



## ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### Μοντέλο Ανεμογεννήτριας Μεταβλητών Στροφών Με Σύγχρονη Μηχανή Για Μελέτες Ευστάθειας

#### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ευάγγελος Μ. Φαραντάτος

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2006





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

## Μοντέλο Ανεμογεννήτριας Μεταβλητών Στροφών Με Σύγχρονη Μηχανή Για Μελέτες Ευστάθειας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ευάγγελος Μ. Φαραντάτος

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 27<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2006

.....  
Κ.Βουρνάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ν.Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Σ.Παπαθανασίου  
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2006

.....

**Ευάγγελος Μ. Φαραντάτος**

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

© 2006 Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. All rights reserved.

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

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

# Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη μοντέλων A/Γ μεταβλητών στροφών με σύγχρονη μηχανή και πλήρη μετατροπέα, κατάλληλων για μελέτες ευστάθειας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Το σύστημα της A/Γ που εξετάστηκε αποτελείται από σύγχρονη μηχανή η οποία διαθέτει τύλιγμα διέγερσης. Το κιβώτιο ταχυτήτων παραλείπεται λόγω της πολυπολικής γεννήτριας και της παρεμβολής του μετατροπέα, με αποτέλεσμα ο δρομέας του ανεμοκινητήρα να συνδέεται στον ίδιο άξονα με το δρομέα της γεννήτριας. Η γεννήτρια συνδέεται στο δίκτυο μέσω ενός πλήρους μετατροπέα AC/DC/AC, ο οποίος αποτελείται από έναν ανορθωτή διόδων και έναν PWM αντιστροφέα. Στην περίπτωση που η διέγερση της γεννήτριας δεν μπορεί να αυξηθεί πάνω από ένα όριο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας DC/DC μετατροπέας ανύψωσης για τον έλεγχο της τάσης εισόδου του PWM αντιστροφέα.

Στη διπλωματική αυτή εργασία εξετάστηκαν δύο στρατηγικές ελέγχου της γεννήτριας. Στον πρώτο τρόπο ελέγχου το σύστημα διέγερσης της γεννήτριας χρησιμοποιείται για να ελέγχει την τάση στα άκρα της μέσω ενός τυπικού αυτόματου ρυθμιστή τάσης (A.P.T). Λόγω του ανορθωτή διόδων η τάση του πυκνωτή είναι ανάλογη της τάσης των ακροδεκτών της γεννήτριας ενώ στο α.μ. σύστημα οι τιμές τους ταυτίζονται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, το σύστημα διέγερσης να ελέγχει τελικά την DC τάση του πυκνωτή και να την κρατάει στην ονομαστική της τιμή (1 α.μ.). Όσον αφορά στον PWM αντιστροφέα, αυτός εγγχεί ενεργό ισχύ στο δίκτυο, ακολουθώντας την στρατηγική Μέγιστης Απολαβής Ισχύος.

Επίσης εξετάστηκε μια παραλλαγή της πρώτης στρατηγικής ελέγχου κατά την οποία η τιμή της διέγερσης δεν μπορεί να αυξηθεί πάνω από ένα όριο. Στην περίπτωση αυτή, χρησιμοποιείται ένας DC/DC μετατροπέας ανύψωσης ο οποίος κρατάει την τιμή της τάσης του πυκνωτή σταθερή μεταβάλλοντας τον λόγο διαμόρφωσης.

Στο δεύτερο τρόπο ελέγχου, το σύστημα διέγερσης της γεννήτριας χρησιμοποιείται για να υλοποιεί τη στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος. Ο PWM αντιστροφέας χρησιμοποιείται έτσι ώστε να κρατάει σταθερή την τάση εισόδου του ελέγχοντας την ενεργό ισχύ που μεταφέρεται από την DC πλευρά προς το δίκτυο. Επειδή λειτουργεί σε πολύ υψηλές συχνότητες (10-20 kHz), η δυναμική του πυκνωτή μπορεί να θεωρηθεί ακαριαία.

Τέλος, περιγράφηκε η περίπτωση ενός ασθενούς δικτύου με μεγάλη αιολική διείσδυση. Μέσω προσομοιώσεων αποδείχθηκε ότι το όριο μέγιστης αιολικής διείσδυσης δεν μπορεί να αυξηθεί με τη χρήση A/Γ σταθερών στροφών με γεννήτρίες επαγωγής. Αντίθετα, η χρήση A/Γ μεταβλητών στροφών και με πλήρη μετατροπέα οι οποίες ρυθμίζουν την τάση του ζυγού στον οποίο συνδέεται το αιολικό πάρκο, αυξάνει το μέγιστο όριο αιολικής διείσδυσης από πλευράς ασφάλειας τάσης.

