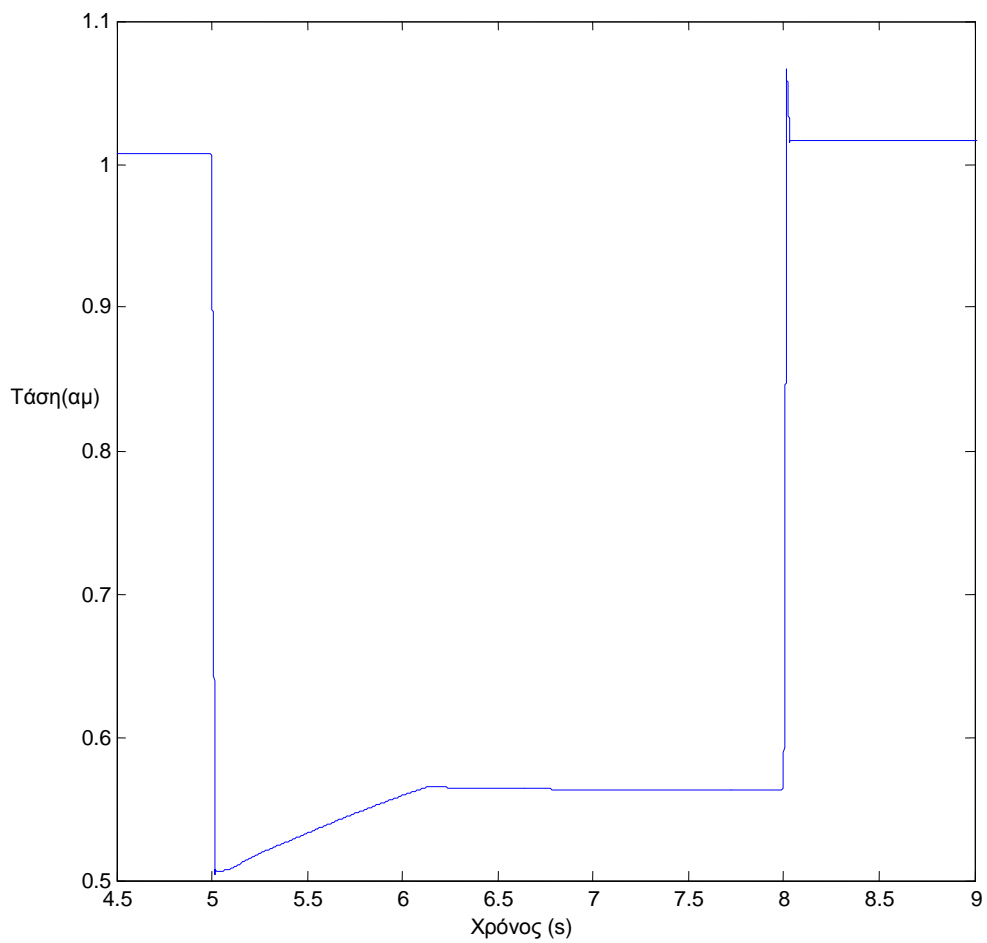
➤ **Όριο άεργου ρεύματος = 0.9pu**

Η  $q$  συνιστώσα περιορίζεται στα 0.9 pu. Με τη σειρά της  $d$  συνιστώσα περιορίζεται στα 0.632 pu.



Σχήμα 5.3.2.5.Ενεργός-Άεργος ισχύς και q-d συνιστώσες του ρεύματος.

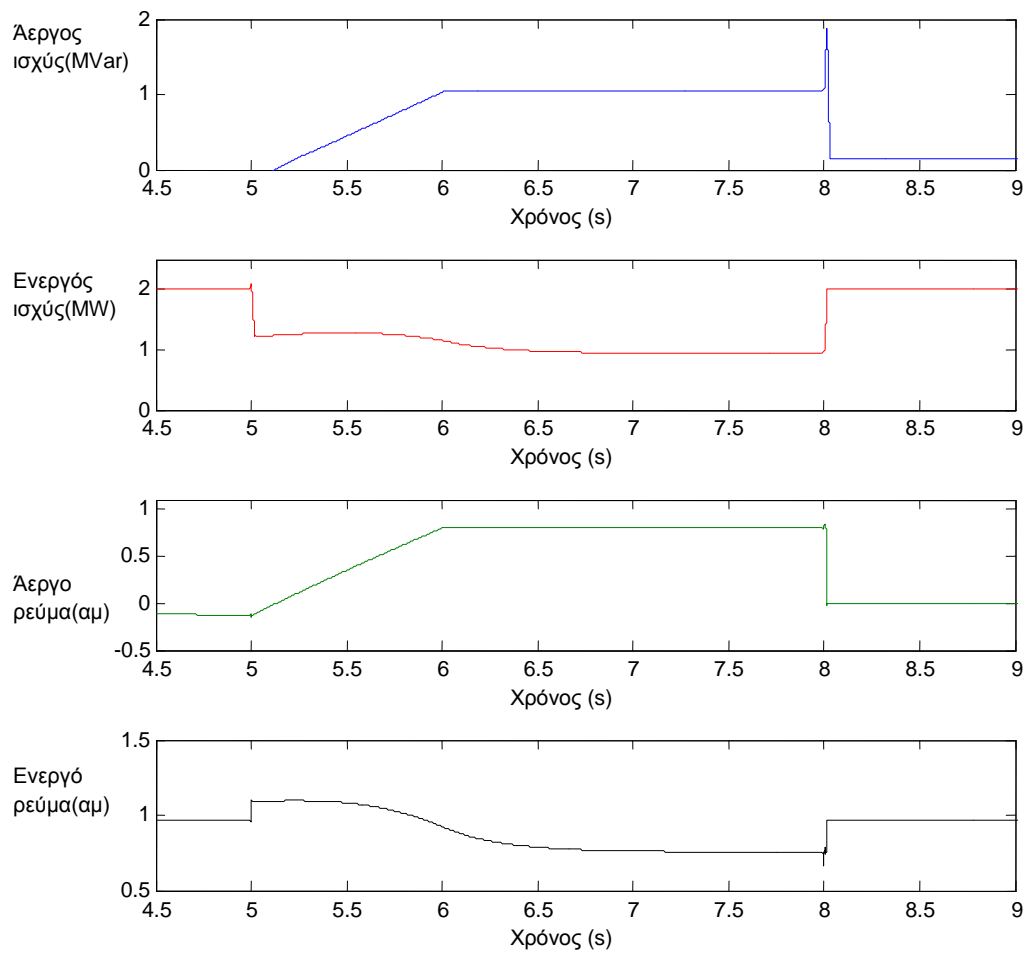
Η ενεργός ισχύς πέφτει μέχρι και τα 0.8 MW ενώ η άεργος φτάνει στα 1.18 MVar. Η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.3.2.6. Τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης με το δίκτυο. Η τάση αυξάνεται και φτάνει τα 0.565 pu.

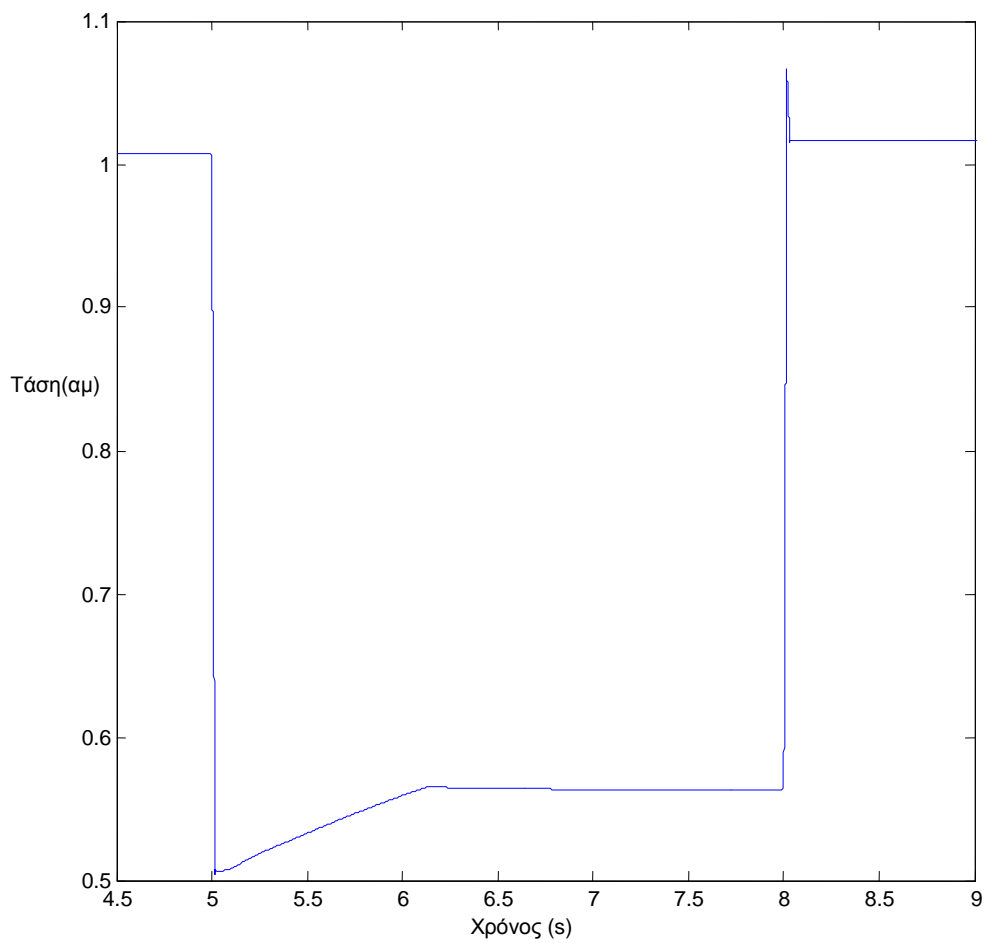
➤ Όριο άεργου ρεύματος= 0.8 pu

Η q συνιστώσα περιορίζεται στα 0.8 pu. Με τη σειρά της η d συνιστώσα περιορίζεται στα 0.755 pu.



Σχήμα 5.3.2.7.Ενεργός-Άεργος ισχύς και q-d συνιστώσες του ρεύματος.

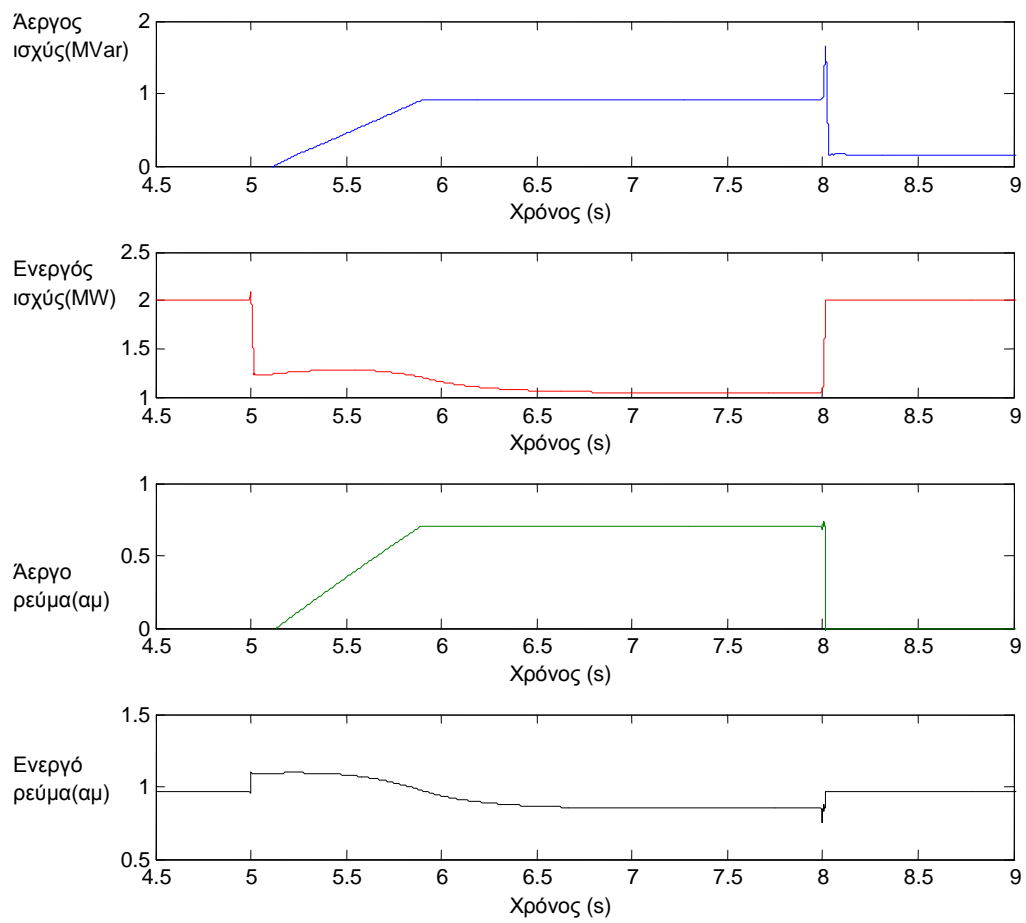
Η ελάχιστη τιμή της ενεργού ισχύος είναι 0.95MW και η μέγιστη της άεργου είναι 1.05 MVar.



Σχήμα 5.3.2.8. Τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης με το δίκτυο. Η τάση αυξάνεται και φτάνει τα 0.56 pu.

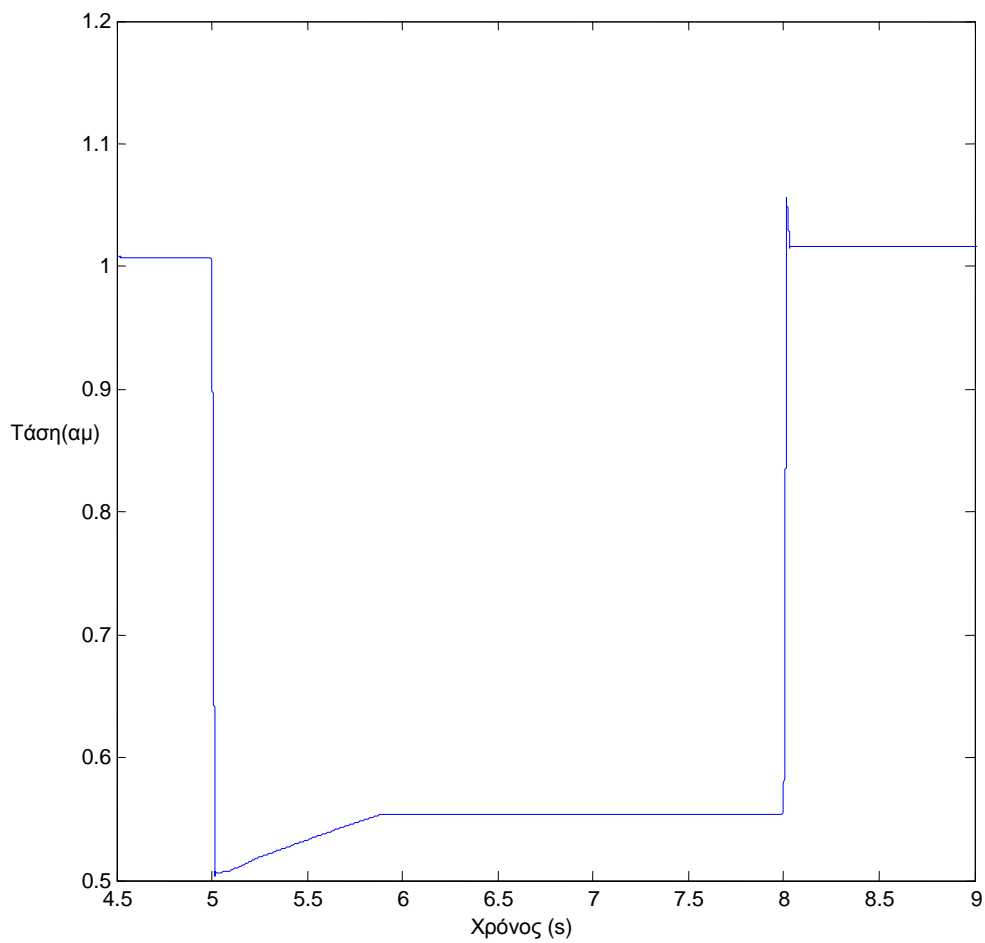
➤ Όριο άεργου ρεύματος = 0.7 pu

Η  $q$  συνιστώσα περιορίζεται στα 0.7 pu. Με τη σειρά της η  $d$  συνιστώσα περιορίζεται στα 0.849 pu.



Σχήμα 5.3.2.9.Ενεργός-Άεργος ισχύς και q-d συνιστώσες του ρεύματος.

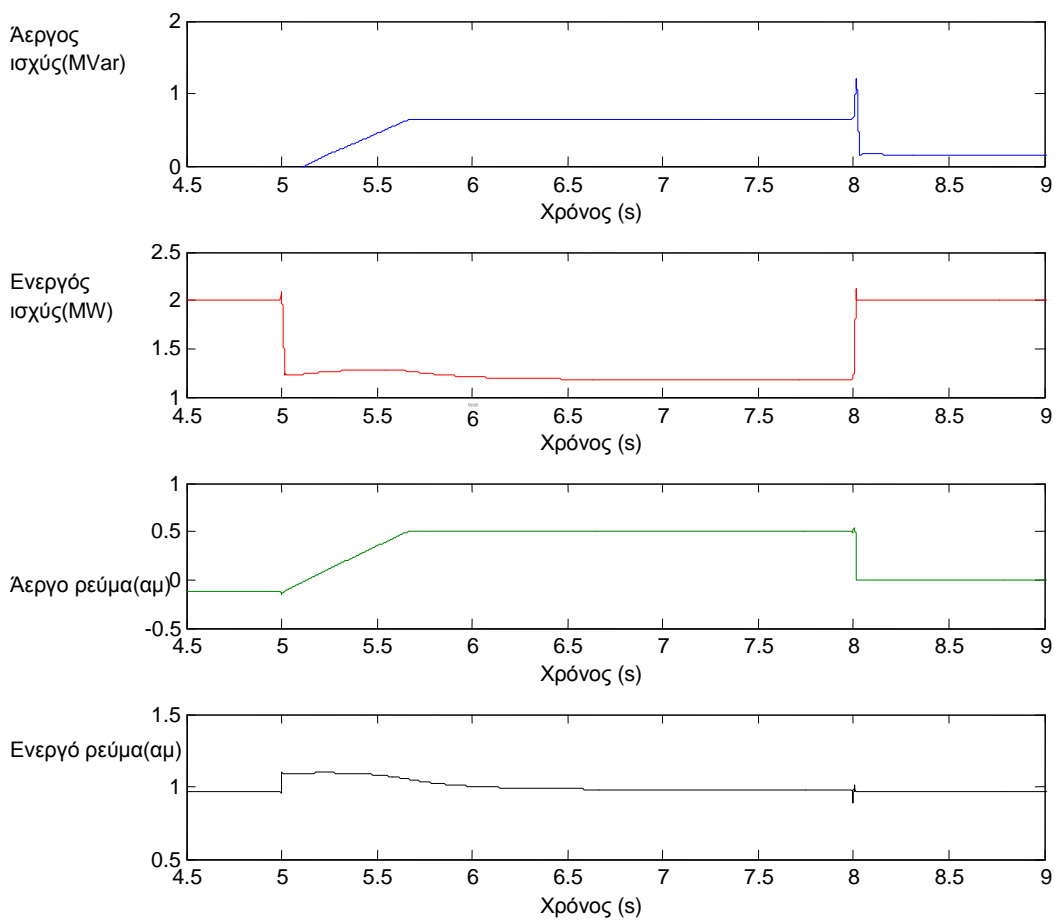
Η ενεργός ισχύς πέφτει μέχρι τα 1.05MW και η άεργος φτάνει τα 0.9MVar.



Σχήμα 5.3.2.10. Τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης με το δίκτυο. Η τάση αυξάνεται και φτάνει τα 0.553 pu.

➤ Όριο άεργου ρεύματος= 0.5 pu

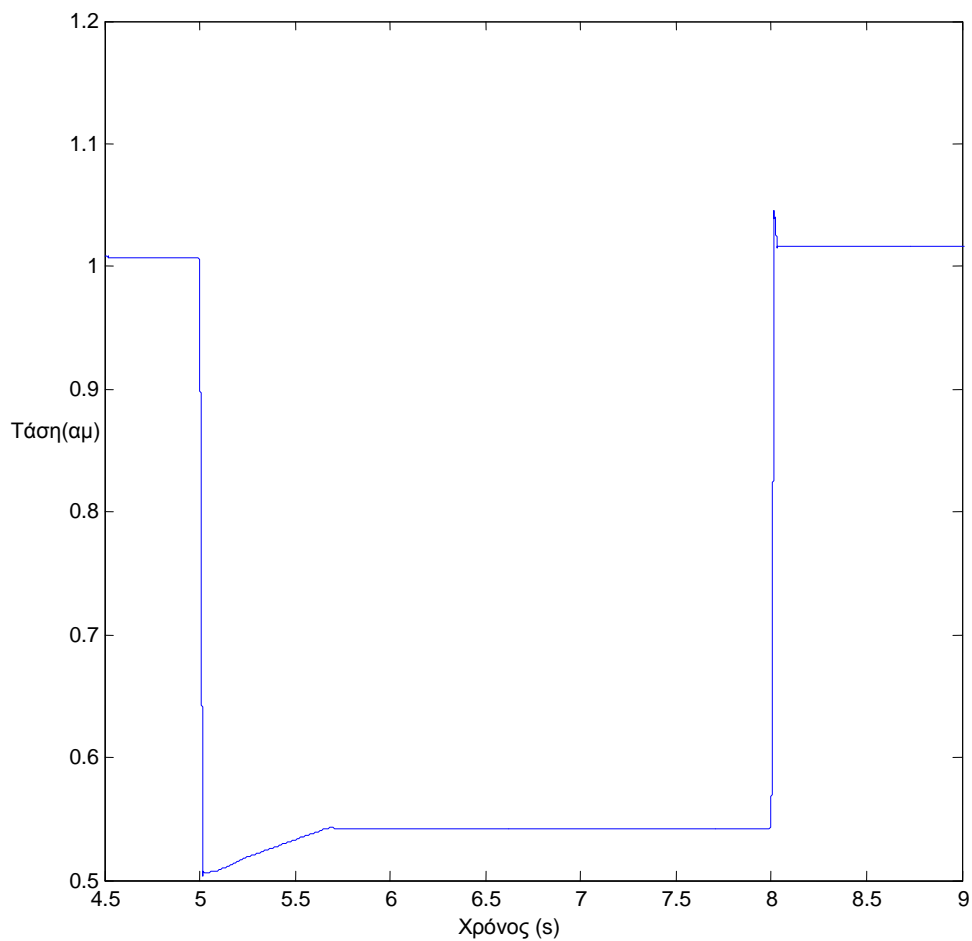
Η q συνιστώσα περιορίζεται στα 0.5 pu. Με τη σειρά της η d συνιστώσα περιορίζεται στα 0.98 pu.



Σχήμα 5.3.2.11.Ενεργός-Αεργος ισχύς και q-d συνιστώσες του ρεύματος.

Το ελάχιστο της τιμής της ενεργού ισχύος είναι 1.2MW και το μέγιστο της άεργου 0.65MVar.





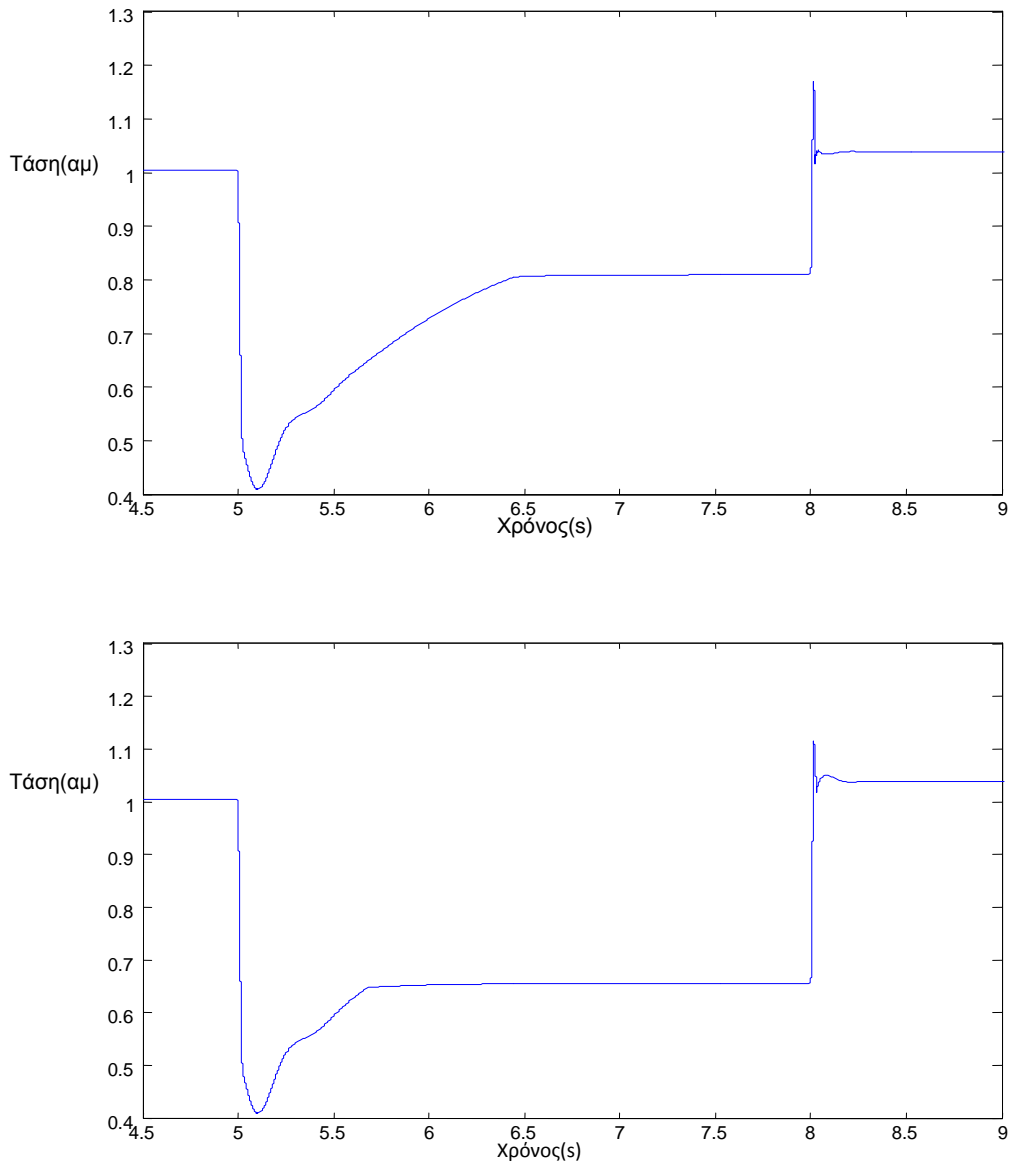
Σχήμα 5.3.2.12. Τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης με το δίκτυο. Η τάση αυξάνεται και φτάνει τα 0.542 pu.

Όριο συνιστώσας ρεύματος (pu)	$\alpha$	Όριο συνιστώσας ρεύματος (pu)	$d$	Ελάχιστο ενεργού ισχύος (MW)	Μέγιστο άεργου ισχύος (MVar)	Αύξηση τάσης δικτύου(pu)	Χρόνος που απαιτείται για τη σταθεροποίηση της τάσης(s)
0.9		0.632		0.8	1.18	0.065	1.15
0.8		0.755		0.95	1.05	0.06	1.1
0.7		0.849		1.05	0.9	0.053	0.8
0.5		0.98		1.2	0.65	0.042	0.65

Πίνακας 5.1. Αποτελέσματα προσομοιώσεων για διαφορετικά όρια  $\alpha$  συνιστωσών του ρεύματος.

Παρατηρούμε λοιπόν ότι καθώς αλλάζει το όριο της τιμής αναφοράς της  $\alpha$  συνιστώσας η υποστήριξη στην τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης με το δίκτυο δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες

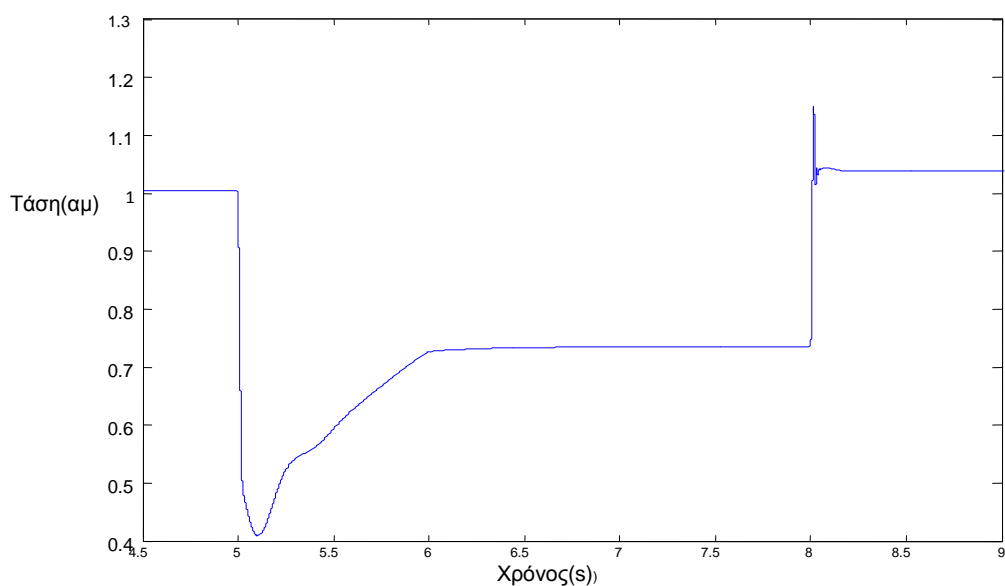
διακυμάνσεις, σε αντίθεση με την ενεργό ισχύ παρουσιάζει μεγάλη μεταβολή. Αξίζει ωστόσο να σημειώσουμε ότι τα αποτελέσματα αυτά λήφθηκαν για μία ανεμογεννήτρια συνδεδεμένη στο δίκτυο. Αν λάβουμε υπόψη μας ότι τα αιολικά πάρκα περιλαμβάνουν περισσότερες ανεμογεννήτριες αντιλαμβανόμαστε ότι η υποστήριξη της τάσης θα είναι αρκετά μεγαλύτερη και θα έχει πολύ μεγαλύτερες διαφορές για τα διάφορα όρια της τιμής αναφοράς της  $q$  συνιστώσας. Για παράδειγμα στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης με το δίκτυο για όριο αναφοράς  $q$  συνιστώσας αρχικά 0.9pu και στη συνέχεια 0.5pu.