## Λέξεις Κλειδιά

Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών, σύγχρονη μηχανή, πλήρης μετατροπέας, έλεγχος και ευστάθεια τάσης, μοντελοποίηση και προσομοίωση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.



# Abstract

In this diploma thesis a generic model of a full converter, variable speed synchronous machine wind generator was developed, suitable for power system stability studies. The model is based on the most common concept for direct drive, full converter wind generators, where an electrically excited multi-pole synchronous generator is used. There is no gearbox and the wind turbine rotor is mounted on the same shaft with the generator rotor. The generator is connected to the grid through a fully rated AC/DC/AC converter, which consists of a diode rectifier and a PWM inverter. Optionally, a DC to DC boost converter may be used to regulate the voltage at the DC terminal of the PWM inverter. The power electronics converter allows for variable-speed control of the wind generator and reactive power injection, or voltage control on the network side.

Two different excitation control schemes of the synchronous machine were examined. In the first control mode we assumed an automatic voltage regulator controlling the generator field voltage. Due to the diode rectifier, the generator terminal voltage is directly linked to the DC side voltage. As a result, the generator excitation control system keeps the DC capacitor voltage at nominal value (1 pu). The PWM inverter injects active power to the grid following the MPT curve based upon rotor speed measurement.

Moreover, a variant case of the first control mode was considered. In this case, it was examined the effect of an optional DC/DC boost converter that can be used in case that the maximum available excitation is not sufficient for low speed operation

In the second control mode, the PWM inverter keeps the DC capacitor voltage at nominal value and the generator excitation follows the MPT strategy based on the rotor speed measurement. As the PWM inverter operates at very high frequency, the capacitor voltage dynamics are assumed instantaneous in this case.

Finally, a case of a weak power system was examined. Through this example, it was proved that this type of wind generator can significantly increase the limits of wind power penetration in weak voltage stability constrained systems, provided that the network voltage control capability of the inverter is fully utilized.

## Keywords

Wind turbine, full converter, synchronous generator, variable speed, voltage control and stability, power system modeling and simulation.





# Ευχαριστίες

Θα ήθελα κατ' αρχάς να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στον καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Κωνσταντίνο Βουρνά, αφενός για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου και αφετέρου για τη δυνατότητα που μου παρείχε να ασχοληθώ με το ενδιαφέρον αυτό αντικείμενο. Επίσης, θέλω να τον ευχαριστήσω για τις γνώσεις που μου μετέδωσε τόσο στα προπτυχιακά μαθήματα όσο και κατά την διάρκεια της διπλωματικής αυτής εργασίας. Τέλος, θέλω να τον ευχαριστήσω για τη συνεχή συνεργασία και επικοινωνία που είχαμε στα πλαίσια αυτής της εργασίας, στοιχεία καταλυτικά για την άρτια εκπόνησή της.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον υποψήφιο διδάκτορα και υπεύθυνο της διπλωματικής μου κ. Γιώργο Τσουράκη για την άψογη συνεργασία που είχαμε και το χρόνο που μου αφιέρωσε ώστε να ολοκληρώσω την εργασία αυτή. Οι επιστημονικές συμβουλές του και οι εύστοχες υποδείξεις του ήταν κρίσιμες στην επίλυση προβλημάτων που προέκυπταν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, οφείλω θερμές ευχαριστίες στους φίλους, συμφοιτητές και μη, για τη στήριξη και τη συμπαράστασή τους κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος, θέλω να αφιερώσω τη διπλωματική μου εργασία στην οικογένειά μου που με στηρίζει ηθικά αλλά και οικονομικά όλα αυτά τα χρόνια, στην προσπάθειά μου να πετύχω τους στόχους και τα όνειρά μου.