Σχήμα 5.3.2.13. Τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης με το δίκτυο για όριο άεργου ρεύματος=0.9pu και όριο άεργου ρεύματος=0.5pu.

Στην πρώτη περίπτωση η τάση φτάνει τα 0.8pu ενώ στη δεύτερη τα 0.65 pu. Βέβαια, η απώλεια στην ενεργό ισχύ είναι τεράστια αν αναλογιστούμε ότι για όριο άεργου ρεύματος=0.5pu στο δίκτυο παρέχονται 2MW λιγότερα. Ανάλογα με τις

απαιτήσεις/ανάγκες του δικτύου και του παραγωγού λαμβάνεται η προτιμητέα τιμή. Μια μέση λύση θα ήταν για όριο άεργου ρεύματος=0.7pu όπου η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης έχει την παρακάτω μορφή.



Σχήμα 5.3.2.14. Τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης με το δίκτυο για όριο άεργου ρεύματος=0.7pu.

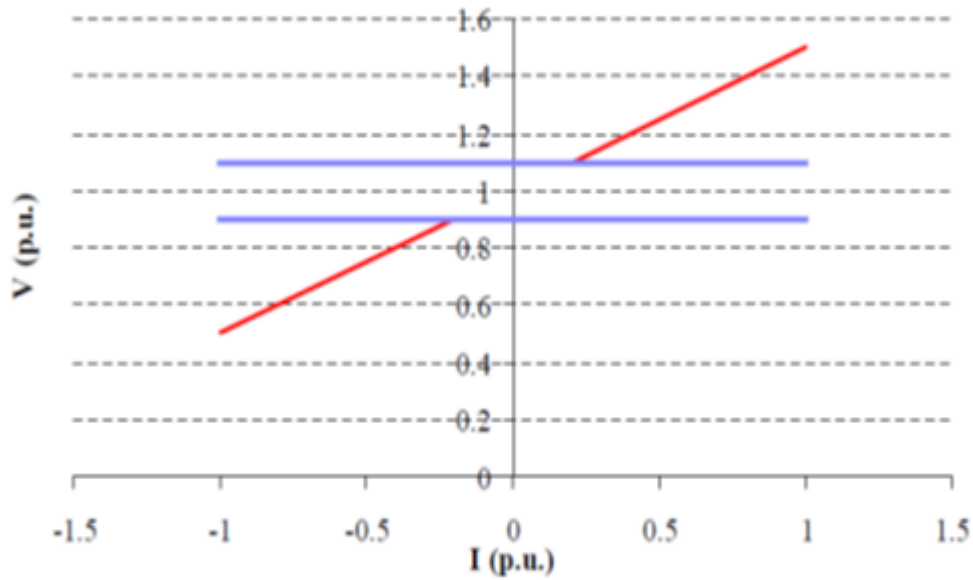
Η τάση φτάνει τα 0.735pu. Η απώλεια ενεργού ισχύος είναι 0.6MW.

Σε κάθε περίπτωση πάντως το σύστημα ελέγχου είναι ικανό να παρέχει υποστήριξη στο δίκτυο σε περίπτωση διαταραχής σε έναν πολύ ικανοποιητικό βαθμό. Αξίζει να τονίσουμε ότι ακόμα και μια πολύ μικρή διαφορά στην τιμή της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης με το δίκτυο είναι ικανή να καθορίσει το αν η ανεμογεννήτρια θα παραμείνει συνδεδεμένη στο δίκτυο ή αν η σύνδεση θα διακοπεί. Με το παρόν σύστημα ελέγχου δίνεται η δυνατότητα επιλογής προτεραιότητας για παραγωγή ενεργού ή άεργου ισχύος σε περίπτωση διαταραχής της τάσης του δικτύου.

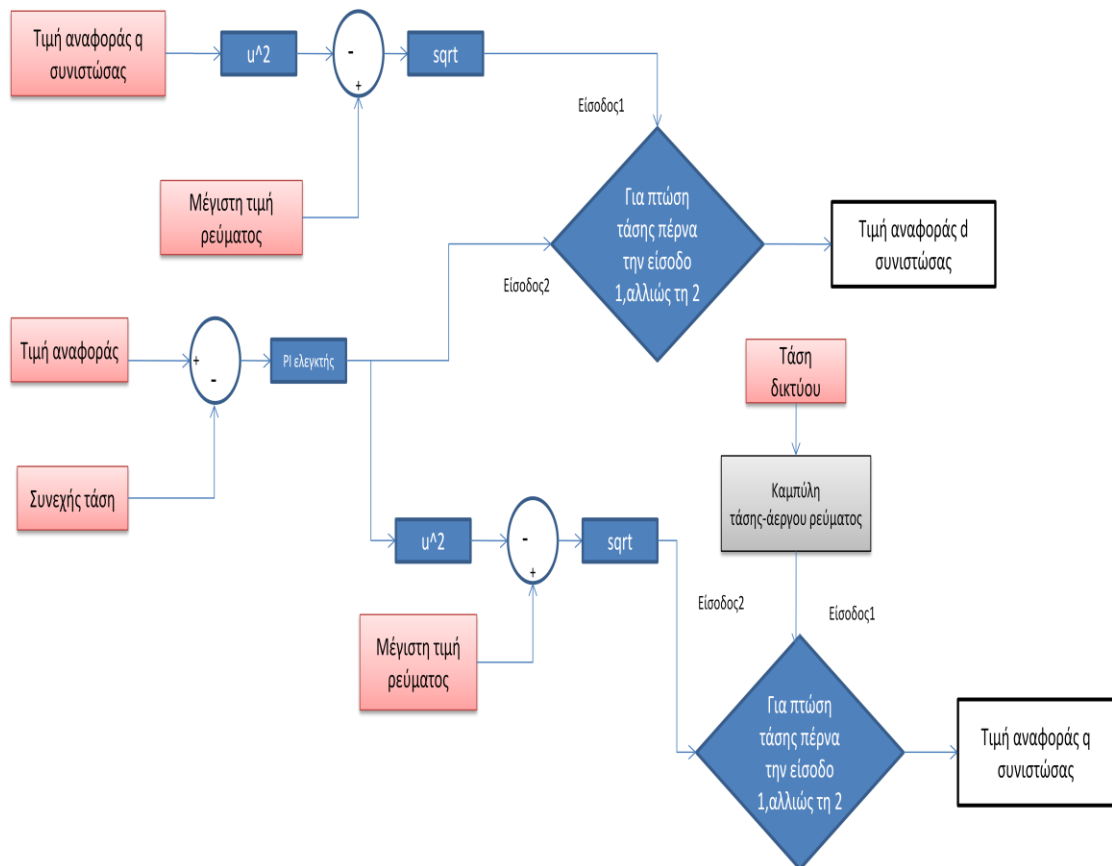
### 5.3.3. Παραγωγή άεργου ρεύματος σύμφωνα με τον Γερμανικό κώδικα.

Το σύστημα ελέγχου που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα μας δίνει τη δυνατότητα να καθορίσουμε το άεργο ρεύμα που επιθυμούμε να παρέχεται σε περιπτώσεις διαταραχών. Στη συγκεκριμένη ενότητα, παρουσιάζεται η παραγωγή άεργου ρεύματος σύμφωνα με το Γερμανικό κώδικα. Αξίζει να αναφέρουμε, ότι σε λίγους κώδικες υπάρχει απαίτηση για την παραγωγή άεργου ρεύματος ανάλογα με τη διαταραχή. Αυτοί είναι ο Γερμανικός, ο Βρετανικός κι ο Ιρλανδικός [5]. Από τον Γερμανικό, λοιπόν, κώδικα έχουμε την παρακάτω καμπύλη.

### Καμπύλη τάσεως/έργου ρεύματος του Γερμανικού κώδικα



Σχήμα 5.3.3.1. Απαιτήσεις γερμανικού κώδικα για την παραγωγή έργου ρεύματος κατά τις διαταραχές τάσης[5].

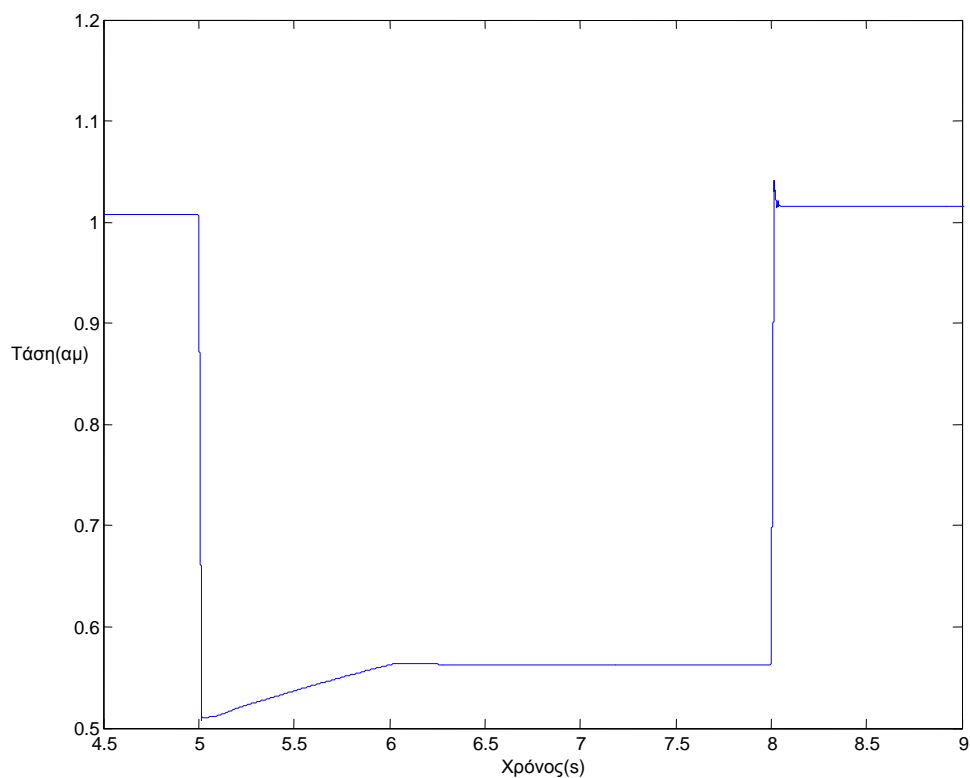


Σχήμα 5.3.3.2. Σύστημα ελέγχου προσαρμοσμένο στο γερμανικό κώδικα.

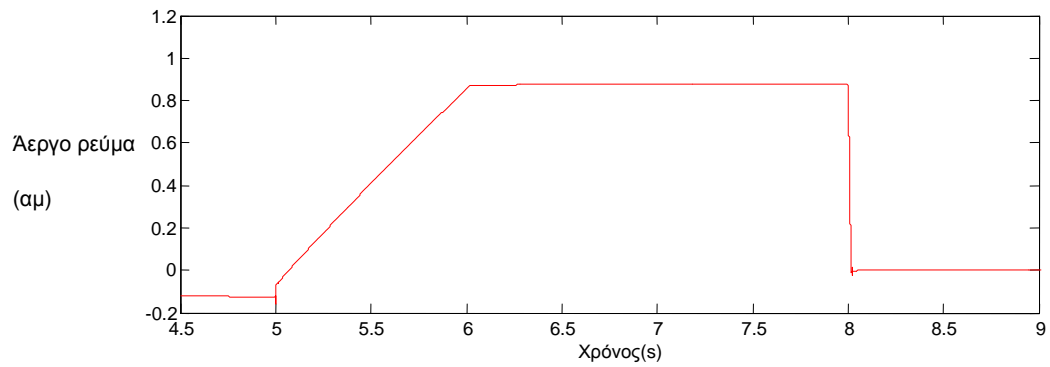
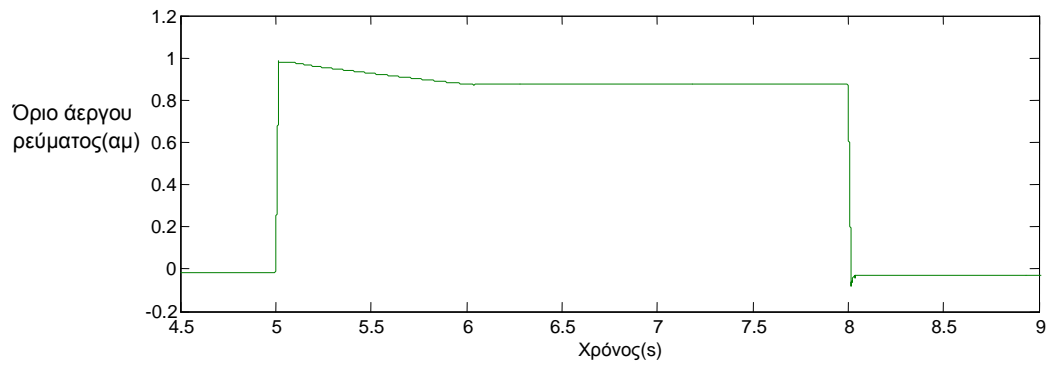
Όπως φαίνεται από το σχήμα 5.3.3.2 η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης περνά από έναν πίνακα και αντιστοιχίζεται στο άεργο ρεύμα που πρέπει να παραχθεί. Ο πίνακας αυτός εμπεριέχει την καμπύλη του σχήματος 5.3.3.1. Έτσι ανάλογα με την υπόταση/υπέρταση η εντολή για την παραγωγή άεργου ρεύματος είναι διαφορετική. Είναι φανερό ότι με τον τρόπο που έχει υλοποιηθεί το συγκεκριμένο σύστημα ελέγχου είναι πολύ εύκολη η προσαρμογή του σε οποιοδήποτε κώδικα και σε οποιαδήποτε καμπύλη ζητηθεί.

Παρακάτω παρουσιάζονται αποτελέσματα προσομοιώσεων, τα οποία λήφθηκαν για διάφορες διαταραχές της τάσης.

- Πτώση τάσης στο 50%.



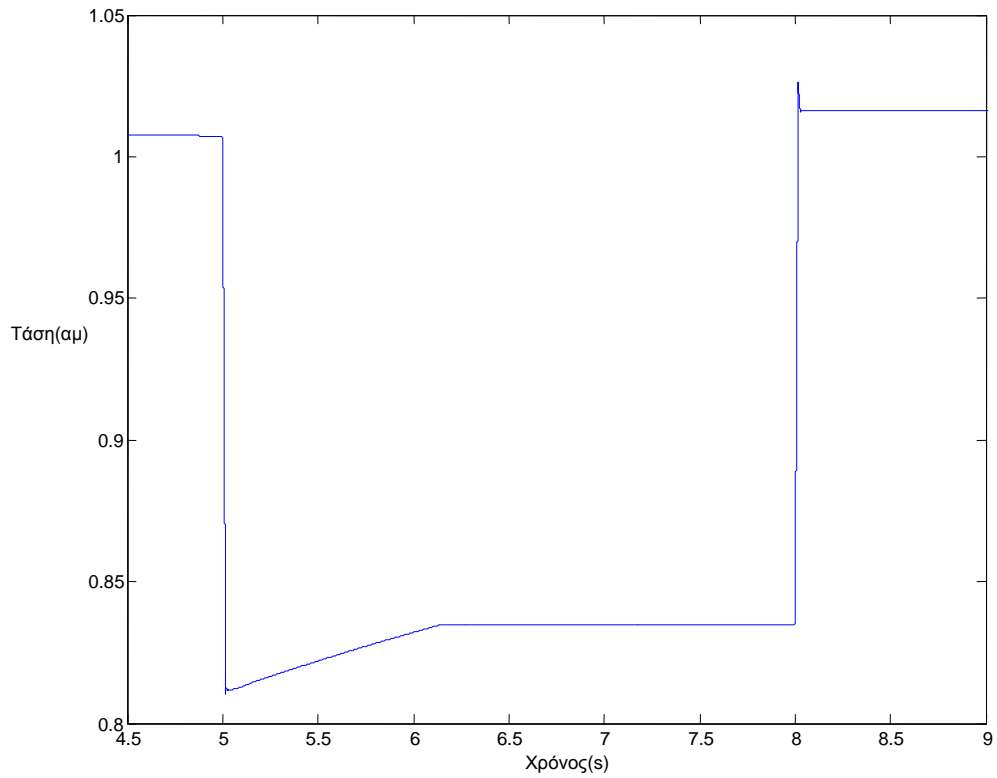
Σχήμα 5.3.3.3. Τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης.



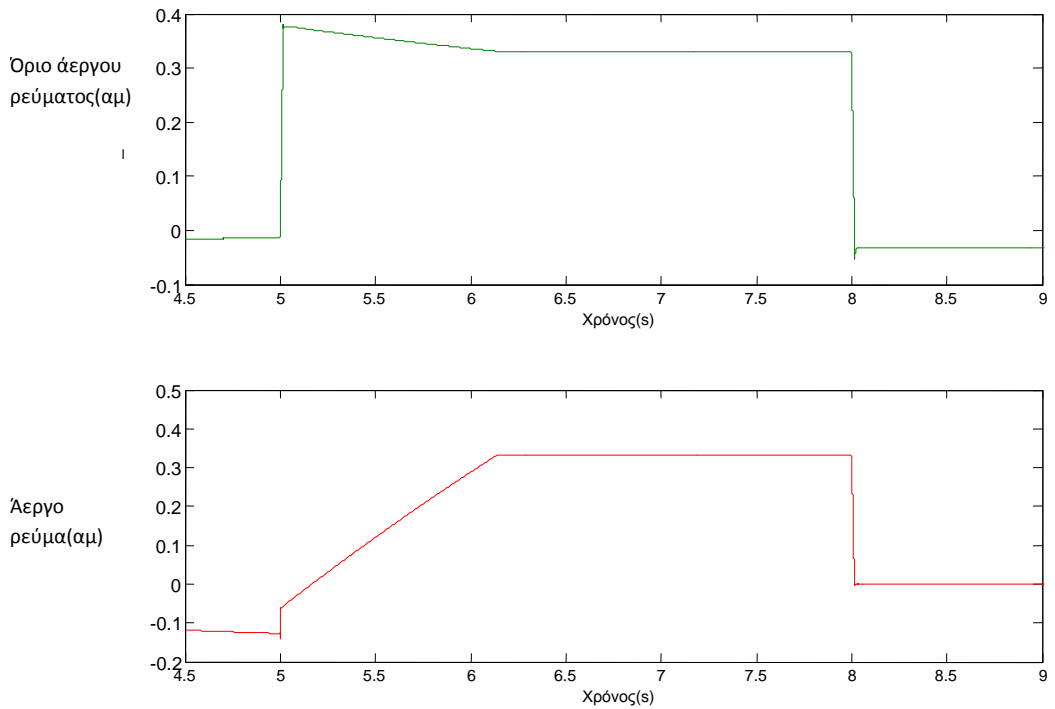
Σχήμα 5.3.3.4. Επιβαλλόμενο όριο άεργου ρεύματος και άεργο ρεύμα.

Αρχικά η τάση είναι 0.5 pu και ο Γερμανικός κώδικας απαιτεί η τιμή του άεργου ρεύματος να είναι 1pu. Στη συνέχεια η τάση αυξάνεται με την υποστήριξη του συστήματος ελέγχου στα 0.565 pu και το η τιμή του άεργου ρεύματος σταθεροποιείται με τη σειρά της στα 0.875 pu.

- Πτώση τάσης στο 80%.

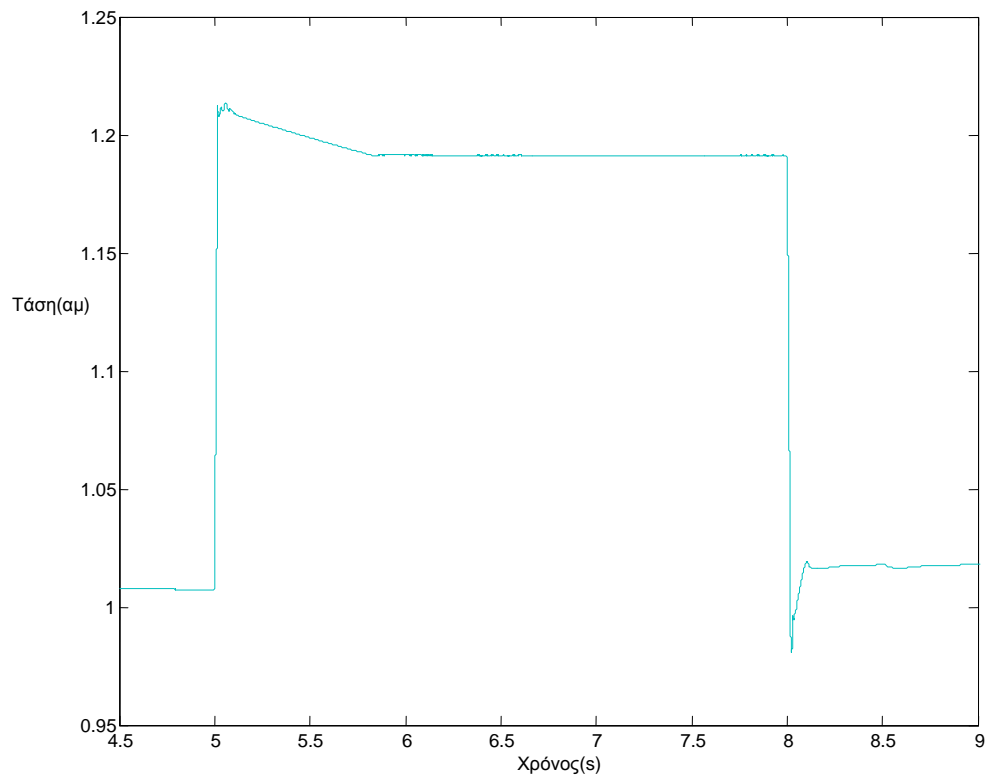


Σχήμα 5.3.3.5. Τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης.



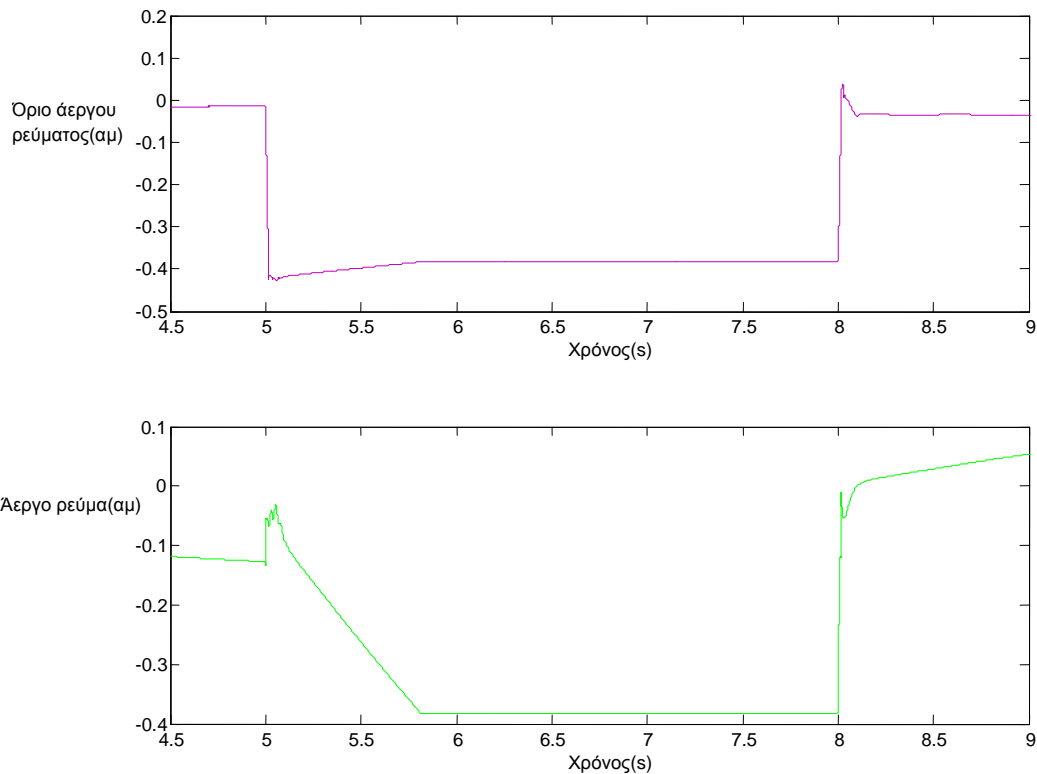
Σχήμα 5.3.3.6. Επιβαλλόμενο όριο άεργου ρεύματος και άεργο ρεύμα.

- Άυξηση τάσης στο 120%.



Σχήμα 5.3.3.7. Τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης.



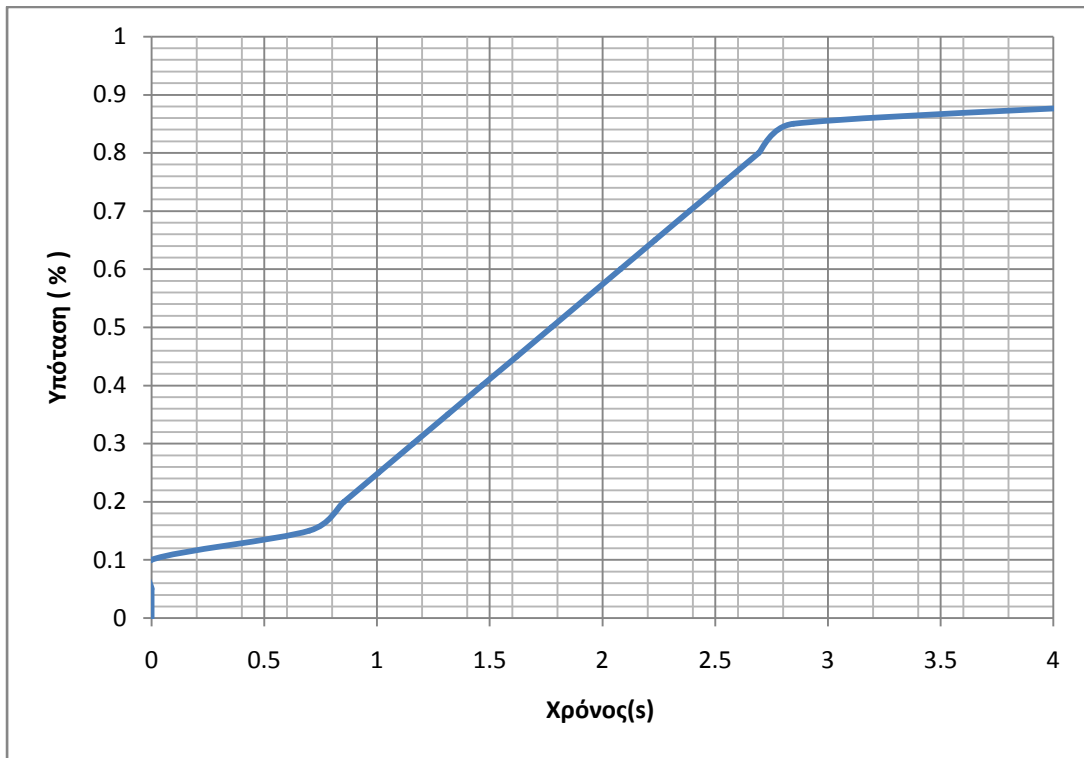


Σχήμα 5.3.3.8. Επιβαλλόμενο όριο άεργου ρεύματος και άεργο ρεύμα.

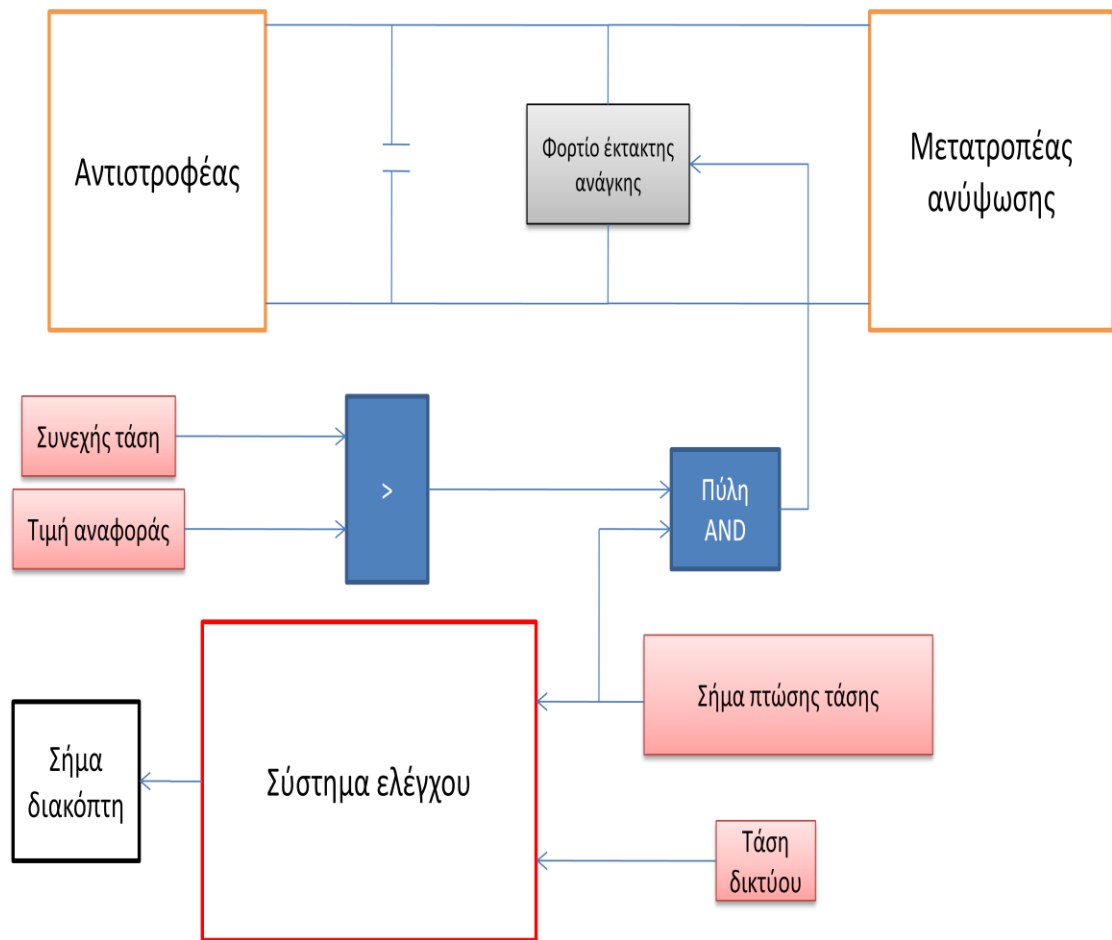
Σε κάθε περίπτωση το σύστημα ελέγχου ακολουθεί τις απαιτήσεις του Γερμανικού κώδικα και η παραγωγή άεργου ρεύματος πραγματοποιείται σύμφωνα με την επιθυμητή καμπύλη. Το σύστημα ελέγχου προσδίδει πολύ μεγάλη ευελιξία και προσαρμοστικότητα καθώς μπορεί να λειτουργήσει τόσο σύμφωνα με κάποιο κώδικα όσο και σύμφωνα με την επιθυμία του κάθε διαχειριστή απλά πραγματοποιώντας μια ρύθμιση στο όριο του άεργου ρεύματος.

#### 5.4. Σύστημα ελέγχου για παραμονή ή μη στο δίκτυο σε βύθιση τάσης.

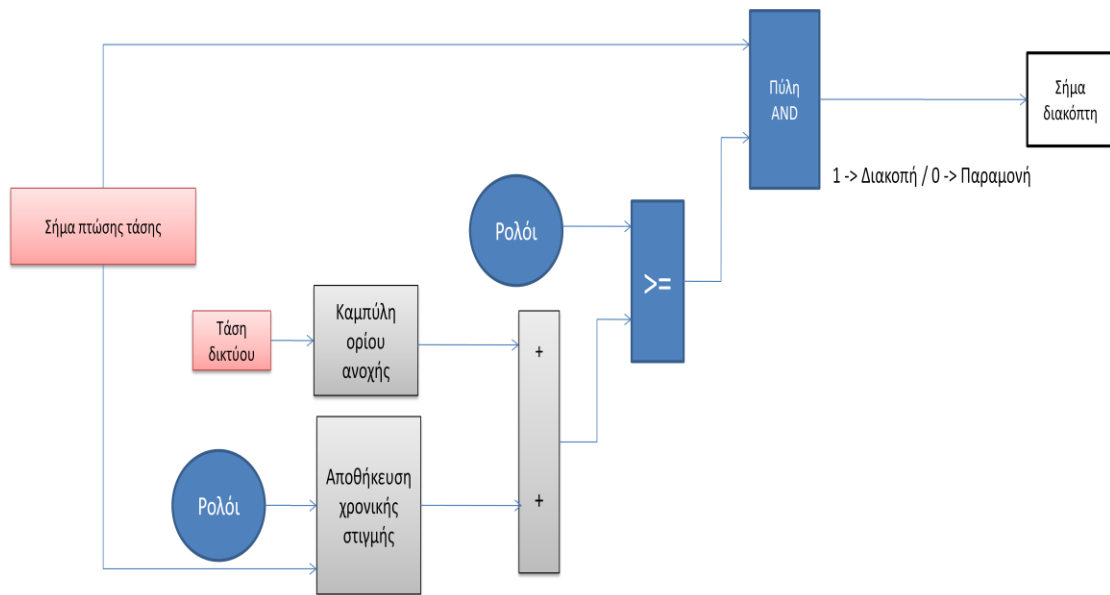
Όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο, το αν μια ανεμογεννήτρια θα παραμείνει στο δίκτυο ή θα χρειαστεί να αποσυνδεθεί από αυτό και να περάσει σε συνθήκες απομονωμένης λειτουργίας καθορίζεται από συγκεκριμένο κώδικα της κάθε χώρας. Έχοντας υπόψη μια τυπική καμπύλη ανοχής βύθισης τάσης (και όχι συγκεκριμένη καμπύλη από το πρότυπο κάποιας χώρας) κατασκευάστηκε το παρόν σύστημα ελέγχου. Μετά από βύθιση τάσης το σύστημα παρακολουθεί το μέγεθος της βύθισης και τη διάρκεια αυτής και αποφασίζει αν η ανεμογεννήτρια θα παραμείνει στο δίκτυο – βάσει της δοσμένης καμπύλης – ή αν θα αποσυνδεθεί από αυτό και θα λειτουργεί απομονωμένα συνδεδεμένη με το φορτίο έκτακτης ανάγκης. Η καμπύλη αυτή είναι ενδεικτική ωστόσο, μπορεί να αντικατασταθεί από καμπύλη βασισμένη σε κώδικα κάποιας συγκεκριμένης χώρας.



Σχήμα 5.4.1. Καμπύλη ορίου ανοχής σε βύθιση τάσης.



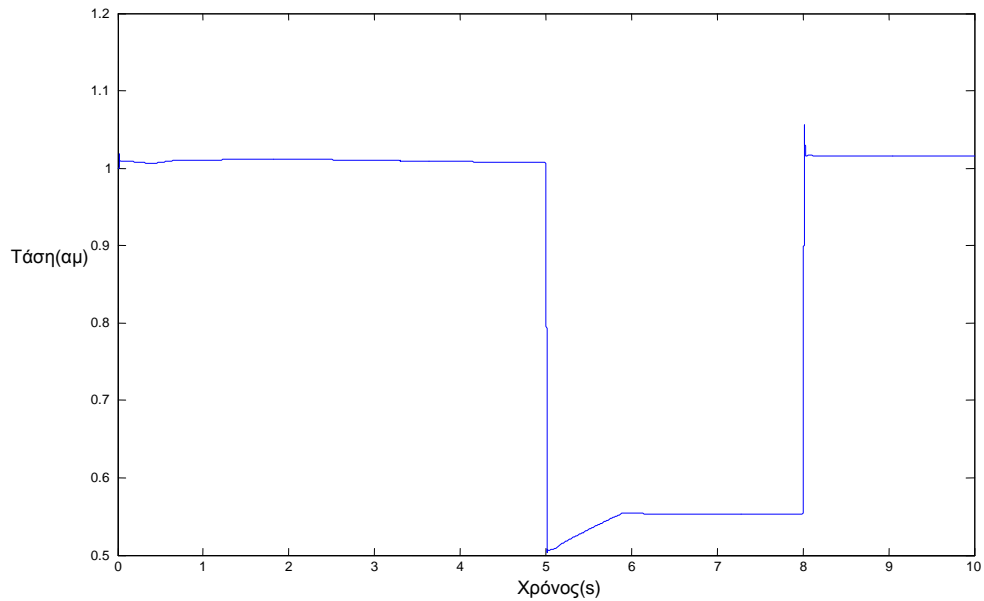
Σχήμα 5.4.2. Θέση συστήματος ελέγχου στο μοντέλο προσομοίωσης.



Σχήμα 5.4.3. Δομικό διάγραμμα συστήματος ελέγχου.

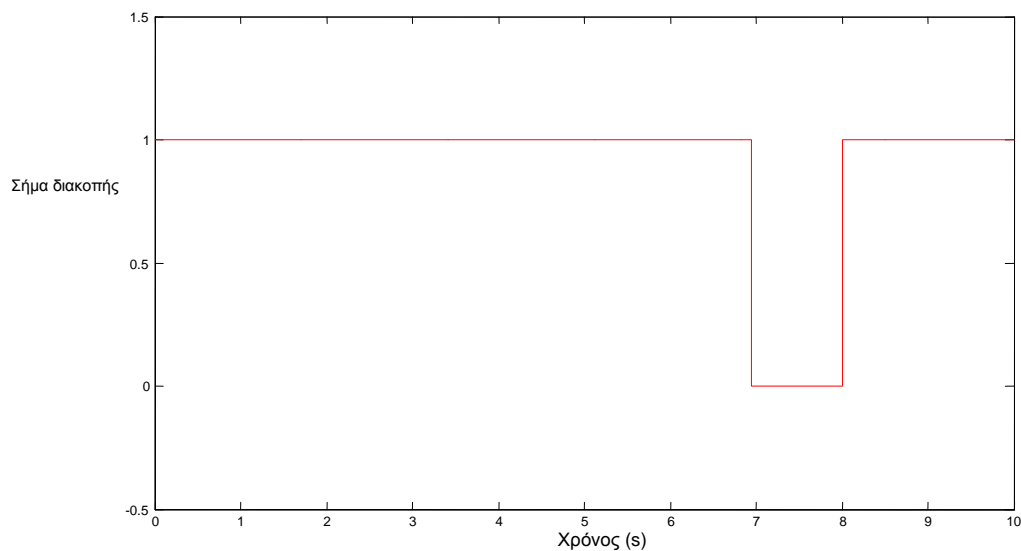
Το σύστημα έχει δύο εισόδους, την τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης σε ανά μονάδα τιμή(V) και ένα λογικό σήμα(Σήμα πτώσης τάσης/Under\_Voltage\_signal). Όταν το λογικό σήμα είναι 1 σημαίνει ότι η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης έχει υποστεί βύθιση. Όταν λοιπόν έχουμε βύθιση τάσης η μία θύρα της πύλης AND είναι 1. Επίσης, όταν το λογικό σήμα μεταβληθεί από 0 σε 1 θα δοθεί ένας μικρός παλμός και θα αποθηκευτεί σε μια μνήμη η χρονική στιγμή όπου συνέβη η βύθιση. Παράλληλα, η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης αντιστοιχίζεται μέσω ενός πίνακα(LookupTable) σε χρόνο βάσει της καμπύλης του σχήματος 5.4.1. Στην έξοδο του πίνακα θα προκύψει ο χρόνος παραμονής στο δίκτυο. Οι δύο χρονικές τιμές προστίθενται, δίνοντας μας τη χρονική στιγμή που η γεννήτρια πρέπει να αποσυνδεθεί από το δίκτυο βάσει των δεδομένων συνθηκών και συγκρίνονται με την τιμή ενός ρολογιού που ξεκινά να λειτουργεί από την αρχή της προσομοίωσης. Αν η έξοδος του αθροιστή είναι μεγαλύτερη ή ίση από την τιμή του ρολογιού σημαίνει ότι η γεννήτρια πρέπει να αποσυνδεθεί και η δεύτερη θύρα της πύλης AND γίνεται κι αυτή ίση με 1. Στη συνέχεια, το σήμα περνά από μια πύλη NOT και γίνεται μηδέν τροφοδοτώντας έναν διακόπτη και αποσυνδέοντας την ανεμογεννήτρια από το δίκτυο. Το σύστημα ενεργοποιεί τον διακόπτη εφόσον έχει παρέλθει ένα μικρό διάστημα (0.3s) από την έναρξη της προσομοίωσης προκειμένου να αποφευχθούν ασαφή συμπεράσματα από την μη ομαλή λειτουργία της ανεμογεννήτριας κατά τις πρώτες στιγμές της λειτουργίας της[11].

Με βάση τα παραπάνω επιβάλλουμε στο σύστημα μια βύθιση της τάσης στα 0.5 pu διάρκειας 3 δευτερολέπτων. Σύμφωνα με την καμπύλη του σχήματος 5.4.1 η ανεμογεννήτρια μετά από 1,77 δευτερόλεπτα διαταραχής θα πρέπει να αποσυνδεθεί από το δίκτυο. Θέτοντας το  $I_{q\_ref\_limit}$  στο 0.7 pu έχουμε την τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης με το δίκτυο.



Σχήμα 5.4.4. Τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης με το δίκτυο.

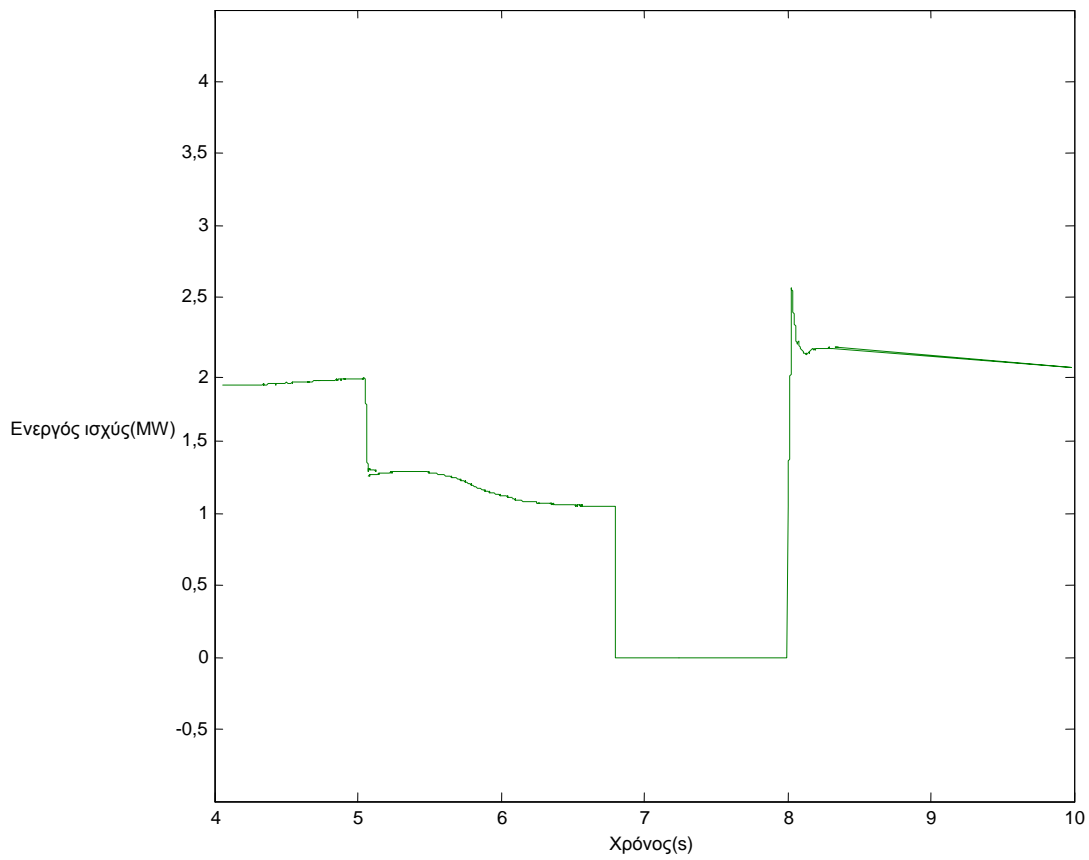
Παρατηρούμε λοιπόν ότι η τιμή τάσης που θα αντιστοιχηθεί σε χρόνο μέσω της καμπύλης του σχήματος 5.4.1 δεν είναι 0.5 pu αλλά 0.553 pu δίνοντας έτσι παραπάνω χρόνο παραμονής της γεννήτριας στο δίκτυο. Συγκεκριμένα, ο χρόνος παραμονής στο δίκτυο για πτώση στα 0.5pu είναι 1.773 δευτερόλεπτα ενώ για 0.553 pu είναι 1.938 δευτερόλεπτα. Έτσι, η ανεμογεννήτρια αποσυνδέεται στα 6.938 δευτερόλεπτα.



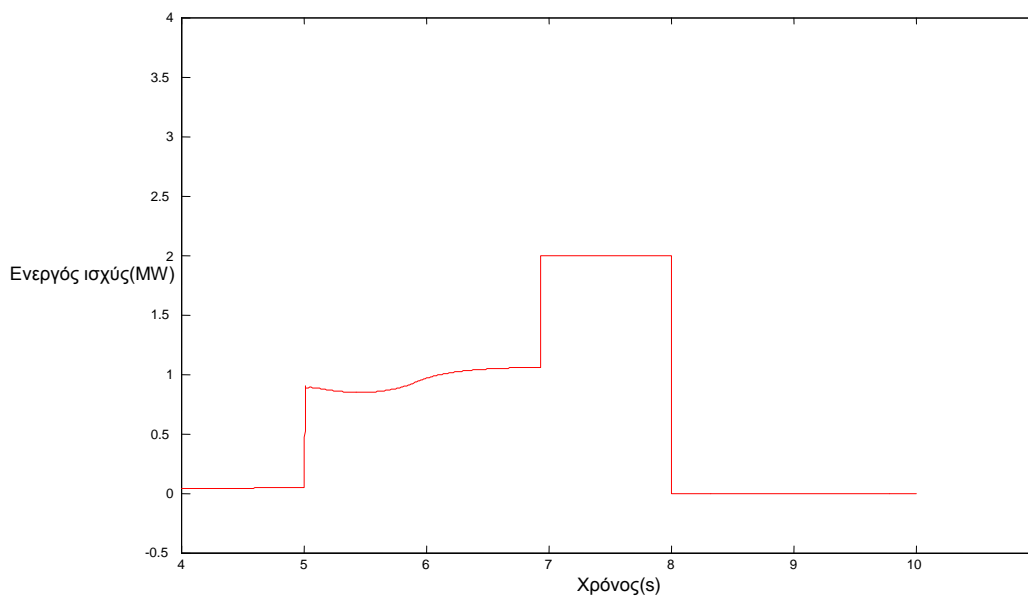
Σχήμα 5.4.5. Σήμα που ενεργοποιεί τον διακόπτη αποσύνδεσης. (0->ανοικτός, 1->κλειστός)

Αυτό επιβεβαιώνεται από το διάγραμμα της ενεργού ισχύος που παρέχεται στο δίκτυο, όπως παρατίθεται στο παρακάτω σχήμα. Βλέπουμε ότι με την επαναφορά της

ανεμογεννήτριας στο δίκτυο έχουμε άμεση παροχή ενεργού ισχύος σε αυτό λόγω της συνεισφοράς του φορτίου έκτακτης ανάγκης.



Σχήμα 5.4.6. Ισχύς που παρέχεται στο δίκτυο.



Σχήμα 5.4.7. Ισχύς που καταναλώνεται στο φορτίο έκτακτης ανάγκης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

---

### 6. Έλεγχος της συχνότητας

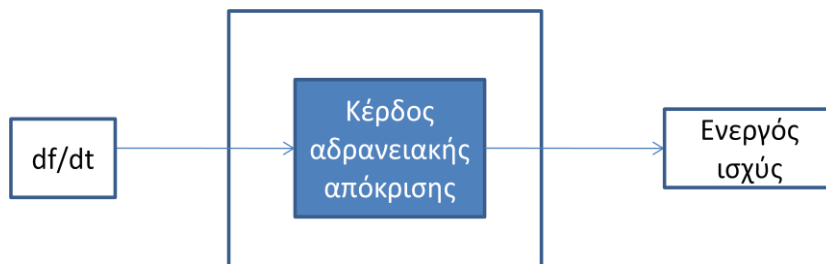
Για να μπορεί μια ανεμογεννήτρια να συμμετέχει στον έλεγχο της συχνότητας θα πρέπει αρχικά να εξασφαλιστεί ένα «απόθεμα» ισχύος. Αυτό μπορεί να γίνει περιορίζοντας την παραγωγή ενεργού ισχύος της ανεμογεννήτριας, έτσι ώστε όταν κάποια διαταραχή της συχνότητας λάβει χώρα να μπορεί να διατεθεί η απαιτούμενη ισχύς στο δίκτυο. Το απαιτούμενο «απόθεμα» ισχύος μπορεί να εξασφαλιστεί μέσω δύο τεχνικών, του delta control και του balance control. Με την τεχνική του delta control, ο σκοπός είναι να διατηρείται ένα σταθερό «απόθεμα» ισχύος σε MW ή εναλλακτικά ένα σταθερό ποσοστό της παραγόμενης ως «απόθεμα». Αντίθετα, στο balance control η ανεμογεννήτρια περιορίζεται στο να παράγει ένα συγκεκριμένο ποσό ενεργού ισχύος και όταν χρειαστεί, λόγω διαταραχών, διαχέεται και το υπόλοιπο ποσό που μπορεί να παράξει στο δίκτυο. Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιείται η τεχνική του balance control.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι αναφερόμενοι στον όρο «απόθεμα» ισχύος δεν εννοούμε κάποιο ποσό ισχύος που κρατείται σε κάποιο αποθηκευτικό μέσο, αλλά στο παραπάνω ποσό που μπορεί να διατεθεί σε περίπτωση διαταραχής και βάσει του γεγονότος ότι η γεννήτρια υπολειτουργεί ελεγχόμενα[25].

#### 6.1. Ελεγκτής συχνότητας βασισμένος σε έλεγχο αδρανειακής απόκρισης και στατισμού.

Ο ελεγκτής που προτείνεται για χρήση σε περίπτωση διαταραχών και δη στο πεδίο της συχνότητας εμπεριέχει δύο βασικές μεθόδους ελέγχου, τον έλεγχο αδρανειακής απόκρισης (inertia control) και τον έλεγχο στατισμού (droop control). Για τον έλεγχο της συχνότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάθεμιά από τις δύο αυτές μεθόδους, όπως και ο συνδυασμός τους. Αξίζει να αναφέρουμε ότι ο έλεγχος αδρανειακής απόκρισης εφαρμόζεται στον ελεγκτή της εκάστοτε ανεμογεννήτριας, ενώ ο έλεγχος στατισμού στον κεντρικό ελεγκτή ενός αιολικού πάρκου. Ωστόσο, ο έλεγχος στατισμού μπορεί να γίνει και στην κάθε ανεμογεννήτρια ξεχωριστά, όπως και θα γίνει στην παρούσα εργασία.

**i) Έλεγχος αδρανειακής απόκρισης.**

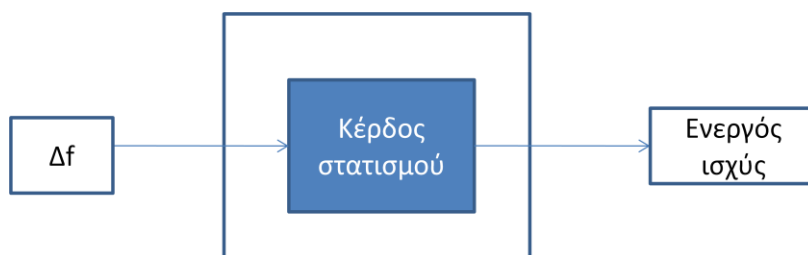


Σχήμα 6.1.1. Έλεγχος αδρανειακής απόκρισης.

Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, η ανεμογεννήτρια ανταποκρίνεται στο ρυθμό μεταβολής της συχνότητας. Αυτό το χαρακτηριστικό αναφέρεται συχνά ως εικονική επίδραση αδράνειας (“virtual inertia” effect) δεδομένου του ότι εισάγει έναν όρο στην ισχύ εξόδου, ανάλογο του  $2H_{WT}\frac{df}{dt}$ . Η επιπρόσθετη ενέργεια που παρέχεται από την αδρανειακή απόκριση της ανεμογεννήτριας περιορίζεται από το ποσό της κινητικής ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στην πραγματική αδράνεια (inertia) του δρομέα, τις αποδεκτές μεταβολές της ταχύτητας του δρομέα και τη μετά τη διαταραχή επίδραση της επαναφοράς της ταχύτητας του δρομέα (επομένως και της κινητικής ενέργειας) στην τιμή πριν τη διαταραχή. Η σταθερά  $H_{WT}$  είναι η σταθερά αδράνειας της ανεμογεννήτριας κι αποτελεί έκφραση της κινητικής ενέργειας που βρίσκεται αποθηκευμένη στο δρομέα. Επομένως, η σχέση που εκφράζει την ενεργό ισχύ που παρέχεται λόγω της ενεργειακής απόκρισης είναι ο εξής:

$$\Delta P_{inertia}^{WT} = -2H_{WT}\frac{df}{dt}f \quad [21]$$

**ii) Έλεγχος στατισμού.**



Σχήμα 6.1.2. Έλεγχος στατισμού.

Ο έλεγχος στατισμού αντίθετα, παρέχει έναν όρο στην ισχύ εξόδου ανάλογο των αποκλίσεων της συχνότητας :

$$\Delta P_{droop}^{WT} = K_{droop}(f - f_0)$$

όπου  $f_0$  είναι η συχνότητα αναφοράς. Ο παράγοντας κέρδους  $K_{droop}$  είναι ο αντίστροφος της παραμέτρου R:



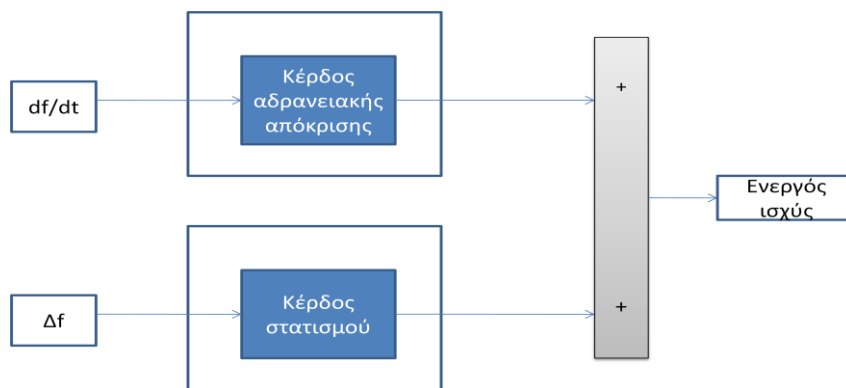
$$R = \frac{\Delta f}{\Delta P} = \frac{1}{K_{droop}}$$

Οι συνήθεις τιμές για το R όσον αφορά σε συμβατικές γεννήτριες είναι 3-5%.

Στον έλεγχο στατισμού μια νεκρή ζώνη μπορεί επίσης να συμπεριληφθεί αν δεν επιθυμείται καμία απόκριση από την ανεμογεννήτρια όταν η συχνότητα βρίσκεται στα επιθυμητά όρια. Αξίζει να σημειωθεί ότι για να είναι ενεργός ο έλεγχος στατισμού σε περιπτώσεις που συμβαίνει πτώση της συχνότητας κάτω από τα επιθυμητά όρια, ένα επαρκές «απόθεμα» ισχύος πρέπει να έχει διατηρηθεί από την ανεμογεννήτρια. Διαφορετικά, ο έλεγχος στατισμού θα είναι ουσιαστικά ενεργός μόνο σε περιπτώσεις όπου έχουμε αύξηση της συχνότητας πάνω από το επιθυμητό. Αντίθετα, ο έλεγχος αδρανειακής απόκρισης δεν απαιτεί κάποιο «απόθεμα» ισχύος, ωστόσο είναι πιο αποτελεσματικός με την αύξηση του αποθέματος[21].

### iii) Συνδυασμένος έλεγχος.

Χρησιμοποιώντας τον έλεγχο στατισμού και αδρανειακής απόκρισης ταυτόχρονα καταλήγουμε σε έναν PD ελεγκτή, ο οποίος διαμορφώνει το αντίστοιχο σήμα  $P_{freq}$  ανάλογα με την μετρούμενη συχνότητα δικτύου.

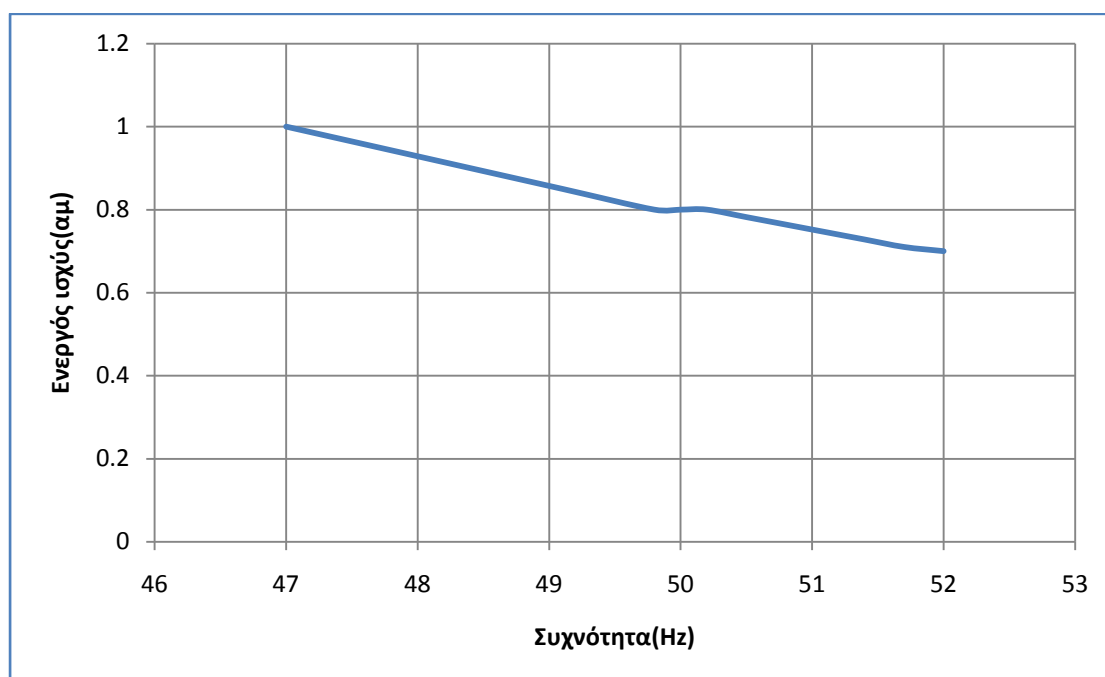


Σχήμα 6.1.3. Συνδυασμένος έλεγχος.

Τις πρώτες στιγμές μετά από μια μεγάλη διαταραχή στο σύστημα, ο έλεγχος αδρανειακής απόκρισης θα δράσει αμέσως παρέχοντας ταχύτατη απόκριση όσον αφορά στην ισχύ εξόδου και θα αυξήσει αποτελεσματικά τη συνολική αδράνεια όλου του συστήματος. Ωστόσο, αυτό το φαινόμενο είναι παροδικό. Ο έλεγχος στατισμού, αντίθετα, παρέχει μόνιμη απόκριση και συνεισφέρει στη συντονισμένη ρύθμιση συχνότητας-φορτίου του συστήματος.

Για τον έλεγχο της συχνότητας έχουμε λοιπόν δύο παράλληλα στάδια ελέγχου. Στον έλεγχο αδρανειακής απόκρισης παραγωγίζεται η συχνότητα ως προς το χρόνο και πολλαπλασιάζεται με την σταθερά  $2H_{WT}$ . Τέλος, πολλαπλασιάζουμε το γινόμενο αυτό με την ίδια τη συχνότητα και προκύπτει η σχέση  $\Delta P_{inertia}^{WT} = -2H_{WT} \frac{df}{dt} f$ . Η σταθερά  $H_{WT}$  για τη συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια είναι ίση με 0.62. Στον έλεγχο στατισμού η συχνότητα συγκρίνεται με την ονομαστική της τιμή (50Hz) και το σφάλμα που προκύπτει

πολλαπλασιάζεται με τη σταθερά  $K_{droop}$  αφού πρώτα περάσει από μια νεκρή ζώνη (dead band). Η νεκρή ζώνη κυμαίνεται γύρω από τα 50Hz κι έχει εύρος 0.4Hz (49.8Hz-50.2Hz). Η σταθερά  $K_{droop}$  έχει τεθεί ίση με 25 ( $R=4$ ). Έτσι κι εδώ προκύπτει η σχέση  $\Delta P_{droop}^{WT} = K_{droop} (f - f_0)$ . Στη συνέχεια, τα σήματα από τα δύο στάδια ελέγχου προστίθενται και πολλαπλασιάζονται με μια σταθερά, ίση με 1/375, ώστε να μετατραπούν σε ανά μονάδα ισχύ. Το αποτέλεσμα αφαιρείται από την μετρούμενη ισχύ που αποτελεί είσοδο του ελεγκτή. Με τον τρόπο αυτό προσπαθούμε να «ξεγελάσουμε» τον ελεγκτή δίνοντας του διαφορετική τιμή μετρούμενης ενεργού ισχύος. Έτσι σε περίπτωση πτώσης της συχνότητας ο ελεγκτής θα έχει ως είσοδο ενεργό ισχύ μικρότερη από την μετρούμενη και θα μεταβάλλει ανάλογα το duty cycle έτσι ώστε να την αυξήσει. Το αντίθετο θα γίνει σε περίπτωση αύξησης της συχνότητας. Η απόκριση του ελεγκτή συχνότητας γίνεται πολύ πιο γρήγορη, αφού μέσω του pitch ελεγκτή έχουμε αργή μεταβολή της παρεχόμενης ενεργού ισχύος και δεν θα υποστηριζόταν η συχνότητα για το μικρό συνήθως διάστημα που διαταράσσεται. Το αποτέλεσμα του συνδυασμένου ελέγχου προστίθεται στην ισχύ αναφοράς του pitch ρυθμιστή. Αρχικά η ισχύς αναφοράς δεν έχει τεθεί 1pu όπως προβλέπεται ώστε να αποδίδεται η ονομαστική τιμή της ενεργού ισχύος αλλά έχει μικρότερη τιμή. Με τον τρόπο αυτό διατηρείται το «απόθεμα» ισχύος. Έτσι για παράδειγμα, αν η τιμή αυτή είναι ίση με 0.8 η γωνία βήματος της έλικας είναι τέτοια ώστε η ανεμογεννήτρια να παρέχει το 80% της διαθέσιμης ενεργού ισχύος, διατηρείται δηλαδή ένα 20% για «απόθεμα» ισχύος. Βάσει του παραπάνω συστήματος ελέγχου ακολουθείται ο παρακάτω τυπικός κώδικας για τον έλεγχο της συχνότητας[21].

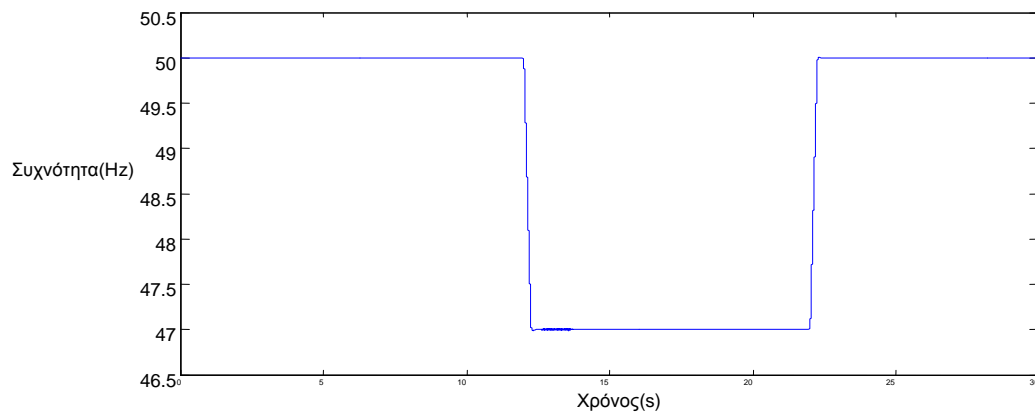


Σχήμα 6.1.4.Τυπική καμπύλη για ρύθμιση της ενεργού ισχύος συναρτήσει της συχνότητας.

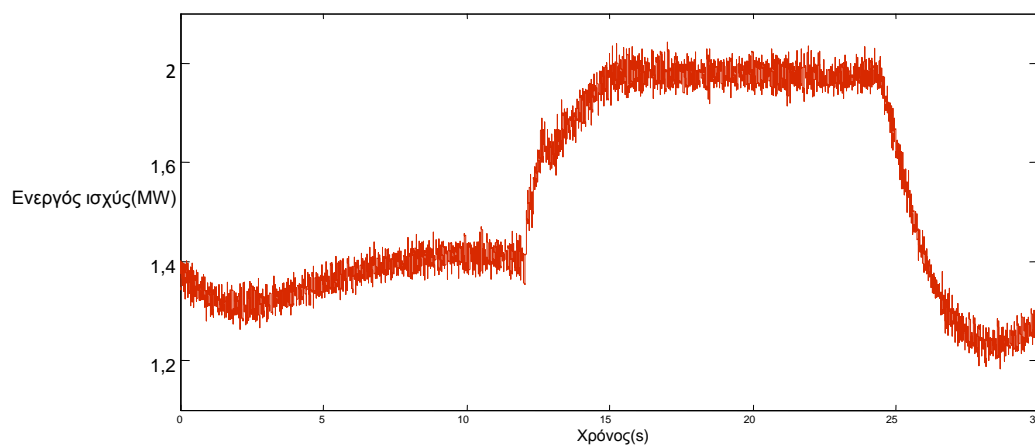
Η ελάχιστη συχνότητα είναι τα 47 Hz και η μέγιστη τα 52Hz. Για συχνότητες έξω από το διάστημα 47-52 Hz η ανεμογεννήτρια αποσυνδέεται από το δίκτυο μέσω ενός διακόπτη και ενεργοποιείται το φορτίο έκτακτης ανάγκης.

Έτσι λοιπόν η ανεμογεννήτρια λειτουργεί παρέχοντας το 80% της διαθέσιμης ισχύος για ονομαστική τιμή συχνότητας, ενώ φτάνει στο 100% όταν η συχνότητα παρουσιάζει πτώση στα 47 Hz και στο 70% όταν παρουσιάζει άνοδο στα 52 Hz.

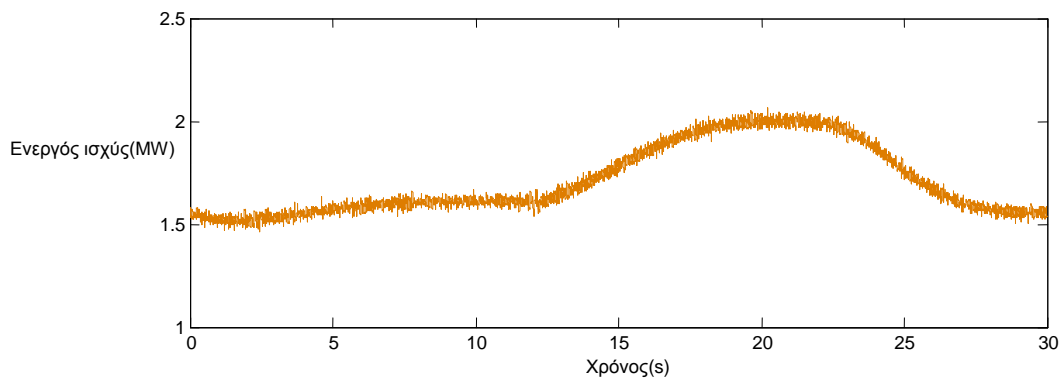
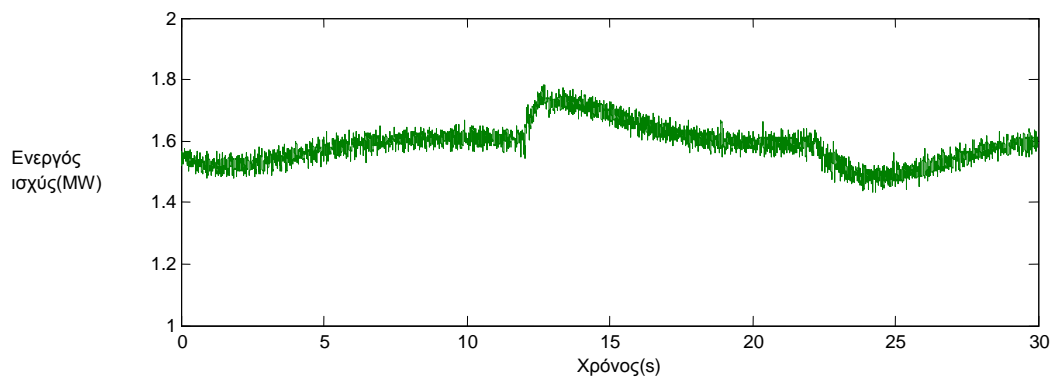
Εξετάζουμε έτσι την απόκριση του ελεγκτή για διάφορες πτώσεις της συχνότητας. Η ταχύτητα είναι σταθερή και ίση με 15m/s και η διαταραχή της συχνότητας είναι από τα 12 ως τα 22 δευτερόλεπτα.



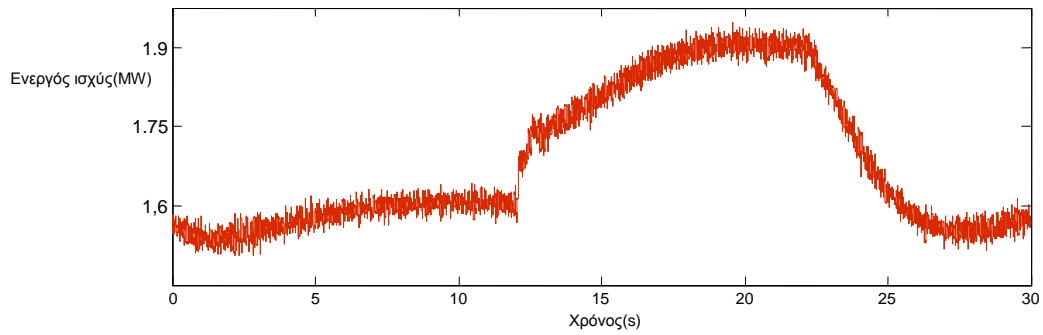
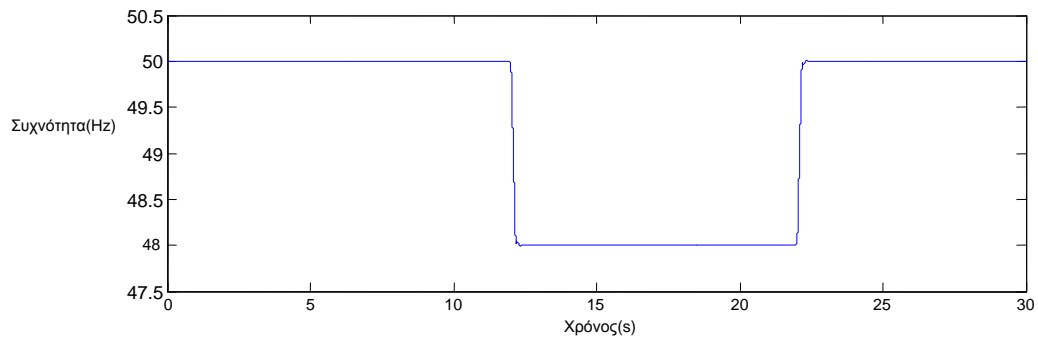
Σχήμα 6.1.5. Συχνότητα που επιβάλλεται από το δίκτυο-Πτώση συχνότητας στα 47 Hz.



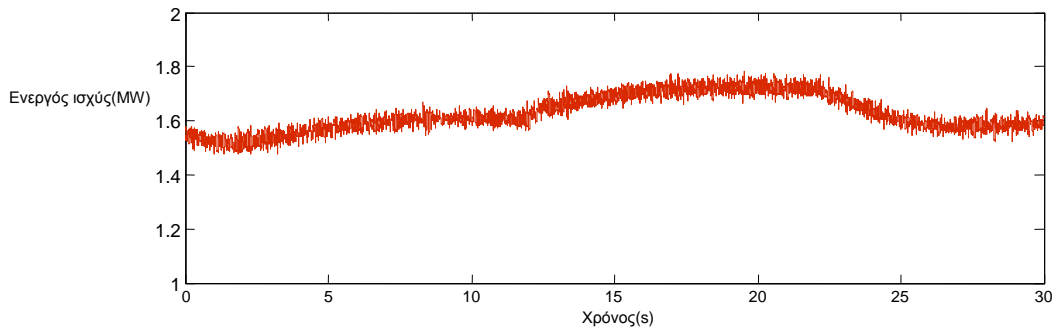
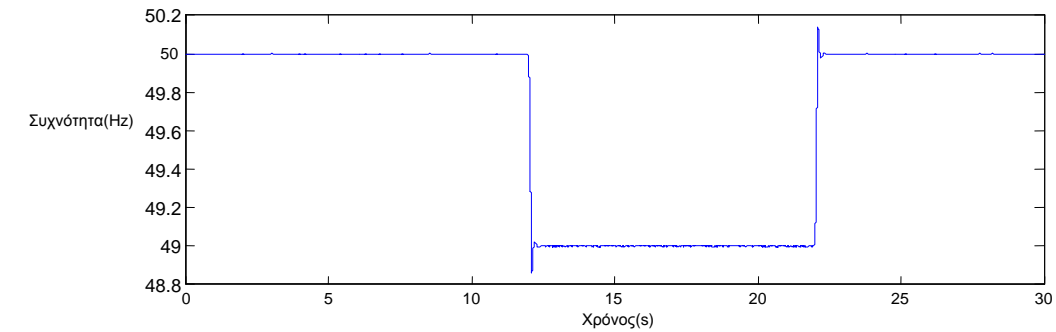
Σχήμα 6.1.6. Ενεργός ισχύς που παρέχεται στο δίκτυο.



Σχήμα 6.1.7.Ενεργός ισχύς που παρέχεται στο δίκτυο πάνω: με μεμονωμένο έλεγχο αδρανειακής απόκρισης και κάτω: με μεμονωμένο έλεγχο στατισμού.



Σχήμα 6.1.8. Πτώση συχνότητας στα 48Hz και παρεχόμενη ενεργός ισχύς.



Σχήμα 6.1.9. Πτώση συχνότητας στα 49Hz και παρεχόμενη ενεργός ισχύς.

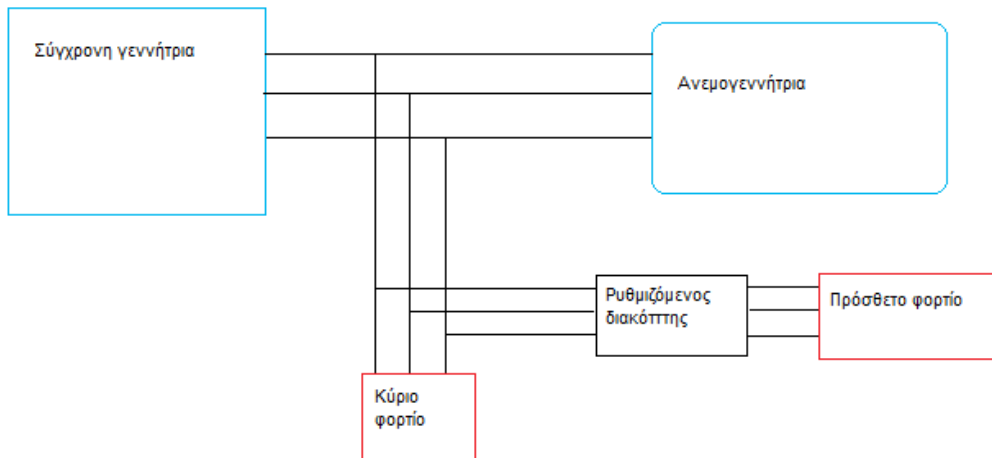
Ο ελεγκτής παρέχει την επιθυμητή ενεργό ισχύ όπως φαίνεται από τα παραπάνω παραδείγματα, τόσο σε πτώση όσο και σε άνοδο της συχνότητας. Μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε, ειδικά για πτώση στα 47Hz και στα 48Hz όπου έχουμε πιο απότομη μεταβολή, τη συνεισφορά του ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης καθώς εγχέεται άμεσα ενεργός ισχύς στο δίκτυο και στη συνέχεια σταθεροποιείται μέσω της σταθερής συνεισφοράς του ελεγκτή στατισμού. Επίσης, στο σχήμα 6.1.8 είναι εμφανής η αυτή η διαφορά στη συνεισφορά των δύο ελεγκτών όπως και η αναγκαιότητα χρήσης συνδυασμένου ελέγχου καθώς ο έλεγχος αδρανειακής απόκρισης δρα άμεσα στην μεταβολή της συχνότητας σε αντίθεση με τον έλεγχο στατισμού που παρέχει πιο καθυστερημένη υποστήριξη.

Για την εξαγωγή καλύτερων αποτελεσμάτων υλοποιήθηκε επίσης ένα μοντέλο που περιλαμβάνει την υπό μελέτη ανεμογεννήτρια, μια σύγχρονη γεννήτρια με τύλιγμα διέγερσης και δύο τριφασικά φορτία: ένα συνδεδεμένο διαρκώς στην ανεμογεννήτρια και τη σύγχρονη γεννήτρια και ένα δεύτερο, το οποίο καταναλώνει μικρότερη ισχύ και συνδέεται μετά από χρονικό διάστημα 30 δευτερολέπτων. Η σύγχρονη γεννήτρια τροφοδοτεί τα φορτία συνεχώς με 475 kW. Το πρώτο φορτίο καταναλώνει ισχύ 2MW ενώ το δεύτερο 200 kW.

<b>Σύγχρονη γεννήτρια</b>	<b>475 kW</b>
<b>Ανεμογεννήτρια</b>	<b>1,525 MW</b>
<b>Αρχικό φορτίο</b>	<b>2MW</b>
<b>Τελικό φορτίο</b>	<b>2,2MW</b>

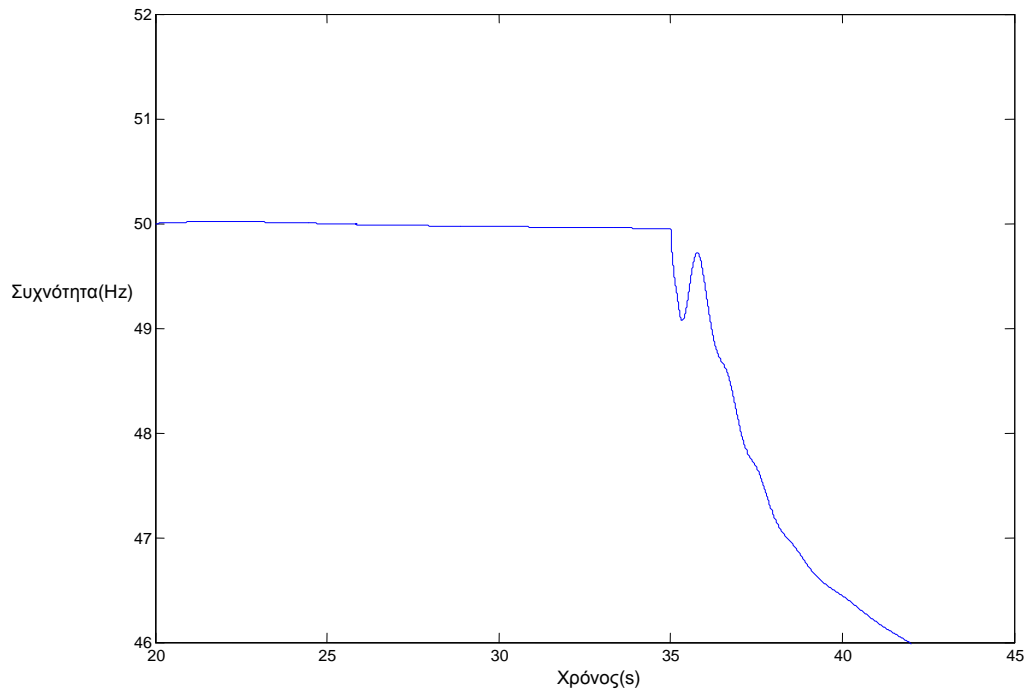
Πίνακας 6.1: Παροχή και ζήτηση ισχύος.

Λαμβάνονται αποτελέσματα χωρίς την υποστήριξη του συστήματος ελέγχου αλλά και με την υποστήριξη αυτού έτσι ώστε να είναι δυνατή η αποκόμιση ολοκληρωμένης εικόνας της συνεισφοράς του. Το μοντέλο που υλοποιήθηκε φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 6.1.10. Μοντέλο ανεμογεννήτριας-σύγχρονης γεννήτριας-φορτίων.

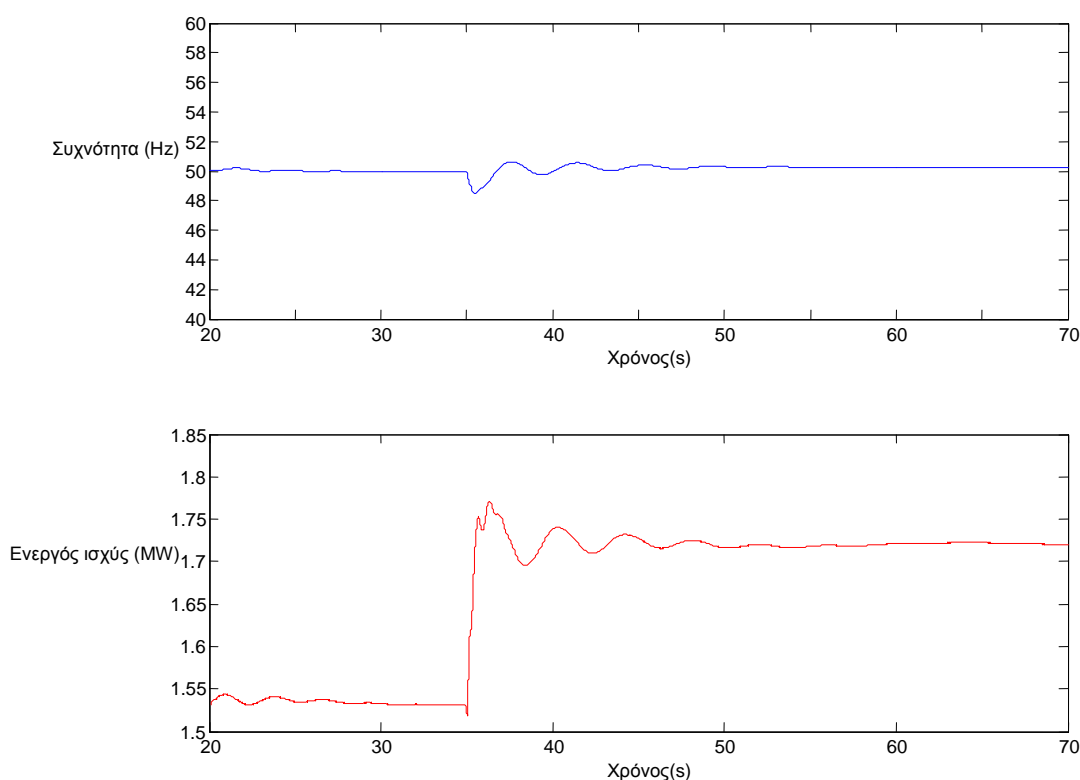
Η προσομοίωση ξεκινά με την υποστήριξη του συστήματος ελέγχου ώστε να σταθεροποιηθεί η συχνότητα και στα 35 δευτερόλεπτα, όταν συνδέεται το δεύτερο φορτίο ισχύος 200 kW αποσυνδέεται το σύστημα ελέγχου έτσι ώστε να παρατηρηθεί η συμπεριφορά του μοντέλου χωρίς αυτό.



Σχήμα 6.1.11. Συχνότητα συστήματος χωρίς υποστήριξη.

Παρατηρούμε λοιπόν ότι με την σύνδεση του δεύτερου φορτίου το μοντέλο μεταπίπτει σε αστάθεια καθώς υπάρχει ζήτηση ενεργού ισχύος χωρίς να μπορεί να προσφερθεί. Αξίζει να σημειωθεί ότι το μοντέλο αυτό είναι πολύ ασταθές καθώς περιλαμβάνει μόνο δύο παρόχους ισχύος και δύο φορτία, επομένως οι οποιεσδήποτε διαταραχές γίνονται εμφανείς σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό. Έτσι βλέπουμε την ραγδαία πτώση της συχνότητας στο 35ο δευτερόλεπτο με την αύξηση της ζήτησης ισχύος. Το μοντέλο αδυνατεί να υποστηρίξει τη συχνότητα. Είναι απαραίτητο να σημειωθεί ότι στη συγκεκριμένη προσομοίωση δεν έχει ληφθεί υπόψη ο διακόπτης που αποσυνδέει την ανεμογεννήτρια για συχνότητα μικρότερη των 47 Hz έτσι ώστε να φανεί ολοκληρωμένα η αδυναμία του μοντέλου.

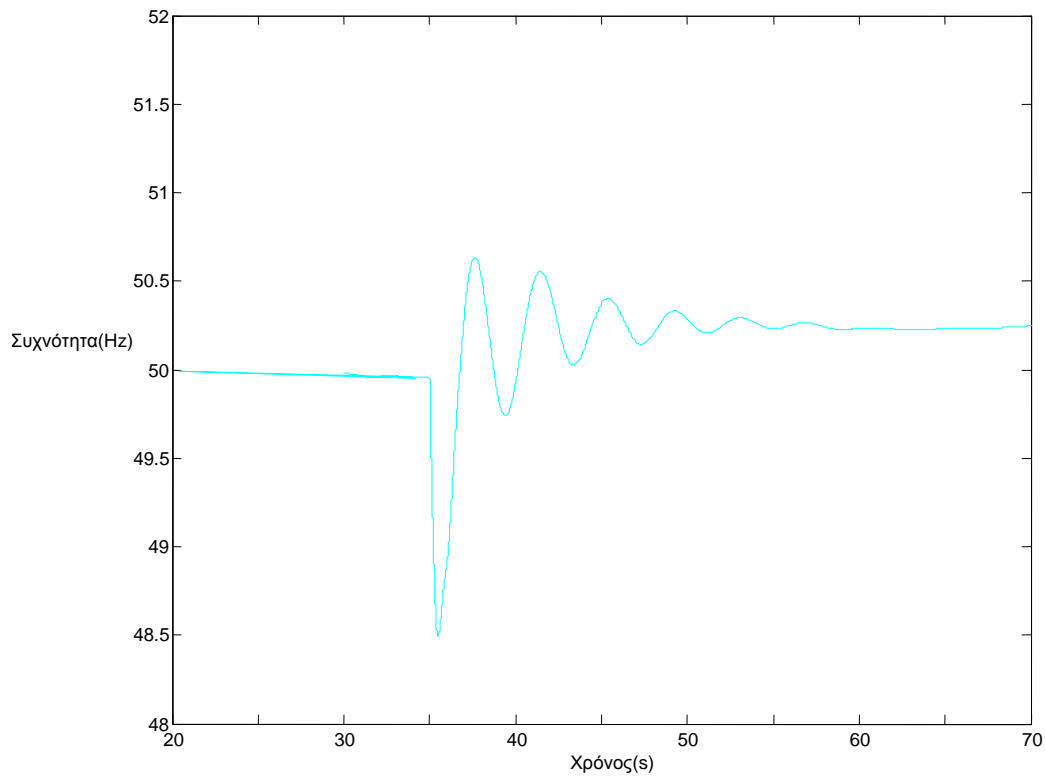
Αντίθετα, τα παρακάτω διαγράμματα έχουν ληφθεί με την υποστήριξη του συστήματος ελέγχου. Η συχνότητα στα 35 δευτερόλεπτα παρουσιάζει μια μικρή πτώση στα 48,5 περίπου Hz αλλά στη συνέχεια σταθεροποιείται στα 50,2Hz. Αυτό οφείλεται στη υποστήριξη του συστήματος ελέγχου, το οποίο αναγνωρίζει την πτώση της συχνότητας και αποκρίνεται τόσο μέσω του ελέγχου αδρανειακής απόκρισης όσο και μέσω του ελέγχου στατισμού. Όπως φαίνεται από την καμπύλη της ισχύος αμέσως μετά τη διαταραχή η ισχύς αυξάνεται άμεσα λόγω του ελέγχου αδρανειακής απόκρισης ενώ στη συνέχεια παραμένει σε υψηλά επίπεδα λόγω του ελέγχου στατισμού.



Σχήμα 6.1.12. Πάνω: Συχνότητα συστήματος με υποστήριξη και

Κάτω: Παρεχόμενη ενεργός ισχύς από την ανεμογεννήτρια.

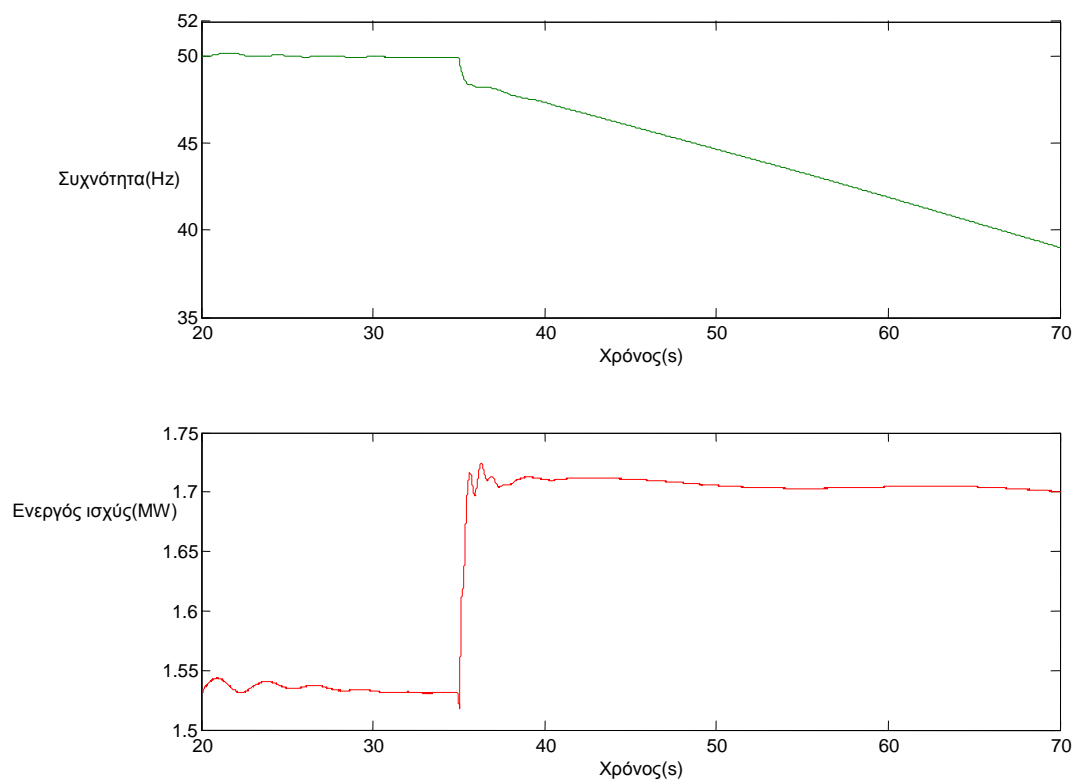




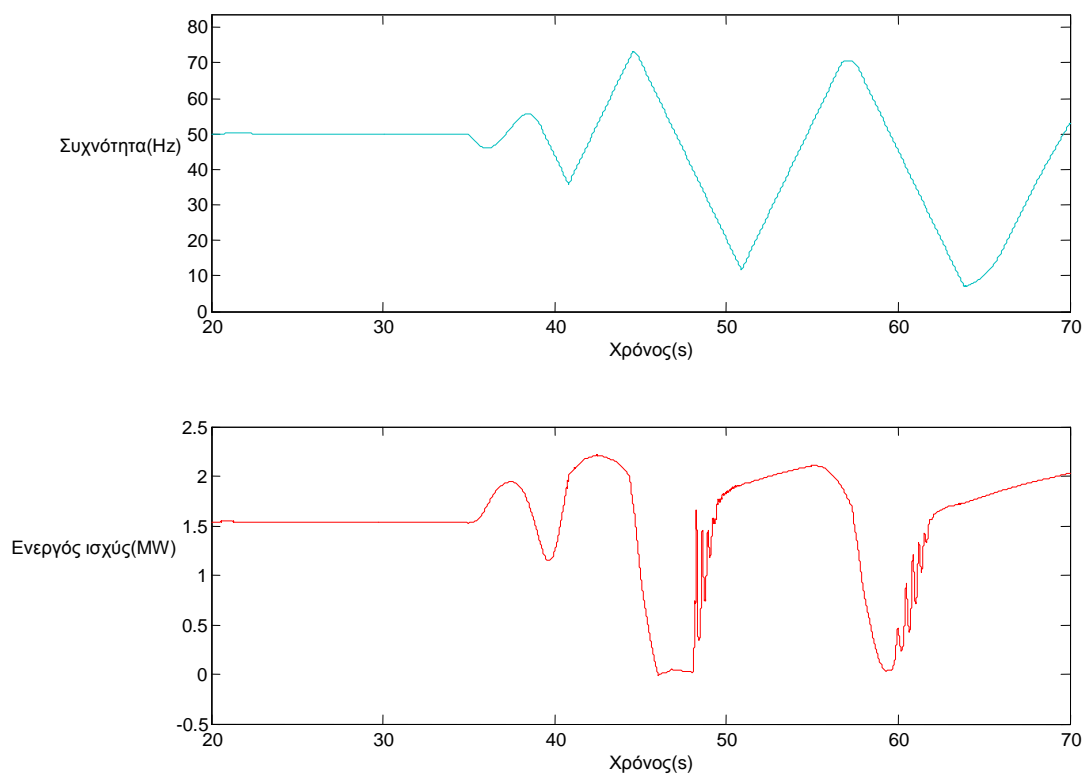
Σχήμα 6.1.13. Συχνότητα συστήματος με υποστήριξη.

Η ανεμογεννήτρια στα πρώτα 35 δευτερόλεπτα δεν παρέχει ολόκληρο ποσό της ενεργού ισχύος που αντιστοιχούν στο 80% καθώς θα ήταν περισσότερο από το ζητούμενο και η συχνότητα θα αυξανόταν πέρα των 50 Hz. Δρα με λίγα λόγια το σύστημα ελέγχου ώστε να σταθεροποιηθεί η συχνότητα στα 50 Hz για τη συνδυασμένη προσφορά ανεμογεννήτριας και σύγχρονης γεννήτριας. Επίσης, με την προσθήκη του επιπλέον φορτίου το σύστημα ελέγχου δρα σύμφωνα με το σχήμα 6.1.5.

Στα παρακάτω δύο διαγράμματα μπορούμε να δούμε την συμπεριφορά του μοντέλου με απομονωμένο έλεγχο κατά τη διάρκεια της διαταραχής, αρχικά μόνο με χρήση του ελέγχου αδρανειακής απόκρισης και έπειτα μόνο με χρήση του ελέγχου στατισμού. Στην πρώτη περίπτωση βλέπουμε ότι στις πρώτες χρονικές στιγμές μετά τη διαταραχή το σύστημα ελέγχου προσπαθεί να διατηρήσει τη συχνότητα κοντά στα 50 Hz στη συνέχεια όμως αδυνατεί να το καταφέρει. Αντίθετα, στη δεύτερη περίπτωση το σύστημα έχει πολύ αργή απόκριση κι έτσι έχουμε διαρκείς ταλαντώσεις της συχνότητας γύρω από την τιμή των 50 Hz.



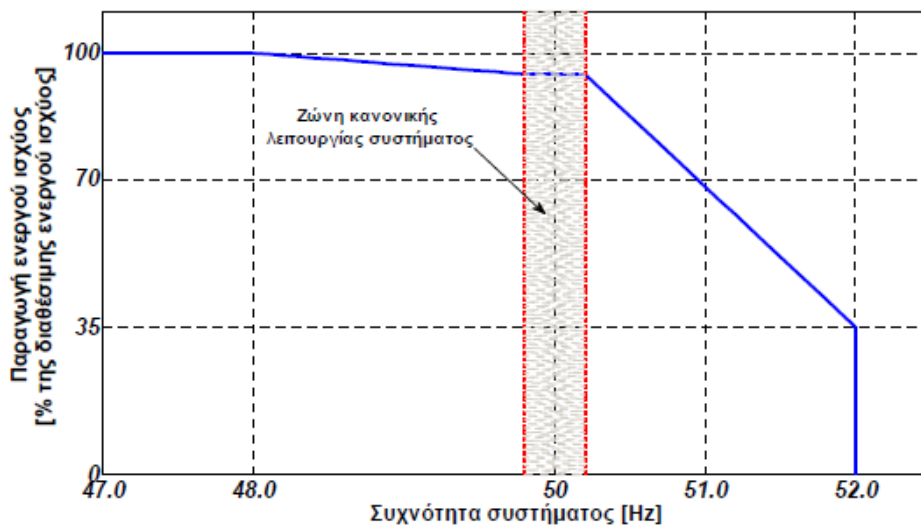
Σχήμα 6.1.14. Συχνότητα συστήματος (πάνω) και παρεχόμενη ισχύς από την ανεμογεννήτρια (κάτω) μόνο με έλεγχο αδρανειακής απόκρισης κατά τη διάρκεια της διαταραχής.



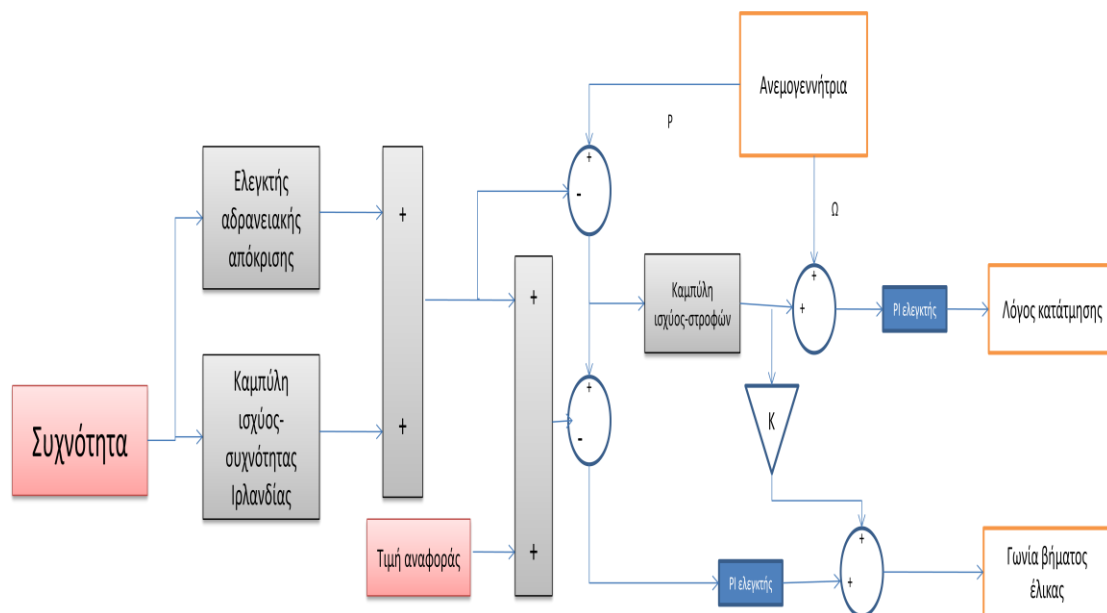
Σχήμα 6.1.15. Συχνότητα συστήματος (πάνω) και παρεχόμενη ισχύς από την ανεμογεννήτρια (κάτω) μόνο με έλεγχο στατισμού κατά τη διάρκεια της διαταραχής.

## 6.2. Ελεγκτής συχνότητας βασισμένος στον Ιρλανδικό κώδικα.

Εκτός από τον ελεγκτή που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η μορφή του pitch ελεγκτή μας δίνει τη δυνατότητα να ρυθμίζουμε την παρεχόμενη στο δίκτυο ενεργό ισχύ άμεσα από την καμπύλη μεταβολής της συναρτήσεως της συχνότητας του συστήματος. Η κάθε χώρα έχει διαφορετική τέτοια καμπύλη ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου. Για την υλοποίηση του συγκεκριμένου ελεγκτή χρησιμοποιήθηκε η καμπύλη από τον Ιρλανδικό κώδικα, αλλά μπορεί να αντικατασταθεί από καμπύλη οποιασδήποτε χώρας.



Σχήμα 6.2.1. Καμπύλη μεταβολής ενεργού ισχύος συναρτήσει της συχνότητας του συστήματος για τον Ιρλανδικό κώδικα[21].

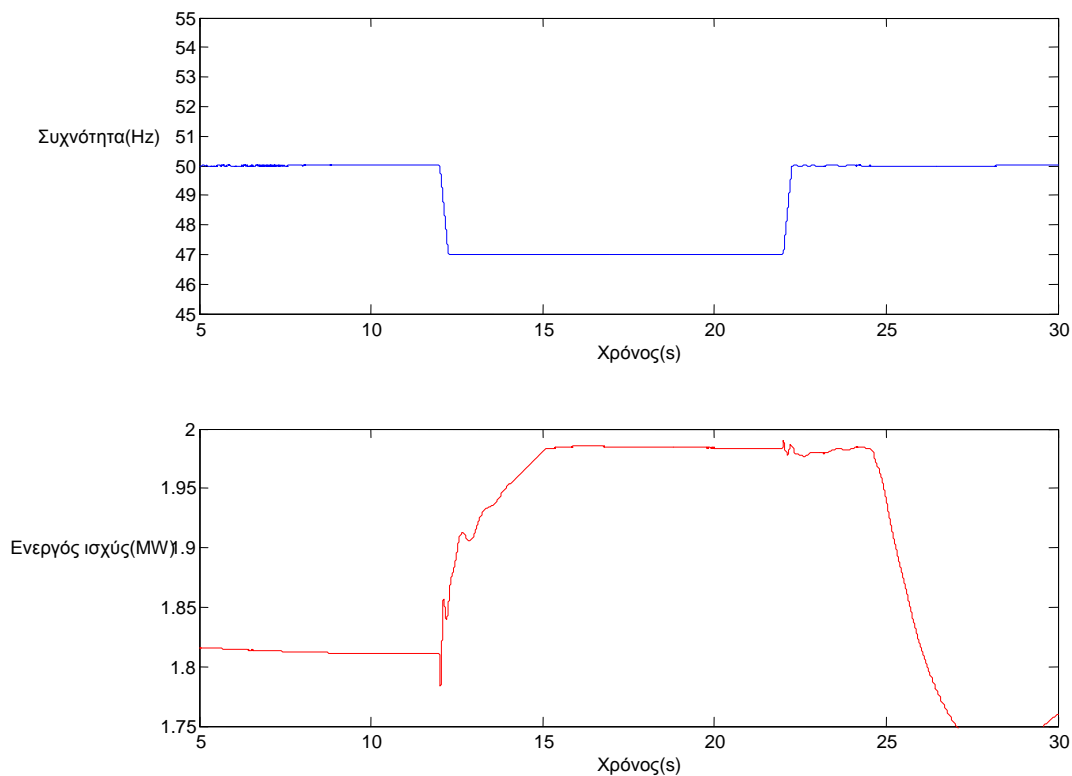


Σχήμα 6.2.2. Έλεγχος στο μοντέλο προσομοίωσης.

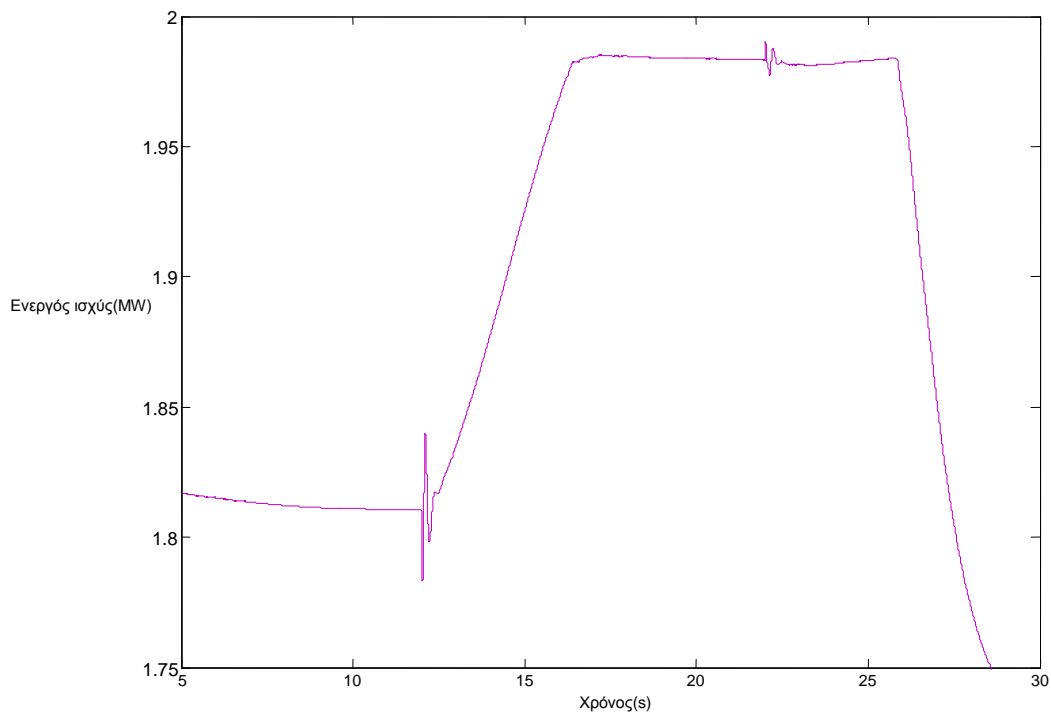
Σε αυτή την μέθοδο ελέγχου και βάσει της καμπύλης ο pitch ελεγκτής εφόσον δεν υπάρχουν διαταραχές της συχνότητας λειτουργεί έτσι ώστε να παρέχεται το 90% της διαθέσιμης ισχύος. Η συχνότητα μέσω ενός πίνακα μετατρέπεται στο ποσοστό της ισχύος που πρέπει να προστεθεί ή να αφαιρεθεί από το 90%. Για παράδειγμα εάν η συχνότητα είναι 51Hz η τιμή που θα δοθεί από τον πίνακα στον αθροιστή θα είναι -0.2. Έτσι θα ρυθμιστεί η κλίση των πτερυγίων ώστε να δίνεται το 70% της διαθέσιμης ισχύος. Η νεκρή ζώνη που φαίνεται στην καμπύλη υλοποιείται επίσης μέσω του πίνακα, αφού για τιμές της συχνότητας από 49.8 Hz ως 50.2 Hz η αντίστοιχη τιμή του πίνακα είναι μηδέν. Ο συγκεκριμένος ελεγκτής υλοποιείται σε συνδυασμό με τον ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης

καθώς δεν μπορεί να παρέχει άμεση υποστήριξη σε απότομες μεταβολές της συχνότητας. Στην ουσία δηλαδή αποτελεί έναν ελεγκτή στατισμού με μεγαλύτερο προσόν του το γεγονός ότι είναι απόλυτα ακριβής καθώς και ότι μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί η καμπύλη ελέγχου ισχύος-συχνότητας οποιασδήποτε χώρας, κάτι που είναι αρκετά δυσκολότερο στον προηγούμενο ελεγκτή στατισμού. Για συχνότητες έξω από το διάστημα 47-52 Hz η ανεμογεννήτρια αποσυνδέεται από το δίκτυο μέσω ενός διακόπτη και ενεργοποιείται το φορτίο έκτακτης ανάγκης όπως και με τον προηγούμενο ελεγκτή.

Για διάφορες μεταβολές της συχνότητας λαμβάνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα. Η ταχύτητα είναι σταθερή και ίση με 15m/s και η διαταραχή της συχνότητας είναι από τα 12 ως τα 22 δευτερόλεπτα.



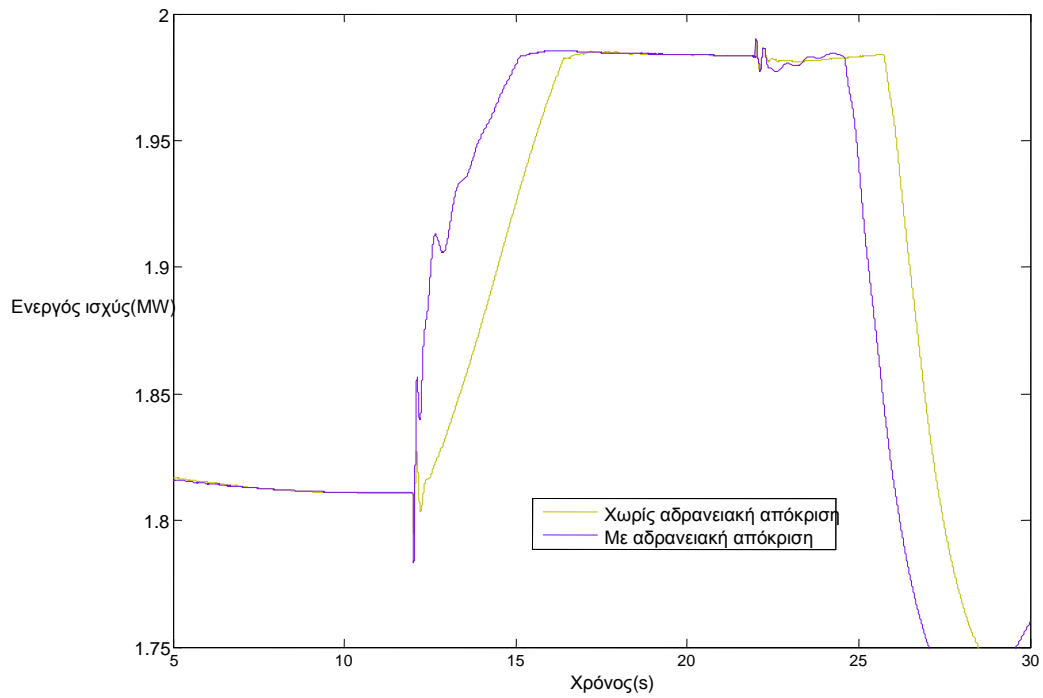
Σχήμα 6.2.3. Πτώση συχνότητας στα 47Hz και παρεχόμενη ενεργός ισχύς.



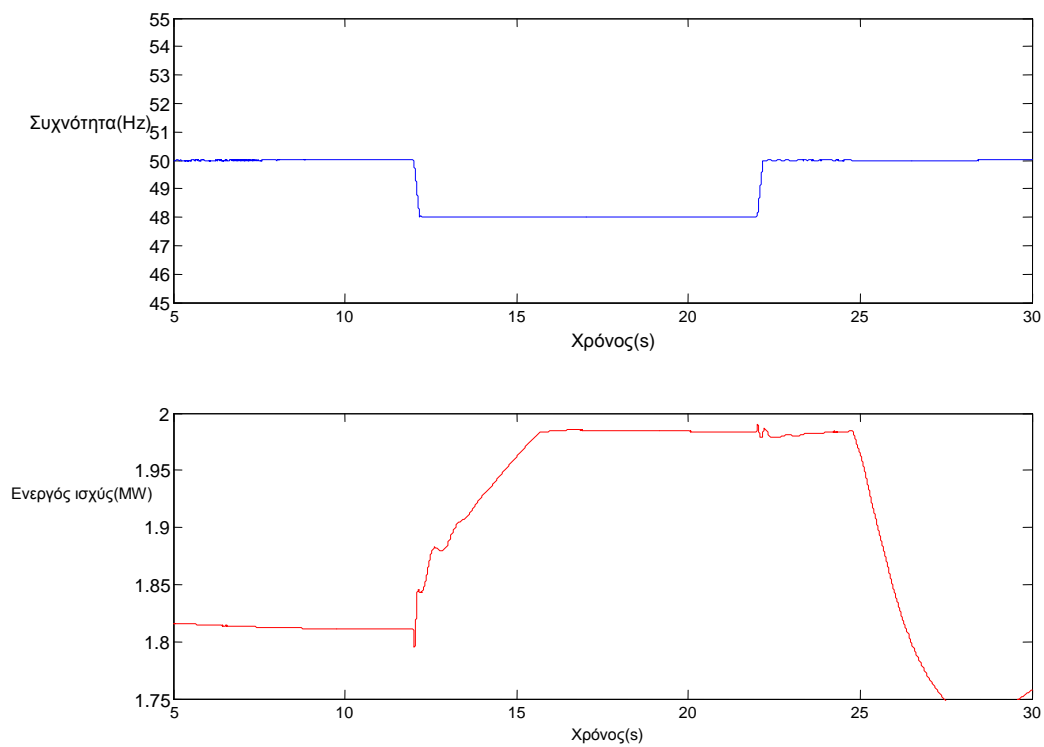
Σχήμα 6.2.4.Ενεργός ισχύς που παρέχεται στο δίκτυο χωρίς τον ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης.

Βλέπουμε ότι και χωρίς την υποστήριξη του ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης το αποτέλεσμα είναι άκρως ικανοποιητικό. Ωστόσο, κατά τις πρώτες στιγμές αμέσως μετά τη διαταραχή ο ελεγκτής αδρανειακής απόκρισης παρέχει μια πρόσθετη υποστήριξη η οποία μπορεί να αποβεί καθοριστική διατηρώντας τη συχνότητα στα επιτρεπτά επίπεδα έτσι ώστε στη συνέχεια να ρυθμιστεί πλήρως μέσω του ελεγκτή στατισμού. Επίσης, μετά το πέρας της διαταραχής παρατηρούμε ότι η ισχύς δεν επανέρχεται άμεσα στα προηγούμενα επίπεδα όπως έπρεπε. Καλύτερη εικόνα έχουμε μέσω του παρακάτω

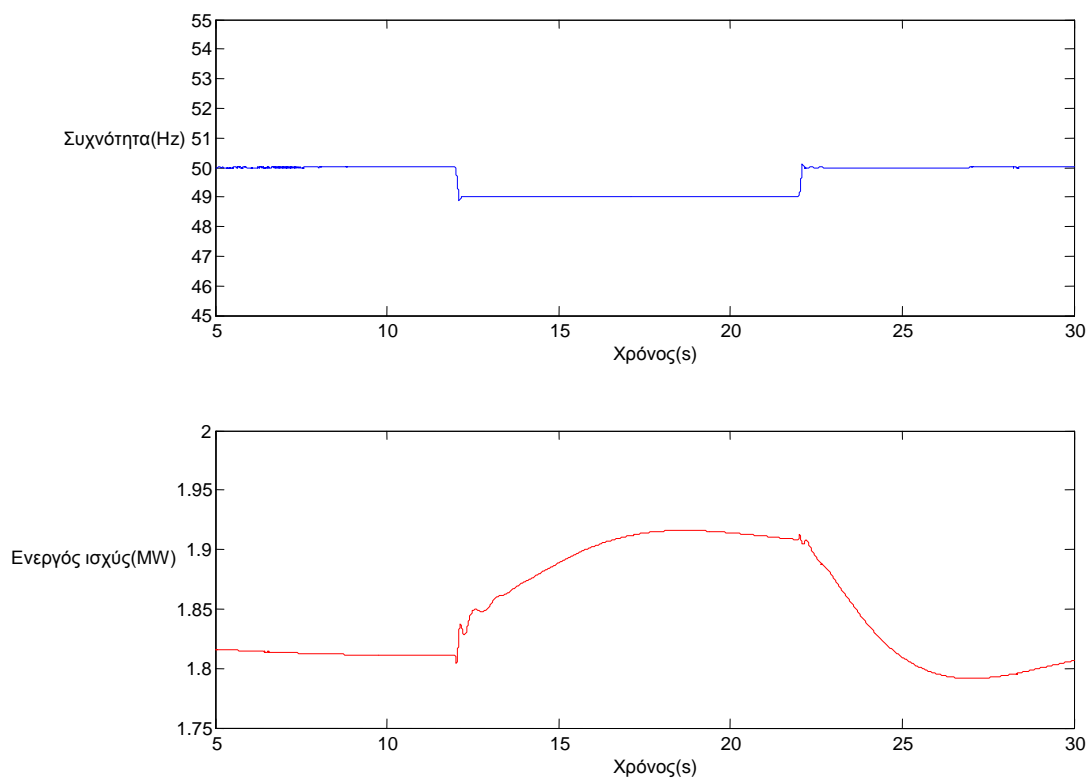
διαγράμματος.



Σχήμα 6.2.5.Ενεργός ισχύς που παρέχεται στο δίκτυο χωρίς και με τον ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης.



Σχήμα 6.2.6.Πτώση συχνότητας στα 48Hz και παρεχόμενη ενεργός ισχύς.



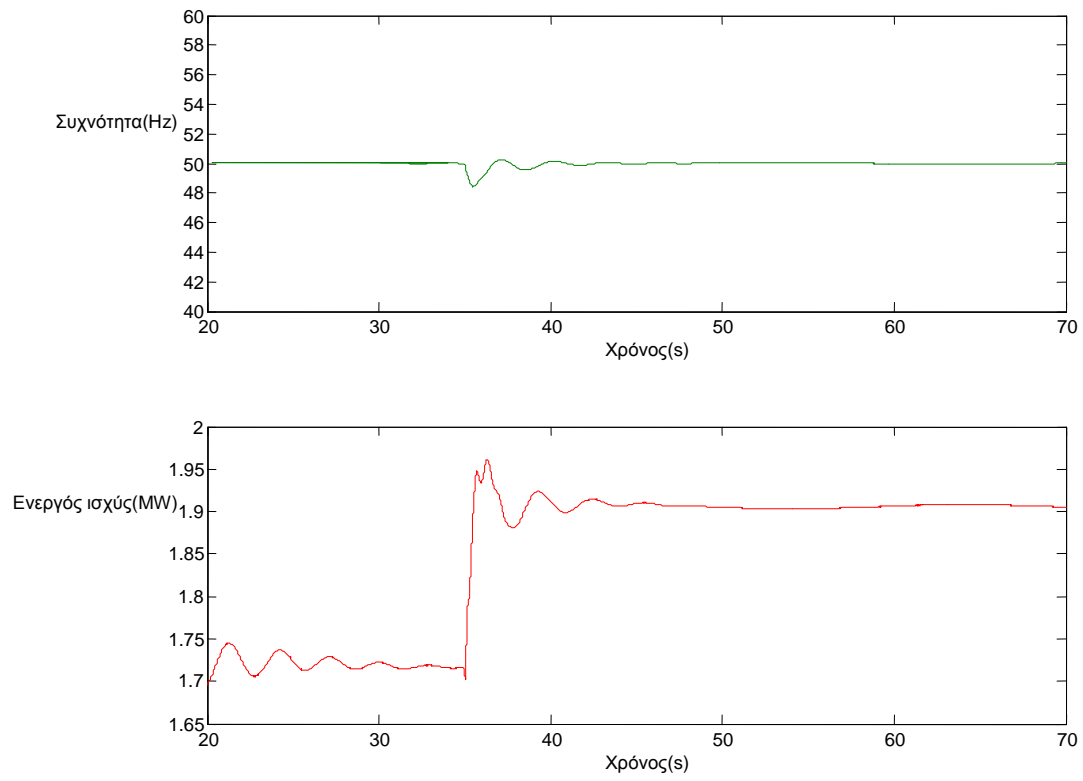
Σχήμα 6.2.7. Πτώση συχνότητας στα 49Hz και παρεχόμενη ενεργός ισχύς.

Για περαιτέρω επιβεβαίωση της λειτουργίας του συστήματος ελέγχου έγινε προσομοίωση με το μοντέλο του σχήματος 6.1.10 σύμφωνα με τις παρακάτω παραμέτρους.

<b>Σύγχρονη γεννήτρια</b>	<b>475 kW</b>
<b>Ανεμογεννήτρια</b>	<b>1,725 MW</b>
<b>Αρχικό φορτίο</b>	<b>2.2 MW</b>
<b>Τελικό φορτίο</b>	<b>2.4 MW</b>

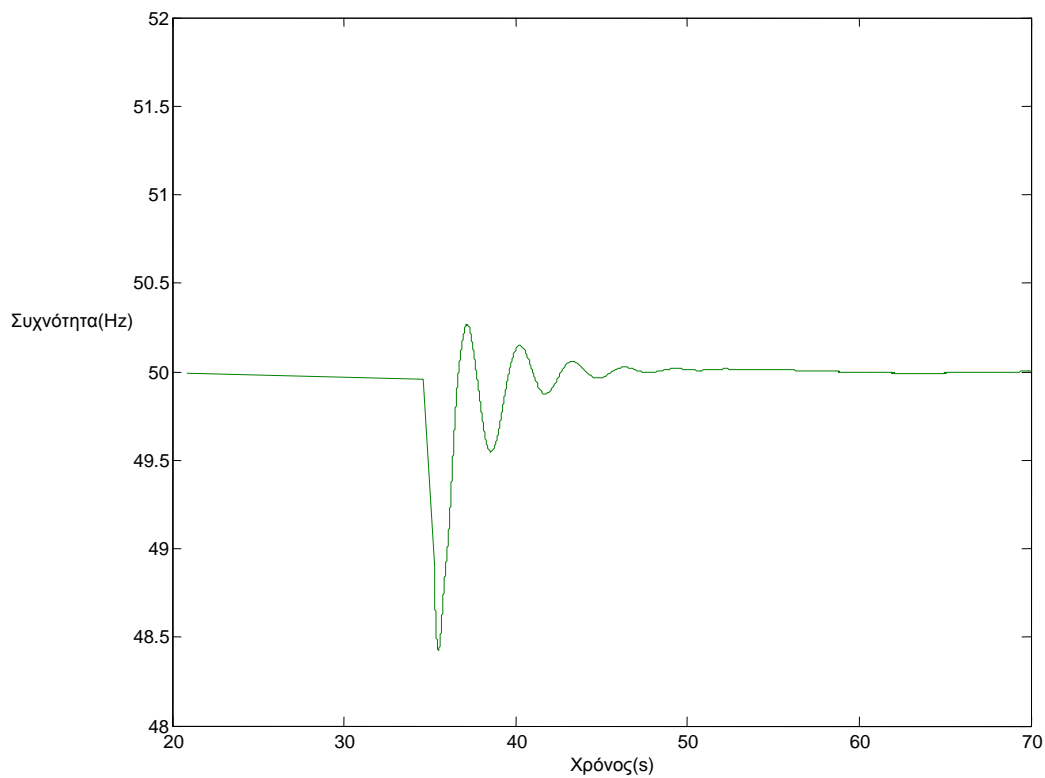
Πίνακας 6.2: Παροχή και ζήτηση ισχύος.





Σχήμα 6.2.8. Πάνω: Συχνότητα συστήματος με υποστήριξη και

Κάτω: Παρεχόμενη ενεργός ισχύς από την ανεμογεννήτρια.



Σχήμα 6.2.9. Συχνότητα συστήματος με υποστίριξη.

Μπορούμε λοιπόν να παρατηρήσουμε την πολύ καλή συμπεριφορά του συστήματος ελέγχου, το οποίο παρουσιάζει πολύ μεγάλη ακρίβεια και σταθερότητα. Αξίζει να σημειωθεί ότι για να αυξηθεί ακόμα περισσότερο η ταχύτητα απόκρισης μπορεί να αυξηθεί ο ρυθμός μεταβολής της κλίσης των πτερυγίων. Ωστόσο, κάτι τέτοιο θα μπορούσε να επιφέρει ραγδαία καταπόνηση των πτερυγίων.

### 6.3. Έλεγχος συχνότητας στο ηλεκτρικό δίκτυο της Κύθνου.

#### 6.3.1. Εισαγωγή.

Για την εφαρμογή του συστήματος ελέγχου χρησιμοποιήθηκε το ηλεκτρικό δίκτυο της Κύθνου. Η Κύθνος βρίσκεται στις Δυτικές Κυκλάδες και είναι ένα σχετικά μικρό νησί. Χάρτης της παρουσιάζεται στο σχήμα 6.3.1.



Σχήμα 6.3.1.1.Χάρτης της Κύθνου.

Η επιλογή της Κύθνου μόνο τυχαία δεν ήταν καθώς το δίκτυο της παρουσιάζει έντονη αιολική διεύθυνση αλλά και γενικά πολλές καινοτόμες εφαρμογές έχουν δοκιμαστεί στο συγκεκριμένο δίκτυο. Το πρώτο αιολικό πάρκο της Ευρώπης με 5 ανεμογεννήτριες των 20 kW εγκαταστάθηκε στην Κύθνο το 1982 ενώ ένα χρόνο αργότερα εγκαταστάθηκε και φωτοβολταϊκό πάρκο ισχύος 100 kWp. Ακόμα στο νησί βρίσκονται οι πειραματικές εγκαταστάσεις του Ευρωπαϊκού προγράμματος MOREMICROGRIDS. Συγκεκριμένα έχουν τοποθετηθεί στον όρμο της Γαϊδουρομάντρας και η υλοποίησή τους έγινε με τη βοήθεια κι άλλων ερευνητικών προγραμμάτων.

### 6.3.2. Το ιστορικό του συστήματος στην Κύθνο.

Το δίκτυο χαμηλής τάσης του νησιού υποδέχτηκε το πρώτο αιολικό πάρκο της Ευρώπης καθώς και ένα φωτοβολταϊκό πάρκο, ίδιας ισχύος 100 kW μέσα στη διετία 1982-83. Μέχρι τότε το δίκτυο απαρτιζόταν μόνο από γεννήτριες ντήζελ. Η ισχυρή διεύθυνση της αιολικής και φωτοβολταϊκής παραγωγής είχε σκοπό την εξέταση διάφορων τεχνικών ελέγχου έτσι ώστε να γίνει δυνατή η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών

ενέργειας σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο και ειδικά στο δίκτυο της Κύθνου, τα συστήματα τροφοδοσίας του οποίου ήταν χαμηλής χωρητικότητας.

Το σύστημα τροφοδοσίας ενέργειας του νησιού παρά την συνεχή αύξηση των ενεργειακών απαιτήσεων βελτιωνόταν συνεχώς με τη βοήθεια αρκετών ερευνητικών προγραμμάτων, χρηματοδοτούμενων από το γερμανικό Υπουργείο Ανάπτυξης και Τεχνολογίας και από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Το αιολικό πάρκο αναβαθμίστηκε το 1989 με την αντικατάσταση των ανεμογεννητριών φτάνοντας τα 165 kW ισχύος. Αντίστοιχα το φωτοβολταϊκό πάρκο εξοπλίστηκε με μπαταρία και το 1993 συνδέθηκε απευθείας με το δίκτυο μέσω ενός αντιστροφέα γερμανικής τεχνολογίας.

Με τη συνεργασία της γερμανικής εταιρείας SMA και της ΔΕΗ αλλά και με τη χρηματοδότηση από το ThermieProgramme ξεκίνησε στα μέσα της δεκαετίας του 90 η εγκατάσταση μιας ανεμογεννήτριας 500kW και η ενσωμάτωση της στο δίκτυο του νησιού. Με την ολοκλήρωση του εγχειρήματος αυτού το 2001 ήταν δυνατή η ηλεκτροδότηση του νησιού αποκλειστικά μέσω ανανεώσιμων πηγών εκτός από τις ώρες αιχμής εφόσον ο άνεμος ήταν ικανοποιητικός. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η ανάπτυξη του συστήματος της Κύθνου.

1982:Εγκατάσταση του πρώτου αιολικού πάρκου της Ευρώπης (5 x 20kW)
1983/84 Εγκατάσταση ενός συστήματος φωτοβολταϊκών ισχύος 100kW με μπαταρία αποθήκευσης
1989 Αλλαγή των ανεμογεννητριών (5x33kW)
1990:Εγκατάσταση ενός νέου, συνδεδεμένου με το δίκτυο μετατροπέα για το σύστημα φωτοβολταϊκών
1998:Εγκατάσταση ανεμογεννήτριας ισχύος 500kW
2000: Λειτουργία με το νέο, πλήρως αυτόματο Αυτόνομο Σύστημα Τροφοδοσίας Ισχύος με μπαταρία αποθήκευσης 500kW
2001:Εγκατάσταση τριών μικρών αυτόνομων υβριδικών συστημάτων και ενός AC φωτοβολταϊκού συστήματος

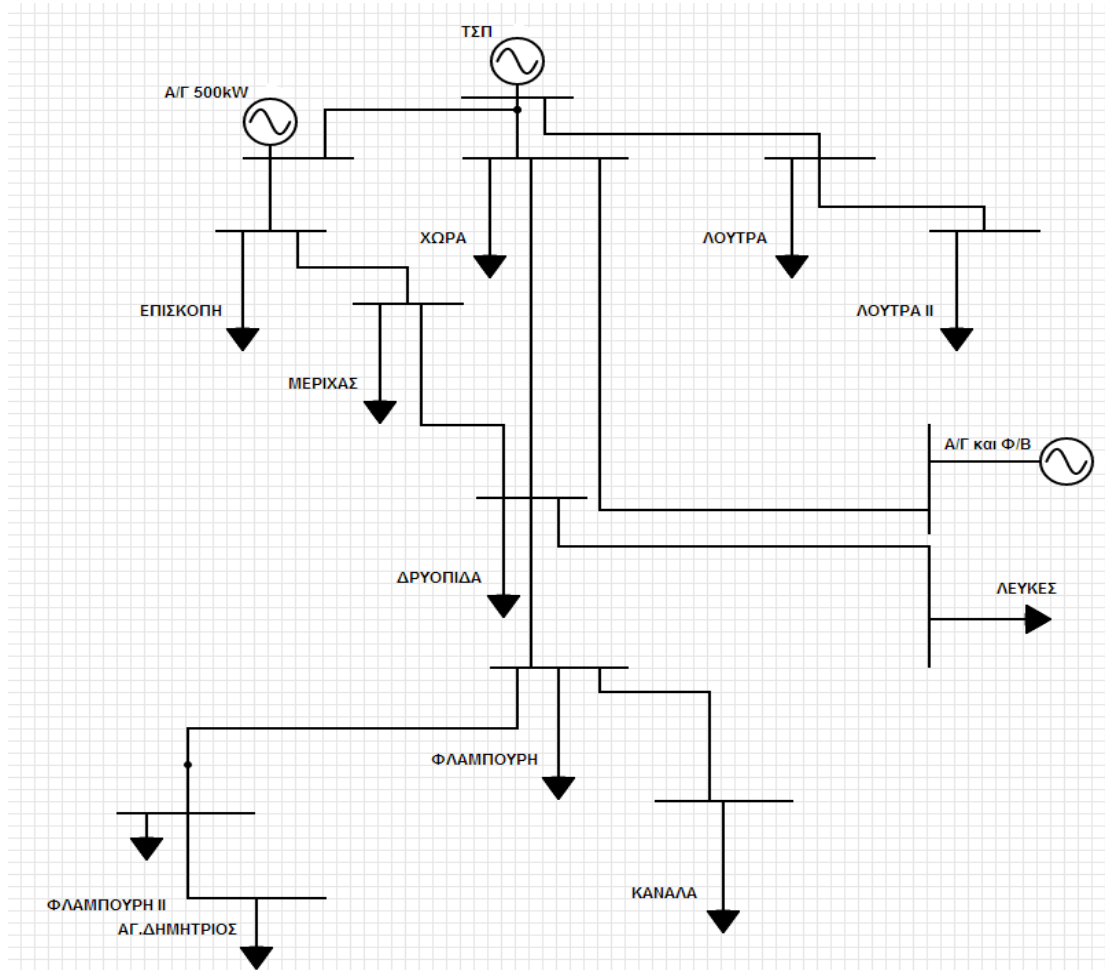
Πίνακας 6.3.Χρονολογική εξέλιξη του συστήματος στην Κύθνο[22].

### **6.3.3.Χαρακτηριστικά του συστήματος για το έτος εφαρμογής 2002.**

Ο πίνακας με τα χαρακτηριστικά του συστήματος καθώς και το μονογραμμικό σχέδιο του δικτύου του νησιού παρουσιάζονται παρακάτω.

Αριθμός	Είδος Μονάδας	Ισχύς
5	Ντηζελογεννήτριες	$5 \cdot 400 = 2000 \text{ kW} / 2500 \text{ kVA}$
1	Ανεμογεννήτρια(Α/Γ)	500kW
5	Α/Γ	$5 \cdot 33 = 165 \text{ kW}$
1	Φ/Β σταθμός	100kW
1	Διάταξη Αποθήκευσης	400kWh/500kW
1	Διάταξη αλλαγής φάσης	600KVA
1	Διάταξη αντιστάθμισης	$8 \cdot 100 = 800 \text{ kVAr}$

Πίνακας 6.4. Χαρακτηριστικά του συστήματος στην Κύθνο[22].



Σχήμα 6.3.3.1.Μονογραμμικό σχέδιο του ηλεκτρικού δικτύου της Κύθνου.

Οι παρακάτω πίνακες παρουσιάζουν στοιχεία για τους μετασχηματιστές μέσης και χαμηλής τάσης του συστήματος καθώς και για τις γραμμές διανομής του νησιού ανάμεσα στους θεωρούμενους κόμβους. Επίσης στον πίνακα 6.7 απεικονίζεται εκτίμηση της κατανομής της ζήτησης για χειμώνα και καλοκαίρι.

<b>Κόμβος</b>	<b>Ισχύς παραγωγής (kW)</b>	<b>ΜΤ/ΧΤ Ισχύς (kVA)</b>
ΤΣΠ	2000	2500
Α/Γ 500	500	630
Α/Γ κ Φ/Β	265(5*33+100)	250+110=360
ΧΩΡΑ		(5*50+4*100+1*150)=800
ΕΠΙΣΚΟΠΗ		(6*50+3*100+1*25)=625
ΜΕΡΙΧΑΣ		(1*25+1*50+2*100+1*250+1*160)=685
ΔΡΥΟΠΙΔΑ		(2*150+3*100+5*50)=850
ΛΟΥΤΡΑ		2*50+1*150=250
ΛΟΥΤΡΑ II		1*50+1*100+1*250=400
ΦΛΑΜΠΟΥΡΗ		2*50+1*100=200
ΦΛΑΜΠΟΥΡΗ II		1*100+250=200
ΚΑΝΑΛΑ		250+150=400
ΑΓ.ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ		(1*50+1*100)=150
ΛΕΥΚΕΣ		300

Πίνακας 6.5. Ισχύς πηγών ενέργειας και μετασχηματιστών του συστήματος στην Κύθνο[22].

Γραμμή	Μήκος (m)	Καλώδιο
ΤΣΠ-Α/Γ500	1600	3*35Cu
ΤΣΠ-ΛΟΥΤΡΑ	1800	3*35 AACC
ΤΣΠ-ΧΩΡΑ	50	3*35 AACC
Α/Γ 500-ΕΠΙΣΚΟΠΗ	2491	3*35Cu
ΛΟΥΤΡΑ-ΛΟΥΤΡΑ II	850	3*35 AACC
ΧΩΡΑ-(Α/Γ- Φ/Β)	1000	3*35AACC
ΧΩΡΑ-ΔΡΥΟΠΙΔΑ	4200	3*35Cu
ΕΠΙΣΚΟΠΗ-ΜΕΡΙΧΑΣ	1619	3*35Cu
ΜΕΡΙΧΑΣ-ΔΡΥΟΠΙΔΑ	2316	3*35Cu
ΔΡΥΟΠΙΔΑ-ΦΛΑΜΠΟΥΡΗ	2446	3*35 AACC
ΔΡΥΟΠΙΔΑ-ΛΕΥΚΕΣ	1600	3*16 Cu
ΦΛΑΜΠΟΥΡΗ-ΦΛΑΜΠΟΥΡΗ II	2500	3*16 Cu
ΦΛΑΜΠΟΥΡΗ-ΚΑΝΑΛΑ	2158	35 AACC
ΦΛΑΜΠΟΥΡΗ II-ΑΓ.ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ	3500	3*16Cu

ΑΓΩΓΟΣ	R (Ω/km)	X (Ω/km)	I <sub>max</sub> (A)
35 ΑΑΑC	1,071	0,393	160
16 Cu	1,274	0,417	115
35 Cu	0,596	0,393	185

Πίνακας 6.6.Χαρακτηριστικά γραμμών διανομής του ηλεκτρικού δικτύου της Κύθνου[22].

<b>Κόμβος</b>	<b>Ποσοστό ζήτησης το καλοκαίρι (%)</b>	<b>Ποσοστό ζήτησης το χειμώνα(%)</b>
<b>ΧΩΡΑ</b>	17	25
<b>ΕΠΙΣΚΟΠΗ</b>	10	7
<b>ΜΕΡΙΧΑΣ</b>	16	23
<b>ΔΡΥΟΠΙΔΑ</b>	15	24
<b>ΛΟΥΤΡΑ</b>	6	4
<b>ΛΟΥΤΡΑ ΙΙ</b>	9	4
<b>ΦΛΑΜΠΟΥΡΗ</b>	4	2
<b>ΦΛΑΜΠΟΥΡΗ ΙΙ</b>	5	2.5
<b>ΚΑΝΑΛΑ</b>	9	5
<b>ΑΓ.ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ</b>	3	1
<b>ΛΕΥΚΕΣ</b>	6	2.5

Πίνακας 6.7.Εκτιμώμενη ζήτηση ανά καλοκαίρι/χειμώνα[22].

Τέλος, ο παρακάτω πίνακας απεικονίζει μια σύνοψη της ζήτησης του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας του νησιού.

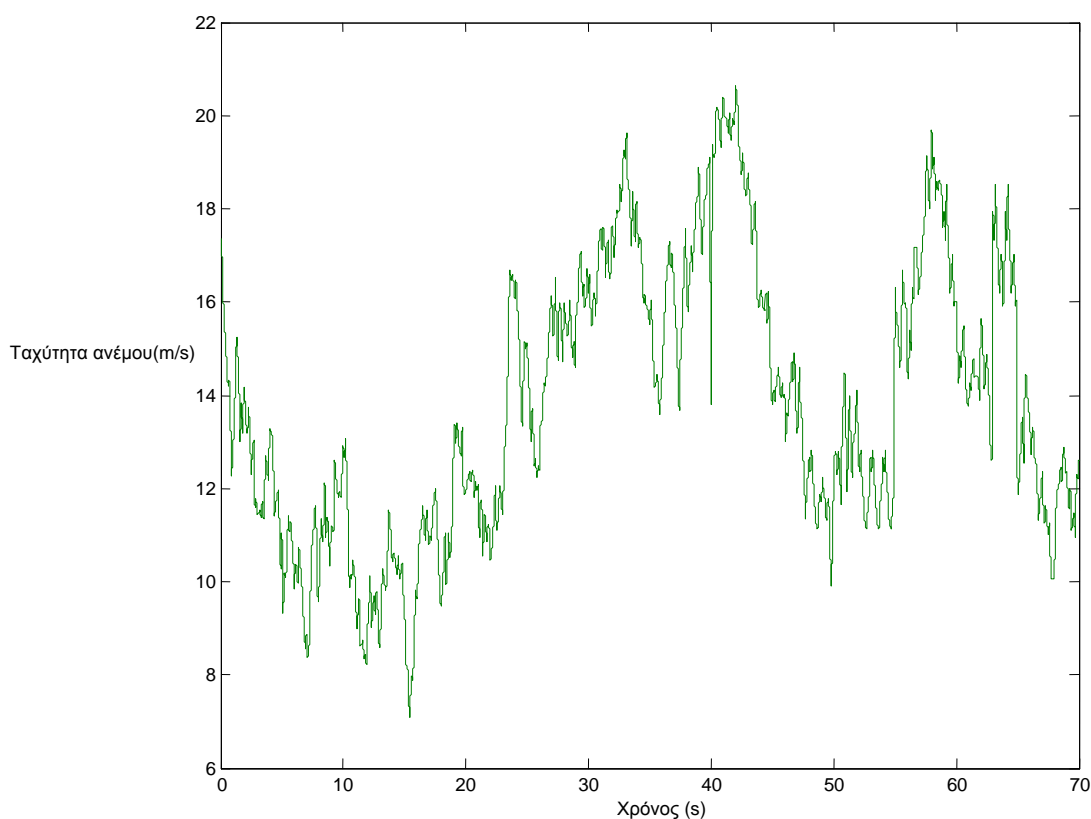
<b>Ετήσια Ενέργεια</b>	5787 MWh
<b>Αιχμή</b>	1605 kW (19/8)
<b>Ελάχιστο Φορτίο</b>	105 kW (2/10)

Πίνακας 6.8.Σύνοψη της ζήτησης του ηλεκτρικού δικτύου[22].



### 6.3.4.Αποτελέσματα προσομοίωσης για διαταραχή συχνότητας στο ηλεκτρικό δίκτυο της Κύθνου.

Λαμβάνοντας υπόψη λοιπόν τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού δικτύου της Κύθνου σχεδιάστηκε στο Simulink/Matlab ένα μοντέλο προσομοίωσης του δικτύου αυτού, μέσω του οποίου θα εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για την εγκυρότητα και αποτελεσματικότητα του συστήματος ελέγχου. Το μοντέλο προσομοίωσης – που απεικονίζεται στο παράρτημα – περιλαμβάνει το αιολικό πάρκο με τις 5 ανεμογεννήτριες των 33kW, το φωτοβολταϊκό πάρκο ισχύος 100kW, πέντε γεννήτριες ντήζελ συνολικής ισχύος 2000kW και την ανεμογεννήτρια 500 kW στην οποία προσαρμόστηκε το υπό εξέταση σύστημα ελέγχου. Επίσης περιλαμβάνονται τα διάφορα καταναμημένα φορτία, αντικατοπτρίζοντας το ποσοστό τους στο φορτίο αιχμής των 1605kW. Μετά από κάποιο διάστημα προστίθεται επιπλέον φορτίο στο σύστημα και εξετάζεται η συμπεριφορά του με και χωρίς το σύστημα ελέγχου της συχνότητας. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ντηζελογεννήτριες και το φωτοβολταϊκό πάρκο έχουν ρυθμιστεί έτσι ώστε να αποδίδουν σταθερή ισχύ ενώ οι ανεμογεννήτριες λειτουργούν βάσει μιας χρονοσειράς σχετικά υψηλού ανέμου.

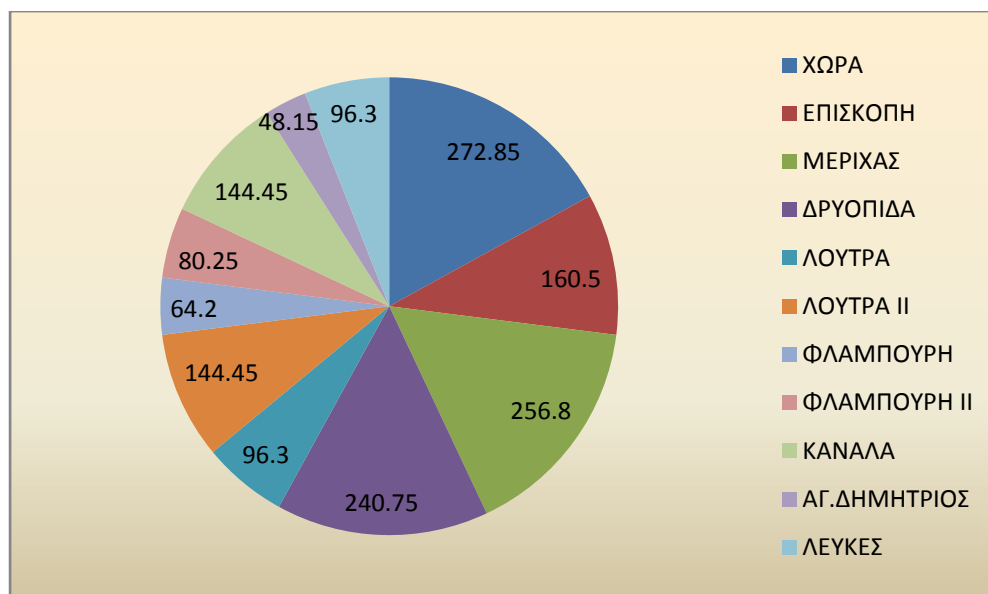


Σχήμα 6.3.4.1.Χρονοσειρά ανέμου.

Δεδομένου ότι η αιχμή είναι καλοκαιρινή μέρα η κατανομή των φορτίων απεικονίζεται στο παρακάτω πίνακα και σχήμα.

<b>Κόμβος</b>	<b>Ποσοστό ζήτησης καλοκαίρι (%)</b>	<b>Ζήτηση σε kW</b>
<b>ΧΩΡΑ</b>	17	272.85
<b>ΕΠΙΣΚΟΠΗ</b>	10	160.5
<b>ΜΕΡΙΧΑΣ</b>	16	256.8
<b>ΔΡΥΟΠΙΔΑ</b>	15	240.75
<b>ΛΟΥΤΡΑ</b>	6	96.3
<b>ΛΟΥΤΡΑ ΙΙ</b>	9	144.45
<b>ΦΛΑΜΠΟΥΡΗ</b>	4	64.2
<b>ΦΛΑΜΠΟΥΡΗ ΙΙ</b>	5	80.25
<b>ΚΑΝΑΛΑ</b>	9	144.45
<b>ΑΓ.ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ</b>	3	48.15
<b>ΛΕΥΚΕΣ</b>	6	96.3

Πίνακας 6.9.Κατανομή ζήτησης ισχύος ανά κόμβο.



Σχήμα 6.3.4.2.Κατανομή ζήτησης ισχύος ανά κόμβο.

Αρχικά η ζήτηση ισχύος είναι 1605 kW (που είναι η αιχμή του συστήματος για το έτος εφαρμογής) και τη στιγμή των 35 δευτερολέπτων της προσομοίωσης προστίθενται 100kW φορτίου ακόμη. Η υπό μελέτη ανεμογεννήτρια έχει ρυθμιστεί έτσι ώστε αρχικά να αποδίδει το 80% της διαθέσιμης ισχύος μέσω του pitch controller. Φυσικά σε περιπτώσεις διαταραχής της συχνότητας η παρεχόμενη ισχύς αλλάζει αντίστοιχα. Οι παρακάτω πίνακες είναι ενδεικτικοί της παροχής/ζήτησης ισχύος.

Μέγιστη διαθέσιμη ισχύς	1705 kW
Αρχικό φορτίο	1605 kW
Τελικό φορτίο	1705kW

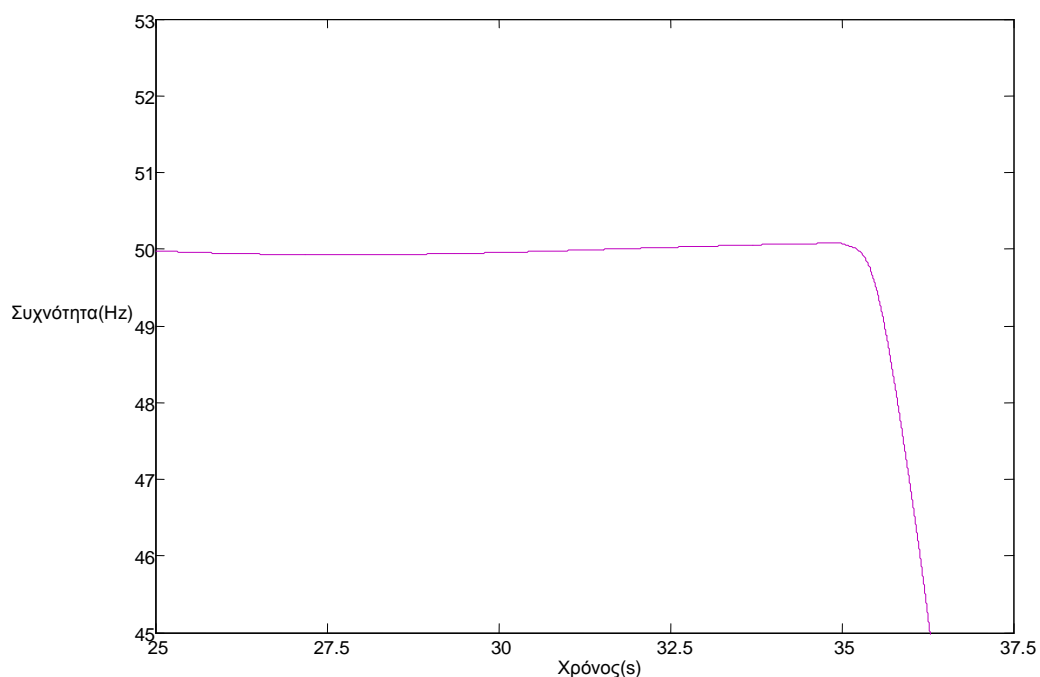
Πίνακας 6.10.Παροχή και ζήτηση ισχύος.

Μονάδα παραγωγής	Σταθερή παραγωγή	Μέγιστη διαθέσιμη παραγωγή
Ντηζελογεννήτριες	960kW	2000kW
Φωτοβολταϊκό πάρκο	80kW	100kW
Αιολικό πάρκο	-	165kW
Ανεμογεννήτρια	-	500kW

Πίνακας 6.11.Παραγωγή ισχύος.

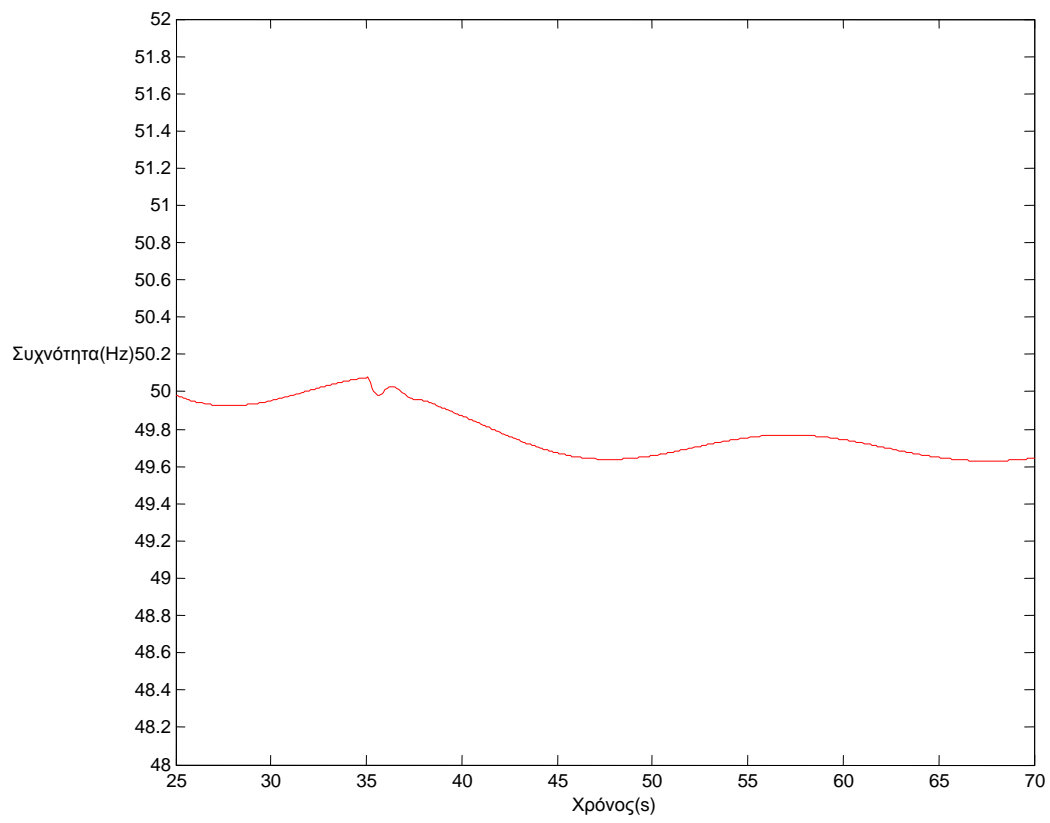
Κατά την πρώτη προσομοίωση το σύστημα ελέγχου ήταν ενεργό μέχρι την προσθήκη του πρόσθετου φορτίου, μέχρι δηλαδή τη χρονική στιγμή των 35 δευτερολέπτων ώστε να σταθεροποιηθεί η συχνότητα και στη συνέχεια έβγαине εκτός λειτουργίας. Έτσι ήταν δυνατή η παρακολούθηση της συχνότητας κατά τη διάρκεια της διαταραχής χωρίς την παρουσία του συστήματος ελέγχου. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα λοιπόν το σύστημα αδυνατεί να διατηρήσει τη συχνότητα κοντά στα 50 Hz με την απουσία του συστήματος

ελέγχου. Για την ακρίβεια η συχνότητα καταλήγει στο μηδέν μετά από κάποια δευτερόλεπτα και από την πρώτη στιγμή της διαταραχής πέφτει δραματικά.

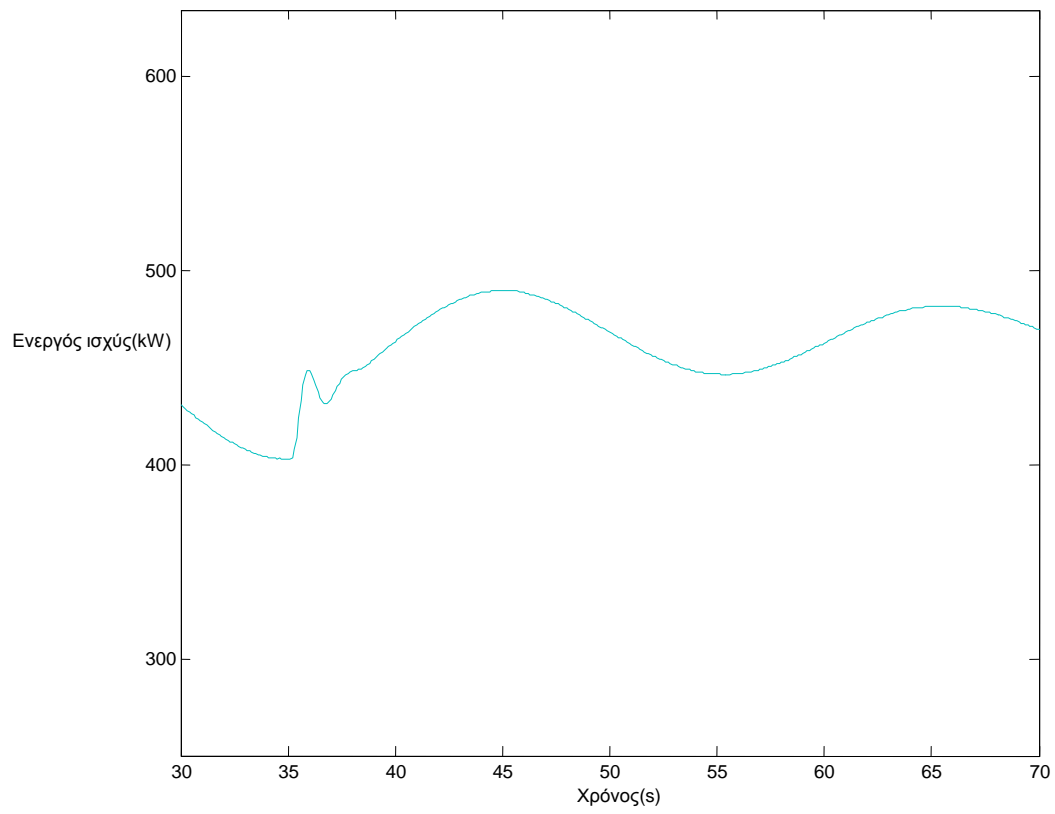


Σχήμα 6.3.4.3. Συχνότητα χωρίς την παρουσία του συστήματος ελέγχου.

Αντίθετα, το σύστημα ελέγχου παρέμεινε ενεργό κατά τη διάρκεια όλης της δεύτερης προσομοίωσης έτσι ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα. Παρατηρούμε λοιπόν μέσω των παρακάτω σχημάτων, ότι η συχνότητα παραμένει σε ασφαλή επίπεδα λειτουργίας και παρουσιάζει μικρές μόνο ταλαντώσεις λόγω της μεταβολής του ανέμου. Το σύστημα δεν μεταπίπτει σε αστάθεια, αλλά διατηρεί με τον τρόπο αυτό τη συχνότητα του σε ασφαλή επίπεδα. Στην περίπτωση αυτή αξίζει να σημειωθεί ότι οι γεννήτριες ντήζελ και το φωτοβολταϊκό πάρκο έχουν περιορισμένη και σταθερή παραγωγή ισχύος έτσι ώστε να είναι περισσότερο ευδιάκριτη η συνεισφορά του συστήματος ελέγχου της ανεμογεννήτριας. Στα παρακάτω σχήματα απεικονίζεται η συχνότητα του συστήματος, αλλά και η παρεχόμενη ισχύς από την υπό μελέτη ανεμογεννήτρια.



Σχήμα 6.3.4.4. Συχνότητα συστήματος με την παρουσία του συστήματος ελέγχου.



Σχήμα 6.3.4.5. Παρεχόμενη ισχύς από την ανεμογεννήτρια των 500 kW.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

---

### 7. Συμπεράσματα.

Στην εργασία αυτή αναπτύχθηκε ένα δυναμικό μοντέλο μιας ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών ονομαστικής ισχύος 2 MW, με συμβατική σύγχρονη γεννήτρια. Στην έξοδο της σύγχρονης γεννήτριας συνδέθηκαν ένας τριφασικός ανορθωτής διόδων, ένας μετατροπέας ανύψωσης τάσης και ένας τριφασικός αντιστροφέας τύπου πηγής τάσης. Μελετήθηκε η απόκριση της ανεμογεννήτριας σε βηματικές μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου αλλά και σε τυπικές μεταβολές ανέμου χαμηλής και υψηλής ταχύτητας. Σχεδιάστηκαν συστήματα ελέγχου τάσης/άεργου ισχύος και συχνότητας/ενεργού ισχύος και πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις στο περιβάλλον Simulink/MATLAB υπό συγκεκριμένες διαταραχές του δικτύου. Τέλος, η αποτελεσματικότητα του συστήματος ελέγχου συχνότητας/ενεργού ισχύος μελετήθηκε και αναδείχτηκε μέσω της εξέτασης της λειτουργίας του στο ηλεκτρικό δίκτυο της Κύθνου.

#### 7.1. Κυριότερα συμπεράσματα της εργασίας.

Τα κυριότερα συμπεράσματα της εργασίας έχουν ως εξής:

- Σε περίπτωση πτώσης τάσης του δικτύου κατά **10%** διάρκειας **0.4s** δεν παρουσιάζονται σημαντικά προβλήματα στη λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Παρουσιάζεται αρχικά πτώση της ενεργού ισχύος με την έναρξη της διαταραχής στα **1,85MW** για **0,05s** από τα 2MW που λειτουργούσε σε ομαλές συνθήκες λειτουργίας, ενώ με το πέρας της διαταραχής η ενεργός ισχύς αυξάνεται στα **2,15MW** και σε **0,05s** επανέρχεται στην ονομαστική της τιμή. Αντίστοιχη διακύμανση έχει η τάση του πυκνωτή εξομάλυνσης του μετατροπέα ανύψωσης τάσης. Αρχικά αυξάνεται στα **1150V** και σε **0,2s** επανέρχεται στα 1100V. Όταν η τάση του δικτύου επανέρχεται στην ονομαστική της τιμή έχουμε μείωση της τάσης του πυκνωτή εξομάλυνσης στα **1050V** και σε **0,2s** επανέρχεται και πάλι στην ονομαστική της τιμή.
- Αντίθετα, όταν η τάση του δικτύου πέφτει κατά **50%** για **0,4s** η ανεμογεννήτρια αντιμετωπίζει σοβαρές διαταραχές. Η ενεργός ισχύς παρουσιάζει ραγδαία πτώση στα **1,28MW** και παραμένει σε αυτή την τιμή μέχρι το τέλος της διαταραχής όπου αυξάνεται στα **2,5MW** για να επιστρέψει στα 2MW μετά από **0,9s**. Αντίστοιχα η τάση του πυκνωτή εξομάλυνσης αυξάνεται καθ' όλη τη διάρκεια της διαταραχής για να φτάσει τα **2800V** και να επιστρέψει στην ονομαστική τιμή της μετά από **0,9s**. Αιτία των ραγδαίων μεταβολών της προαναφερθείσας τάσης και της ενεργού ισχύος είναι ο περιορισμός της d συνιστώσας του ρεύματος του αντιστροφέα στα

1,1 pu έτσι ώστε να μην υπάρξουν υπερεντάσεις. Έτσι, η παραγόμενη ενεργός ισχύς δεν διοχετεύεται στο δίκτυο με αποτέλεσμα την αύξηση της τάσεως κατά τη διαταραχή και της ισχύος μετά το πέρας αυτής.

- Λύση στο πρόβλημα παρέχεται με τη σύνδεση ενός φορτίου έκτακτης ανάγκης στην έξοδο του μετατροπέα ανύψωσης. Το φορτίο αυτό απορροφά την περίσσεια ενεργού ισχύος κατά τη διάρκεια της διαταραχής. Έτσι, η ενεργός ισχύς αν και εξακολουθεί να πέφτει στα **1,28MW** κατά τη διαταραχή – το όριο του ρεύματος παραμένει στο 1,1pu για λόγους ασφαλείας, επομένως δεν υπάρχει δυνατότητα διοχέτευσης των 2MW στο δίκτυο με τέτοια πτώση τάσης – μετά το πέρας της αυξάνεται στα **2,4MW** αλλά επανέρχεται στα 2MW σε λιγότερο από **0,1s**. Αντίστοιχα η τάση του πυκνωτή εξομάλυνσης διατηρείται στα **1105V** κατά τη διάρκεια της διαταραχής και μετά το πέρας αυτής μειώνεται στα **1050V**, επανέρχεται όμως στην ονομαστική της τιμή σε **0,1s**.
- Σχεδιάστηκε σύστημα ελέγχου άεργου ρεύματος – άρα και άεργου ισχύος – το οποίο δίνει τη δυνατότητα στο διαχειριστή του δικτύου να επιλέξει τα όρια των  $d, q$  συνιστώσων του αντιστροφέα. Ο ελεγκτής βασίζεται στη σχέση  $\sqrt{I_d^2 + I_q^2} \leq I_{inv,max}$ , όπου για τον αντιστροφέα του μοντέλου έχει επιλεχθεί  $I_{inv,max} = 1,1 pu$ . Έτσι, ο διαχειριστής καθορίζοντας την  $q$  συνιστώσα ουσιαστικά καθορίζει και την  $d$ . Με τον τρόπο αυτό έγινε δυνατός ο έλεγχος της τάσης του δικτύου είτε αποκλειστικά μέσω της ανεμογεννήτριας είτε σε συνδυασμό με μέσα αντιστάθμισης άεργου ισχύος. Σύμφωνα με τις προσομοιώσεις που λήφθηκαν για πτώση της τάσης κατά **50%** διάρκειας **3s** έχουμε τον εξής πίνακα:

Όριο συνιστώσας ρεύματος (pu)	q	Όριο συνιστώσας ρεύματος (pu)	d	Ελάχιστο ενεργού ισχύος (MW)	Μέγιστο άεργου ισχύος (MVar)	Αύξηση τάσης δικτύου(pu)	Χρόνος που απαιτείται για τη σταθεροποίηση της τάσης(s)
0.9		0.632		0.8	1.18	0.065	1.15
0.8		0.755		0.95	1.05	0.06	1.1
0.7		0.849		1.05	0.9	0.053	0.8
0.5		0.98		1.2	0.65	0.042	0.65

- Για την ίδια διαταραχή της τάσης έγινε προσομοίωση με την λειτουργία 5 ανεμογεννητριών με ενσωματωμένο το υπό μελέτη σύστημα ελέγχου. Τα αποτελέσματα ήταν εντυπωσιακά αφού για όριο  $q$  συνιστώσας του ρεύματος ίσο με **0,9pu** η τάση του δικτύου φτάνει στα **0,8pu** ενώ για όριο  $q$  συνιστώσας του ρεύματος ίσο με **0,5pu** η τάση του δικτύου φτάνει στα **0,65pu**. Βάσει αυτής της προσομοίωσης γίνεται εμφανής τόσο η σημασία της σωστής επιλογής του ορίου της  $q$  συνιστώσας όσο και η αποτελεσματικότητα του συστήματος ελέγχου άεργου ισχύος.
- Προσαρμόστηκε το παραπάνω σύστημα ελέγχου στον Γερμανικό κώδικα για παραγωγή άεργου ρεύματος. Έτσι, ανάλογα με την υπό/υπέρταση καθορίζεται η τιμή του άεργου ρεύματος σύμφωνα με την αντίστοιχη καμπύλη τάσης - ρεύματος.



- Σχεδιάστηκε σύστημα ελέγχου για παραμονή ή μη της ανεμογεννήτριας στο δίκτυο σε περιπτώσεις διαταραχών της τάσης το οποίο δρα σε συνδυασμό με το φορτίο έκτακτης ανάγκης. Βάσει καμπύλης τάσης – χρόνου καθορίζεται έτσι το αν η ανεμογεννήτρια θα πρέπει να παραμείνει στο δίκτυο σε περίπτωση υπότασης. Κατά την προσομοίωση που έγινε για πτώση τάσης δικτύου κατά **50%** διάρκειας **3s** η ανεμογεννήτρια αποσυνδέθηκε μετά από **1.938s** διαταραχής, σύμφωνα με την αντίστοιχη καμπύλη. Μέσω του φορτίου έκτακτης ανάγκης καθίσταται ικανή η ομαλή επανένταξη της στο δίκτυο, αφού η ενεργός ισχύς επανέρχεται από τα **2,5MW**, τα οποία φτάνει μετά το τέλος της διαταραχής, στην ονομαστική της τιμή σε **0,1s**.
- Σχεδιάστηκε σύστημα ελέγχου της συχνότητας με συνδυασμένο έλεγχο αδρανειακής απόκρισης και στατισμού. Ο ελεγκτής ακολουθεί μια υποδειγματική καμπύλη συχνότητας – ισχύος, όπου η ανεμογεννήτρια παρέχει το **80%** της ενεργού ισχύος που δύναται να παράξει έτσι ώστε να είναι σε θέση να αυξήσει το ποσό αυτό σε περίπτωση πτώσης της συχνότητας. Το σύστημα ελέγχου προσαρμόζεται στον μετατροπέα ανύψωσης τάσης της ανεμογεννήτριας και εξετάζεται η αποτελεσματικότητα του αρχικά, με σύνδεση αυτής σε έναν άπειρο ζυγό με ελεγχόμενη πτώση της συχνότητας. Με την πτώση της συχνότητας στα **47Hz** διάρκειας **10s** η ενεργός ισχύς που παρέχεται από την ανεμογεννήτρια αυξάνεται από τα **1,6MW** στα **2MW** σε λιγότερο από **3s**.
- Στη συνέχεια και αφού με την ανεμογεννήτρια διασυνδεδεμένη στον άπειρο ζυγό δεν ήταν δυνατό να εξεταστεί η επίδραση του συστήματος στην μεταβολή της συχνότητας, η ανεμογεννήτρια συνδέθηκε σε ένα πρότυπο δίκτυο με μια σύγχρονη γεννήτρια **475kW** και ένα φορτίο. Αρχικά, το φορτίο ήταν της τάξεως των **2MW** και η ανεμογεννήτρια παρείχε τα υπολειπόμενα **1,525MW**. Στη συνέχεια το φορτίο αυξανόταν κατά **200kW**. Χωρίς το σύστημα ελέγχου η συχνότητα παρουσίαζε αστάθεια και έπεφτε μέσα σε **1s** κάτω από τα **47Hz**. Αντίθετα με το σύστημα ελέγχου αν και παρουσίαζε κάποιες ταλαντώσεις (με ελάχιστη τιμή τα **48,5Hz** και μέγιστη τα **50,7Hz**) σταθεροποιούταν στα **50,2Hz** μετά από **20s**.
- Επίσης, ως παραλλαγή του προηγούμενου συστήματος ελέγχου, στη θέση του ελεγκτή στατισμού τοποθετήθηκε ελεγκτής βασισμένος στην καμπύλη συχνότητας – ισχύος του Ιρλανδικού κώδικα. Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν για σύνδεση της ανεμογεννήτριας στον άπειρο ζυγό δεν παρουσίαζαν καμία διαφορά με τον προηγούμενο σύστημα ελέγχου. Ωστόσο, για την περίπτωση σύνδεσης της στο υποδειγματικό δίκτυο με τη σύγχρονη γεννήτρια και το φορτίο η συχνότητα μετά την αύξηση του φορτίου σταθεροποιείται στα **50Hz** μετά από **10s**, χρειάζεται δηλαδή τον μισό χρόνο από το προηγούμενο σύστημα ελέγχου.
- Τέλος, πραγματοποιήθηκε έλεγχος της συχνότητας στο ηλεκτρικό δίκτυο της Κύθνου. Κατά την προσομοίωση, θεωρήθηκε ότι η ζήτηση ισχύος παρουσιάζει αιχμή, η οποία για την Κύθνο έχει υπολογιστεί στα **1605kW** και ότι προστίθενται αιφνιδίως νέα φορτία με ζήτηση ισχύος **100kW**. Το δίκτυο εκτός από τα φορτία περιλαμβάνει μια γεννήτρια ντήζελ και ένα φωτοβολταϊκό πάρκο, τα οποία έχει θεωρηθεί ότι παρουσιάζουν σταθερή παραγωγή ισχύος **960kW** και **80kW** αντίστοιχα. Επίσης, περιλαμβάνονται ένα αιολικό πάρκο ισχύος **165kW** και μια

ανεμογεννήτρια ισχύος **500kW** στην οποία είναι προσαρμοσμένο το σύστημα ελέγχου. Η ισχύς των αιολικών μεταβάλλεται σύμφωνα με μια χρονοσειρά σχετικά υψηλού ανέμου. Χωρίς την παρουσία του ελεγκτή η συχνότητα παρουσιάζει αστάθεια με την προσθήκη του φορτίου των **100kW** και πέφτει μέσα σε **2s** κάτω από τα **47Hz**. Αντίθετα, με τη συμβολή του ελεγκτή η συχνότητα δεν σταθεροποιείται σε κάποια τιμή λόγω της μεταβολής του ανέμου αλλά κυμαίνεται μεταξύ **49,6** και **49,8Hz**.

## 7.2.Σημεία προαγωγής της επιστήμης.

Στην εργασία περιλαμβάνονται τα εξής καινοτόμα σημεία:

- Η σχεδίαση ενός ελεγκτή, ο οποίος έχει την ικανότητα να ελέγχει την παραγωγή και διακίνηση της άεργου ισχύος με το δίκτυο, συμβάλλοντας έτσι στην ρύθμιση της τάσης δικτύου σε περιπτώσεις διαταραχών. Με τον ίδιο ελεγκτή πραγματοποιείται έλεγχος των ρευμάτων του αντιστροφέα και προστασία έτσι από πιθανές υπερεντάσεις.
- Η ανάπτυξη ενός συστήματος ελέγχου, το οποίο βελτιώνει την ικανότητα ανοχής σφαλμάτων(Fault ride through capability) και επιτρέπει την ομαλή επανένταξη της ανεμογεννήτριας στο δίκτυο μετά από αποσύνδεση της, λειτουργώντας έτσι επικουρικά στη βελτιστοποίηση της απόδοσης της.
- Η σχεδίαση ενός ελεγκτή, ο οποίος είναι ικανός να συνεισφέρει στον έλεγχο της συχνότητας του δικτύου και η αποτελεσματικότητα του ελέγχθηκε με την ένταξη του στο ηλεκτρικό δίκτυο της Κύθνου.

### **7.3.Εργασίες για περαιτέρω έρευνα.**

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας αναδείχθηκε η σημασία της περαιτέρω διερεύνησης των παρακάτω σημείων:

- Στις μελετηθείσες περιπτώσεις διερεύνηση της χρησιμότητας των μέσων αποθήκευσης ενέργειας για την αποτελεσματικότερη ρύθμιση της συχνότητας δικτύου αλλά και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των ανεμογεννητριών, αφού δεν θα χρειάζεται να υπολειμθούν.
- Πειραματική επαλήθευση του συστήματος ελέγχου συχνότητας σε συνθήκες μικροδικτύου με ανεμογεννήτρια μικρής ισχύος.
- Βελτιστοποίηση των παραμέτρων των ελεγκτών ώστε να προκύψει ταχύτερη και αποτελεσματικότερη λειτουργία τους.

## Βιβλιογραφία

- [1] John Twidell and Tony Weir , “Renewable Energy Resources” , Second edition , 2006
- [2] Justin Wilkes, Jacopo Moccia, “Wind in power : 2010 European statistics”, The European energy association, February 2011.
- [3] Μιχ. Π. Παπαδόπουλος , “Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες πηγές “ , Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1997.
- [4] H. Slootweg, E. de Vries, “Fixed vs. Variable”, Renewable Energy World, January-February 2003
- [5] Σ.Παπαθανασίου , Μ. Τσίλη «ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ – ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΚΩΔΙΚΩΝ ΑΛΛΩΝ ΧΩΡΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΙΜΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ» ΕΜΠ-ΕΠΙΣΕΥ
- [6] Α.Χανιώτης , Διδακτορική διατριβή «Ανάπτυξη, προσομοίωση και κατασκευή συστήματος ελέγχου ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με γεννήτρια μόνιμων μαγνητών για απομονωμένη και διασυνδεδεμένη λειτουργία»
- [7] Σωτήριος Ι. Νάνου , «Μοντέλο Ανεμογεννήτριας με Πλήρη Μετατροπέα για Μελέτες Ευστάθειας» , Διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π. Ιούλιος 2009
- [8] Stauros B. Papaefthimiou, Stavros A. Papathanasiou, “Simulation and Control of a Variable Speed Wind Turbine with Synchronous Generator” Proc. ICEM 2006, Hania, Crete, Sept. 2006.
- [9] Mohan-Undeland-Robbins, “Power Electronics”
- [10] Μαρία Σ.Ρώτα, “Σύγκριση Κλασσικού και Ελέγχου βασισμένου σε Ασαφή λογική Ανεμογεννήτριας Μόνιμων Μαγνητών”, Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π. Οκτώβριος 2008
- [11] Μάριος Β. Ντρέκο , «Ανάλυση Λειτουργίας και Έλεγχος Συστήματος Ανεμογεννήτριας Μεταβλητών Στροφών Διασυνδεδεμένης στο Δίκτυο» , Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π. Οκτώβριος 2009
- [12] Παναγιώτης Θ. Τσάκωνας , «Έλεγχος Άεργου Ισχύος από Ανεμογεννήτρια για Υποστήριξη Τάσης Δικτύου κατά τη Διάρκεια Σφάλματος» , Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π. Οκτώβριος 2010
- [13] GROUP WPS4-1050, “VECTOR CONTROL OF PMSG FOR GRID-CONNECTED WIND TURBINE APPLICATION”, AALBORG UNIVERSITY , INSTITUTE OF ENERGY TECHNOLOGY.
- [14] Στέφανος Ν.Μανιάς , «ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ» , 6<sup>η</sup> Έκδοση , ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΥΜΕΩΝ , ΑΘΗΝΑ 2007.
- [15] Mónica Chinchilla, Santiago Arnaltes, Juan Carlos Burgos, “Control of Permanent-Magnet Generators Applied to Variable-Speed Wind Energy Systems Connected to the Grid”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 21, March 2006.

[16]Βασίλειος Κ.Παπαδιάς , «ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ , ΤΟΜΟΣ Ι , ΜΟΝΙΜΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ» , Αθήνα 1985.

[17]Σταύρος Παπαθανασίου , «ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ,ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΠΑΡΑΔΟΣΕΩΝ»,Εκδόσεις Ε.Μ.Π. ,Αθήνα 2008.

[18] M.G. Molina, P.E. Mercado, “An new control strategy of variable speed wind turbine generator for three-phase grid-connected applications”, Transmission and distribution Conference andExposition Latin America, 2008 IEEE/PES

[19] L.M. Fernandez, C.A. Garcia, F. Jurado, “Operating capability as a PQ/PV node of a direct-drive wind turbine based on a permanent magnet synchronous generator” Elsevier, Renewable energy, September 2009.

[20]N. Yamamura, M. Ishida, and T. Hori, “A simple wind power generating system with permanent magnet type synchronous generator”, IEEE International Conf. on Power Electronics and Drive Systems, PEDS '99, Hong Kong , July 1999

[21]Γιάννης Δ. Μάργαρης , «Μοντελοποίηση ανεμογεννητριών για τη μελέτη δυναμικών φαινομένων σε συνθήκες αυξημένης αιολικής διείδυσης» , Διδακτορική Διατριβή Ε.Μ.Π. , Ιούλιος 2011

[22] Αλέξανδρος Α. Κουρκουτάς , «Αποτίμηση αξίας παραγωγής από Φωτοβολταϊκό Πάρκο.Εφαρμογή στο νησί της Κύθνου. » , Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π. , Αύγουστος 2009

[23]Μαρία Ε.Κουβελέτσου, «Σχεδίαση Σταθεροποιητή Ταλαντώσεων για τη Διασύνδεση Ελλάδος – Τουρκίας» , Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π. , Σεπτέμβριος 2008

[24]M.G. Molina , P.E. Mercado , “Stabilization and control of tie-line power flow of microgrid including wind generation by distributed energy storage” , November 2009

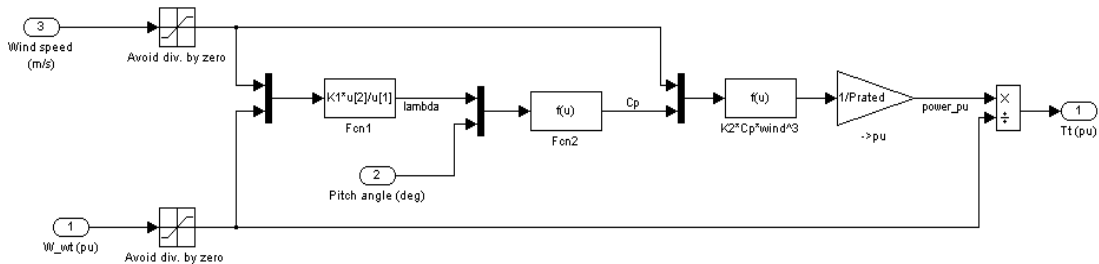
[25]Gillian Lalor , Alan Mullane , Mark O'Malley , “Frequency Control and Wind Turbine Technologies” , IEEE Transactions on Power Systems , VOL. 20, NO.4, November 2005

[26]A.M. De Broe' , S.Drouilhet , V. Gevorgian , “A peak power tracker for small wind turbine in battery charging applications” , IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.14, No. 4, December 1999

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

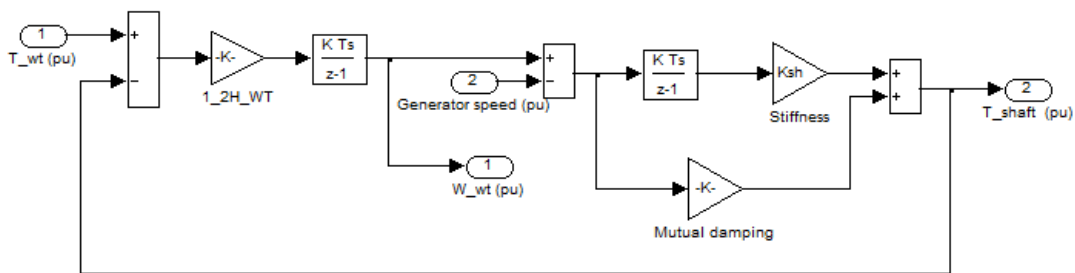
### Μοντελοποίηση ανεμογεννήτριας στο Simulink

Στο παρόν παράρτημα παρατίθενται τα μοντέλα του Simulink, που συγκροτούν την υπό μελέτη ανεμογεννήτρια. Απεικονίζεται αρχικά η μοντελοποίηση του αεροδυναμικού μέρους της ανεμογεννήτριας και στη συνέχεια το σύστημα μετάδοσης της κίνησης από την πτερωτή στο δρομέα και το σύστημα ελέγχου της διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας. Επίσης, παρουσιάζεται και ο τρόπος σύνδεσης της γεννήτριας με το ηλεκτρικό δίκτυο.



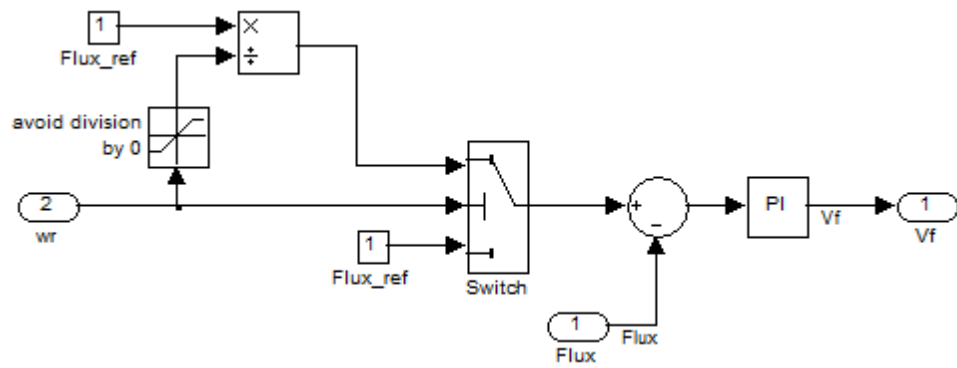
A1. Αεροδυναμικό μέρος της ανεμογεννήτριας.

Είσοδοι στο παραπάνω μοντέλο είναι η ταχύτητα του ανέμου και η γωνιακή ταχύτητα της πτερωτής, καθώς και η γωνία βήματος των πτερυγίων. Προκύπτει η αεροδυναμική ισχύς, η οποία διαιρούμενη με τη γωνιακή ταχύτητα της πτερωτής μας δίνει την αεροδυναμική ροπή της πτερωτής.



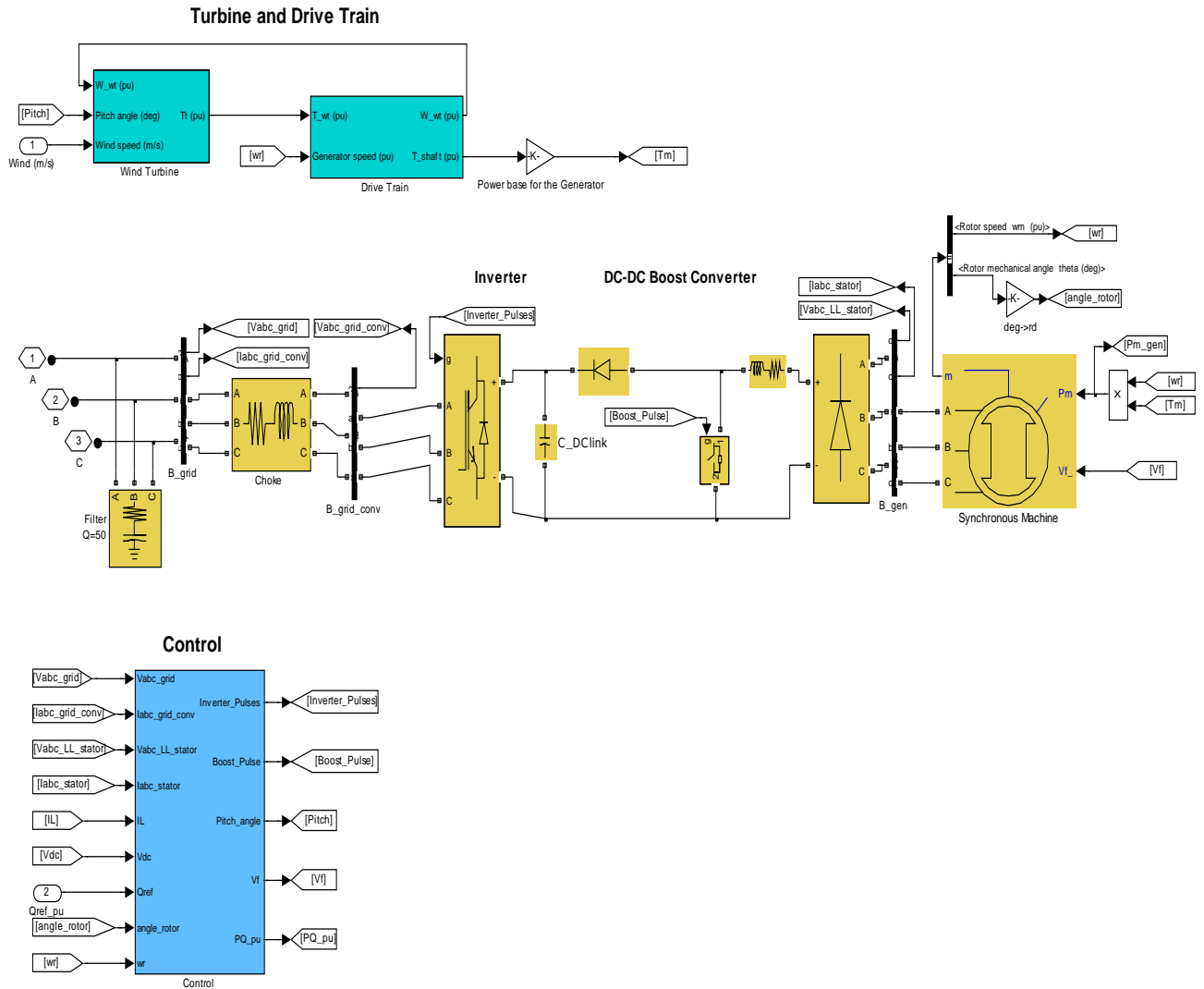
A2. Μοντέλο προσομοίωσης συστήματος μετάδοσης κίνησης.

Είσοδοι του συστήματος εδώ είναι η αεροδυναμική ροπή της πτερωτής και η γωνιακή ταχύτητα του άξονα της γεννήτριας. Η πρώτη συγκρίνεται με την ροπή στον άξονα της γεννήτριας και προκύπτει η γωνιακή ταχύτητα της πτερωτής. Η δεύτερη συγκρίνεται με την προκύπτουσα γωνιακή ταχύτητα της πτερωτής και μέσω ελεγκτών δίνεται η ροπή στον άξονα της γεννήτριας.



A3. Σύστημα ελέγχου διέγερσης γεννήτριας.

Η τάση διέγερσης όπως προκύπτει από τη σύγκριση γωνιακής ταχύτητας του δρομέα και μαγνητικής ροής. Για ταχύτητα δρομέα μικρότερη της ονομαστικής η μαγνητική ροή στο στάτη είναι ίση με την ονομαστική. Αν η ταχύτητα του δρομέα ξεπεράσει την ονομαστική το σύστημα συνεργάζεται με το σύστημα ελέγχου της γωνίας βήματος των πτερυγίων και ο δρομέας φρενάζεται.



#### A4. Σύνδεση γεννήτριας στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

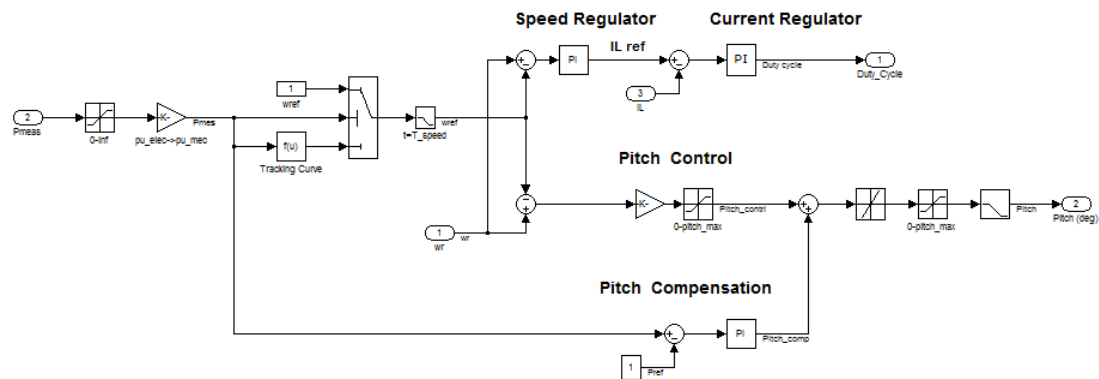
Στο παραπάνω μοντέλο απεικονίζεται η σύνδεση της γεννήτριας με το δίκτυο. Εκτός της σύγχρονης γεννήτριας απεικονίζονται ο μετατροπέας ανύψωσης συνεχούς σε συνεχές καθώς και ο αντιστροφέας τύπου πηγής τάσης. Επίσης φαίνεται και το block που είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο ολόκληρου του συστήματος.



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

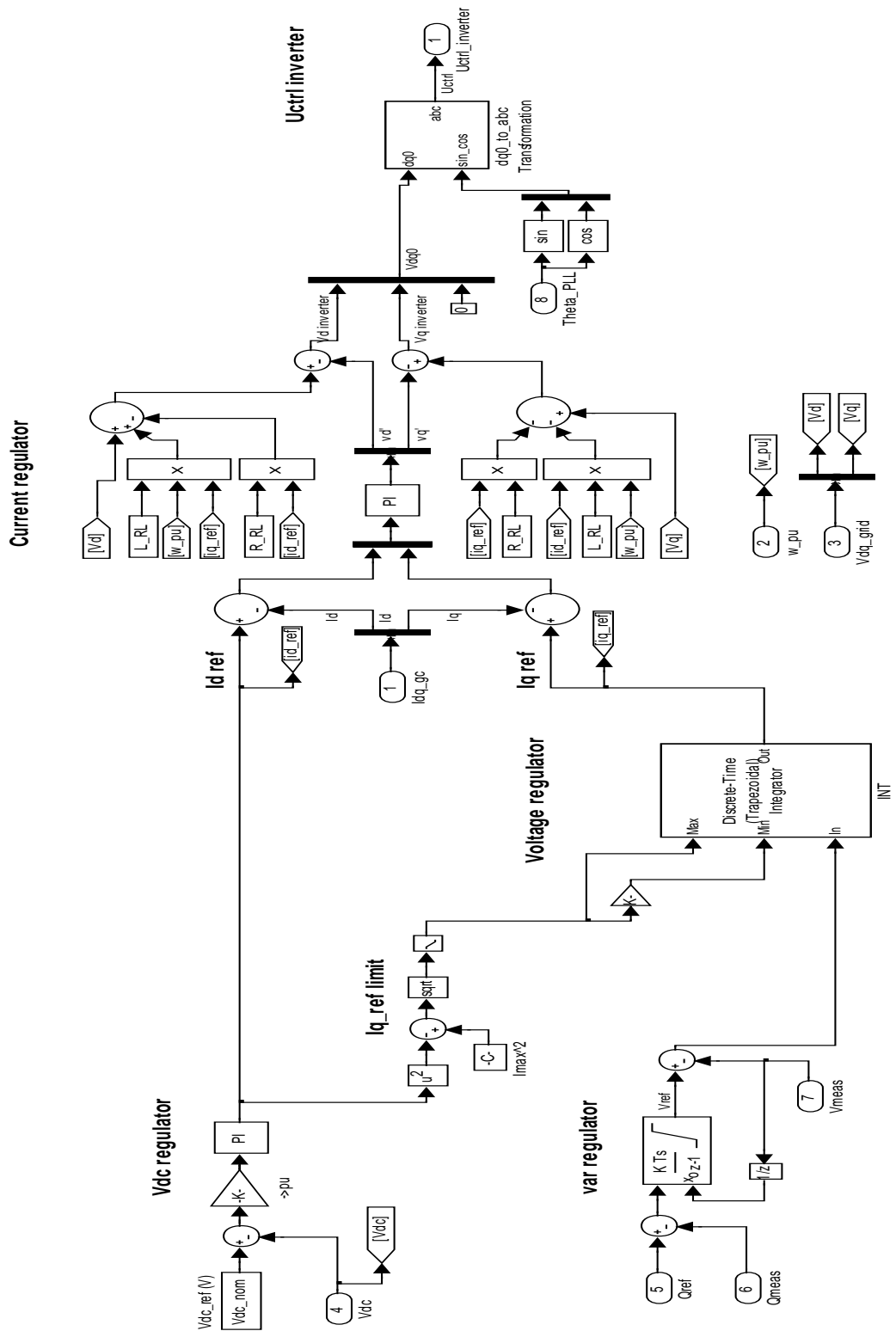
### Μοντελοποίηση ελεγκτών στο Simulink

Στο παρόν παράρτημα παρατίθενται τα μοντέλα του Simulink που απαρτίζουν τους διάφορους ελεγκτές που σχεδιάστηκαν, αλλά και τα συστήματα στα οποία αυτοί ενσωματώθηκαν.



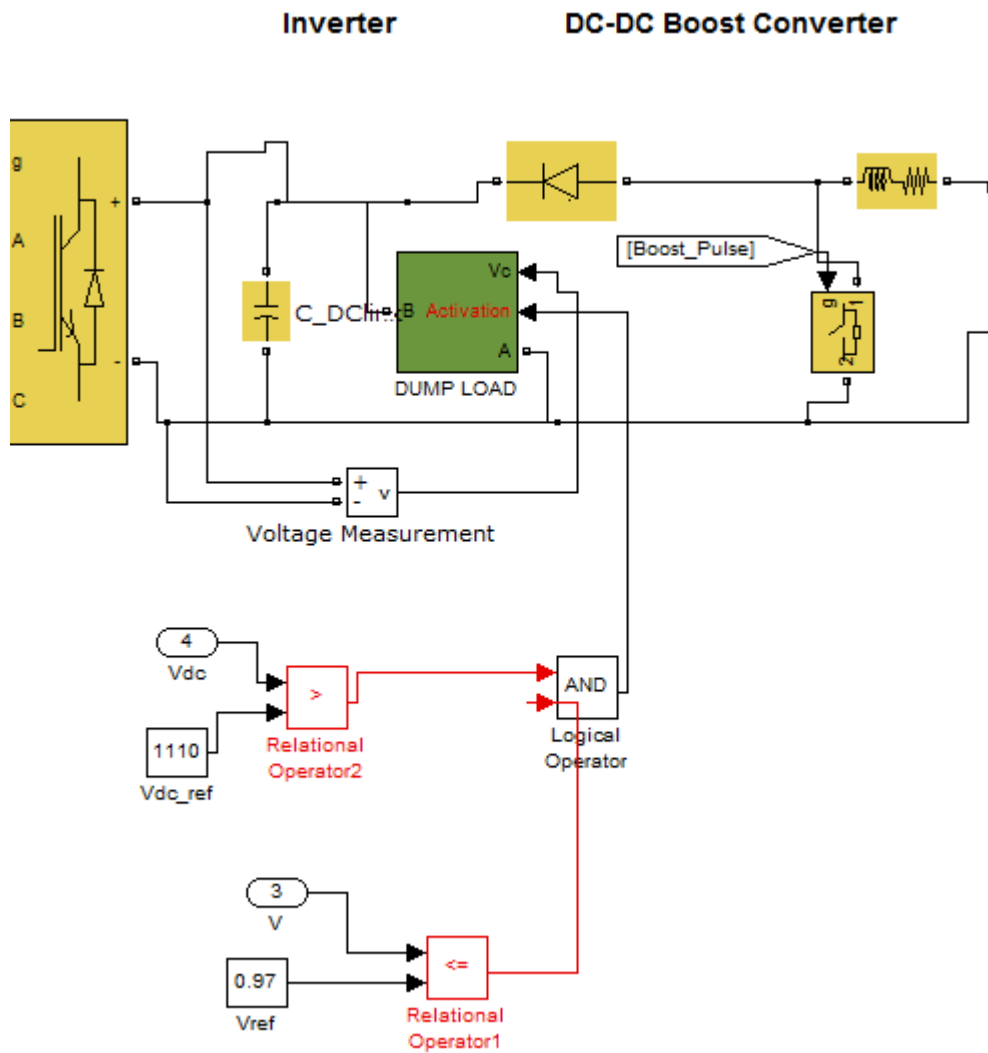
B1. Μοντέλο προσομοίωσης ρυθμιστή στροφών και γωνίας βήματος έλικας.

Μέσω του παραπάνω ελεγκτή γίνεται η ανεύρεση του σημείου λειτουργίας μεγίστης ισχύος ρυθμίζοντας το duty cycle του μετατροπέα ανύψωσης σύμφωνα με την παραγόμενη ενεργό ισχύ και τις στροφές του δρομέα. Επίσης, γίνεται ο έλεγχος της γωνίας βήματος των πτερυγίων.



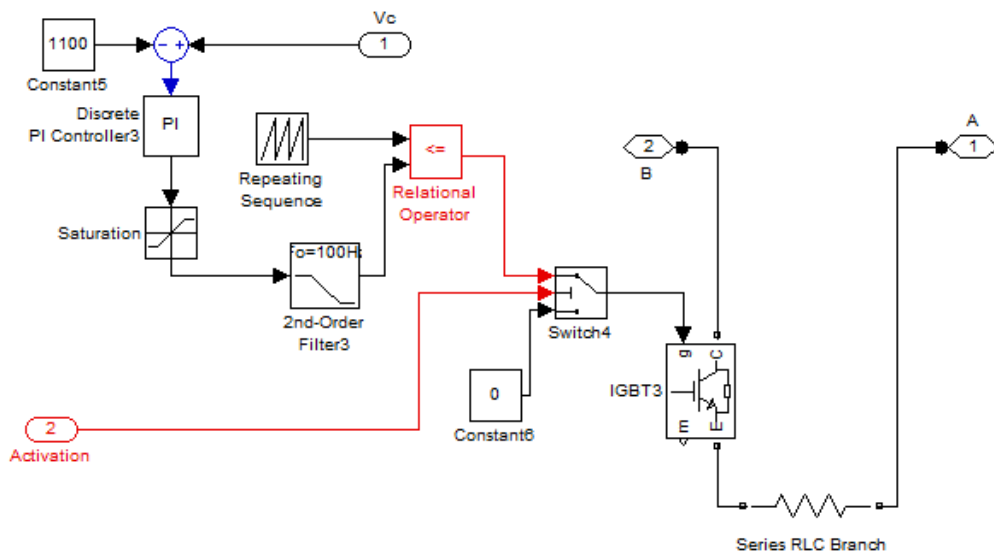
B2.Σύστημα ελέγχου αντιστροφέα.

Στον ελεγκτή αυτό ρυθμίζεται η τάση του πυκνωτή εξομάλυνσης στην είσοδο του αντιστροφέα καθώς και η άεργος ισχύς που παράγεται από την ανεμογεννήτρια. Οι εντολές μεταφράζονται σε παλμούς που οδηγούν τα IGBTs του αντιστροφέα.



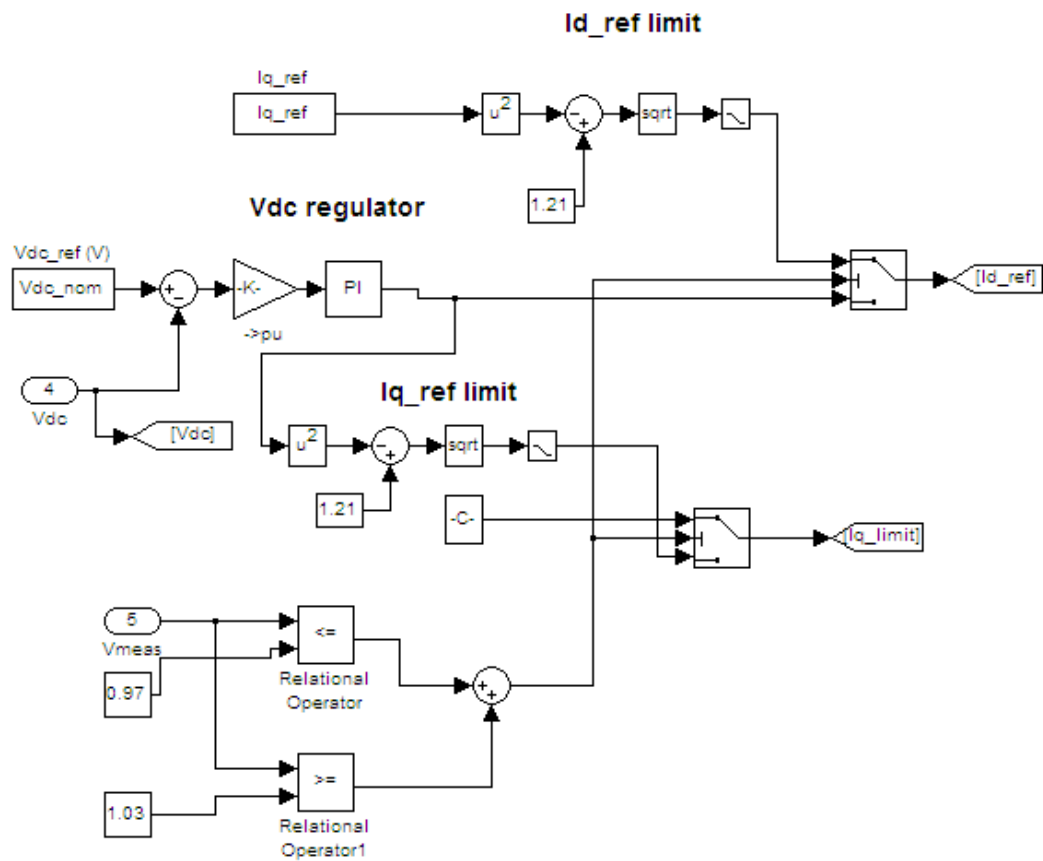
B3.Θέση του φορτίου έκτακτης ανάγκης(dumpload) στο σύστημα ελέγχου.

Απεικονίζεται η θέση του φορτίου έκτακτης ανάγκης, πριν από τον πυκνωτή εξομάλυνσης στην είσοδο του αντιστροφέα.



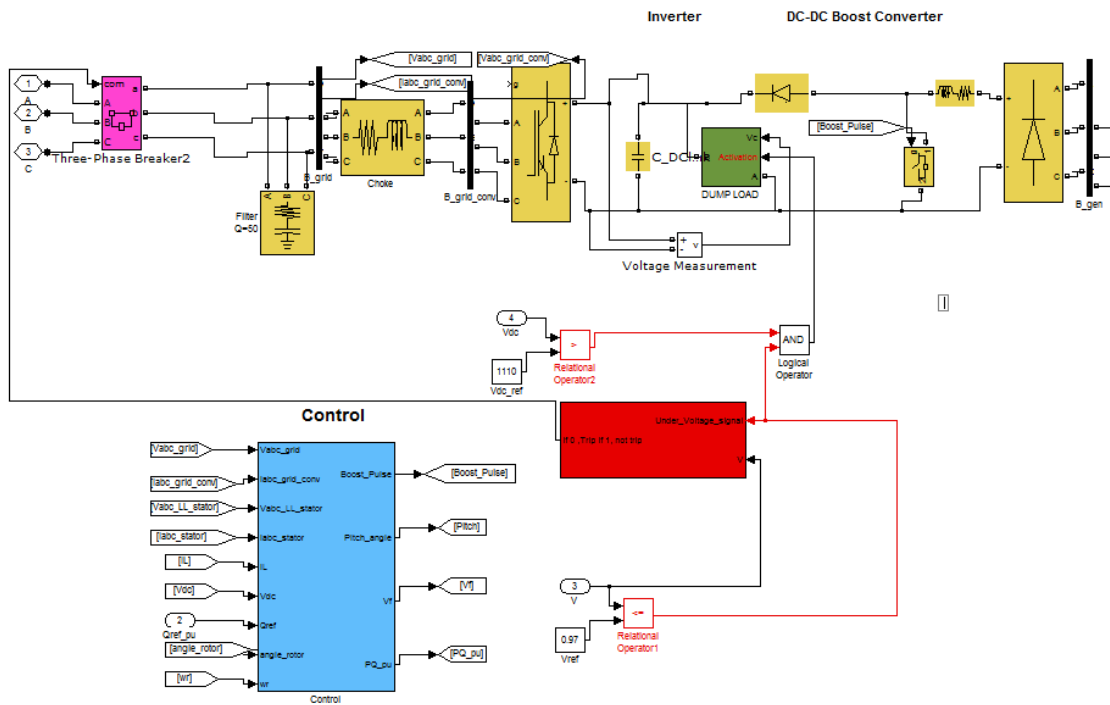
B4. Φορτίο έκτακτης ανάγκης.

Το φορτίο έκτακτης ανάγκης, ένα κύκλωμα αποτελούμενο από μια αντίσταση και ένα IGBT το οποίο ελέγχεται έτσι ώστε η τάση στα άκρα της αντίστασης να παραμένει στα 1100V.



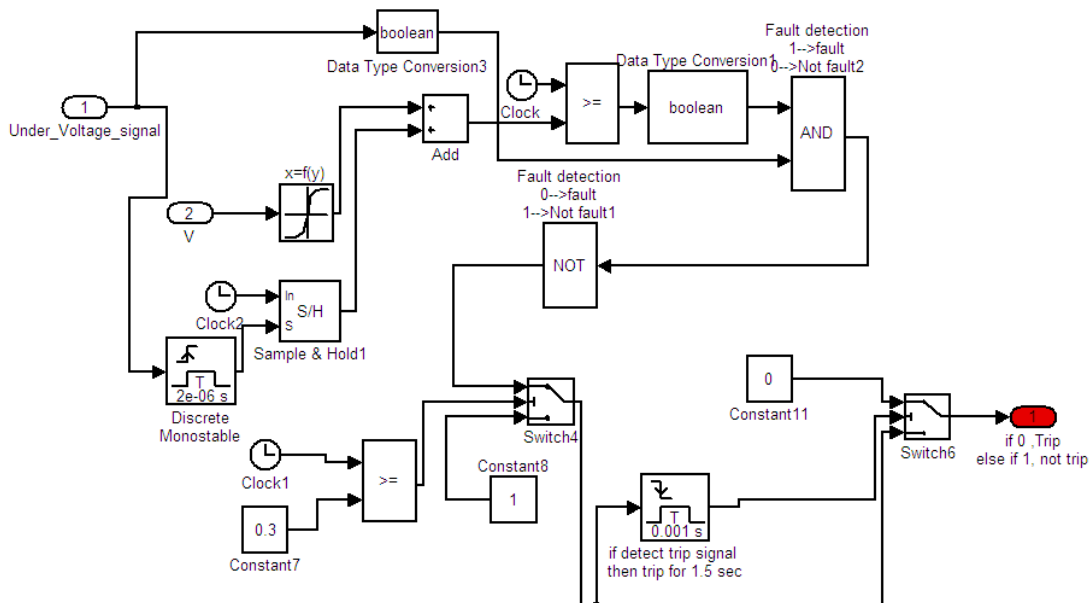
B5. Έλεγχος άεργου ρεύματος.

Η μοντελοποίηση του ελεγκτή άεργου ρεύματος – άρα και άεργου ισχύος – που τίθεται σε εφαρμογή σε περίπτωση υπό/υπέρτασης.



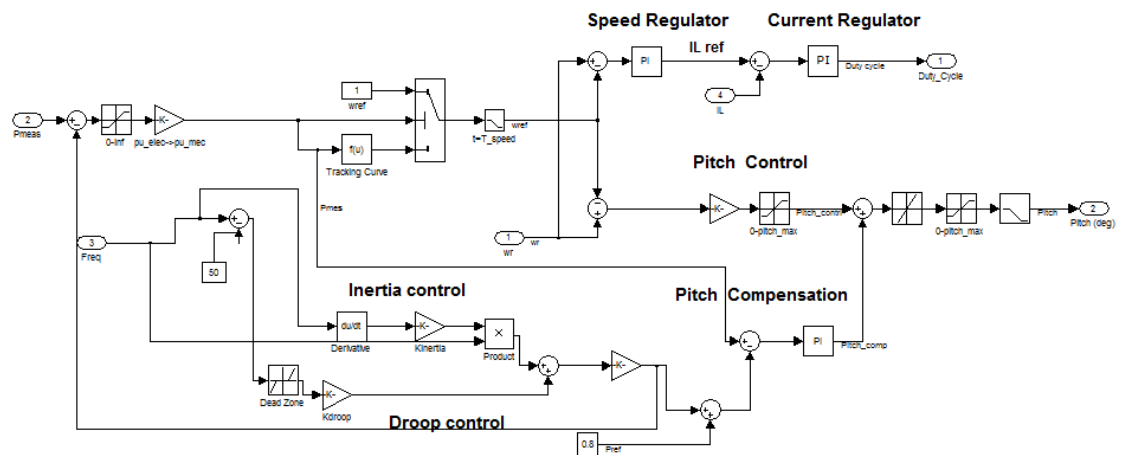
B6. Θέση συστήματος ελέγχου FRT.

Η θέση του ελεγκτή FRT στο σύστημα με τη χρησιμοποίηση του απαραίτητου διακόπτη.



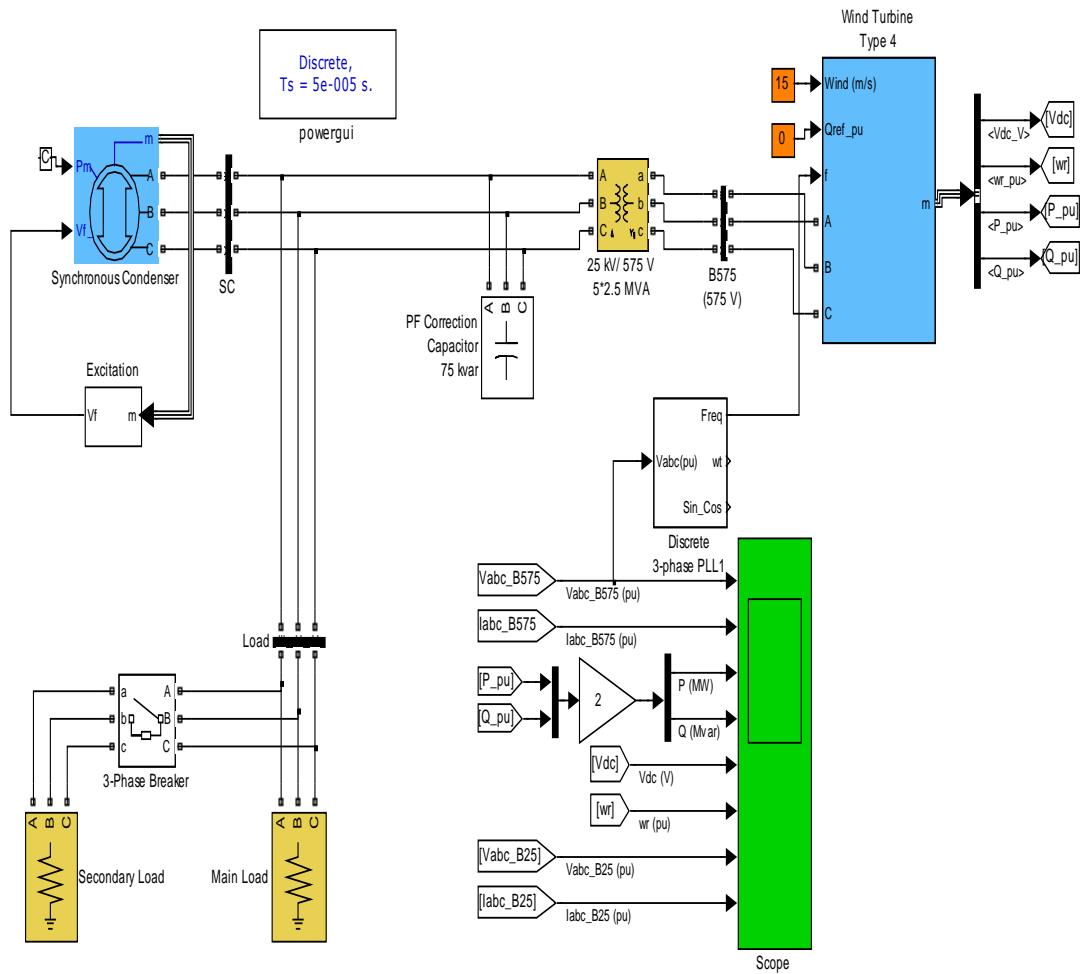
B7. Σύστημα ελέγχου FRT.

Ο ελεγκτής FRT έχει σαν είσοδο την τάση του δικτύου καθώς και ένα σήμα που υποδηλώνει την πτώση αυτής και μέσω χαρακτηριστικής καμπύλης καθορίζει την παραμονή της ανεμογεννήτριας στο δίκτυο.



B8. Συνδυασμένος έλεγχος συχνότητας.

Ο ελεγκτής της συχνότητας με συνδυασμένο έλεγχο αδρανειακής απόκρισης και στατισμού υλοποιείται χρησιμοποιώντας τον ρυθμιστή στροφών και γωνίας βήματος έλικας.



B9. Μοντέλο ανεμογεννήτριας-σύγχρονης γεννήτριας-φορτίων.

Το παραπάνω μοντέλο χρησιμοποιήθηκε σε προσομοιώσεις που αφορούσαν τον έλεγχο της συχνότητας και απαρτίζεται από μια ανεμογεννήτρια, μια σύγχρονη γεννήτρια κι ένα ελεγχόμενο φορτίο.