---

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περιεχόμενα	1
<b>1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>5</b>
1.1 Απελευθέρωση Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας . . . . .	5
1.1.1 Εισαγωγή . . . . .	5
1.1.2 Προβλήματα . . . . .	6
1.1.3 Κατάσταση στην Ελλάδα . . . . .	7
1.1.4 Συμπεράσματα . . . . .	7
1.2 Διεσπαρμένη Παραγωγή-Μικροδίκτυα . . . . .	9
1.3 Αιολική διείδυση στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας . . . . .	11
1.3.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας . . . . .	11
1.3.2 Αιολική Ενέργεια . . . . .	13
1.4 Τεχνολογίες Ανεμογεννητριών . . . . .	14
1.5 Αδιάκοπη Παροχή Ισχύος σε Συνθήκες Σφάλματος . . . . .	18
1.5.1 Τεχνολογία Α.Π.Ι.Σ. για Α/Γ με Πλήρη Μετατροπέα . . . . .	19
1.5.2 Τεχνολογία Α.Π.Ι.Σ. για Α/Γ Διπλής Τροφοδότησης . . . . .	20
1.6 Ευστάθεια Μικρών Διαταραχών . . . . .	21
1.7 Επισκόπηση Βιβλιογραφίας . . . . .	23
1.8 Αντικείμενο και Δομή Διπλωματικής . . . . .	24
<b>2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ Α/Γ ΜΕ ΠΛΗΡΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ</b>	<b>27</b>
2.1 Περιγραφή Συστήματος Α/Γ . . . . .	27
2.2 Προσομοίωση του Ανέμου . . . . .	28
2.3 Αεροδυναμικό Μέρος . . . . .	30
2.4 Ρυθμιστής Γωνίας Βήματος Πτερυγίων (Pitch Control) . . . . .	31
2.5 Μοντέλο Σύγχρονης Μηχανής Α/Γ . . . . .	32
2.5.1 Γενικά Περί Σύγχρονων Μηχανών . . . . .	32

2.5.2	Μετασχηματισμός του Park . . . . .	34
2.5.3	Ανά Μονάδα Σύστημα . . . . .	38
2.5.4	Σύγχρονο Πλαίσιο Αναφοράς . . . . .	39
2.5.5	Εξισώσεις Σύγχρονης Μηχανής . . . . .	41
2.6	Ανορθωτής Διόδων . . . . .	42
2.7	Μετατροπέας Ανύψωσης Τάσης . . . . .	43
2.8	Αντιστροφέας PWM . . . . .	45
<b>3</b>	<b>ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ Α/Γ</b>	<b>47</b>
3.1	Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας . . . . .	47
3.2	Στρατηγική Ελέγχου των Στροφών . . . . .	49
3.3	Μέγιστη Παραγόμενη Ισχύς και Όρια Ρεύματος Γεννήτριας . . . . .	51
3.4	Διαστασιολόγηση και Όρια PWM Αντιστροφέα . . . . .	57
3.4.1	Έυρεση Μέγιστου Ρεύματος Αντιστροφέα . . . . .	60
3.5	Μέθοδοι Ελέγχου Ανεμογεννήτριας . . . . .	60
3.5.1	Ρύθμιση Τάσης Γεννήτριας με Α.Ρ.Τ. . . . .	61
3.5.2	Ρύθμιση Ισχύος Μέσω της Διέγερσης . . . . .	62
3.5.3	Λειτουργία DC/DC Μετατροπέα Ανύψωσης σε Περίπτωση Σταθερής Διέγερσης . . . . .	62
<b>4</b>	<b>ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ Α/Γ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ SIMULINK</b>	<b>63</b>
4.1	Γενικά . . . . .	63
4.2	Αεροδυναμικό Μοντέλο Ανεμοκινητήρα και Μοντέλο Γεννήτριας . . . . .	67
4.2.1	Αεροδυναμικό Μοντέλο και Ελεγκτής Γωνίας Βήματος . . . . .	67
4.2.2	Μοντέλο Γεννήτριας . . . . .	67
4.3	Μοντέλο Α/Γ με Α.Ρ.Τ. Γεννήτριας . . . . .	69
4.3.1	Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσης . . . . .	69
4.3.2	Έλεγχος του PWM Αντιστροφέα . . . . .	70
4.3.3	Αρχικοποίηση Μοντέλου . . . . .	71
4.4	Μοντέλο Α/Γ με Ρύθμιση Ισχύος Μέσω της Διέγερσης . . . . .	73
4.4.1	Έλεγχος Διέγερσης - Μέγιστη Απολαβή Ισχύος . . . . .	73
4.4.2	Έλεγχος του PWM Αντιστροφέα . . . . .	74
4.4.3	Αρχικοποίηση Μοντέλου . . . . .	74
4.5	Λειτουργία DC/DC Μετατροπέα Ανύψωσης σε Περίπτωση Σταθερής Διέγερσης . . . . .	75
4.5.1	Παραλλαγή Μοντέλου Γεννήτριας . . . . .	75
4.5.2	DC/DC Μετατροπέας Ανύψωσης . . . . .	76
4.5.3	Έλεγχος του PWM Αντιστροφέα . . . . .	76
4.5.4	Αρχικοποίηση Μοντέλου . . . . .	77

<b>5</b>	<b>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ</b>	<b>78</b>
5.1	Απόκριση Μοντέλου Α/Γ με Α.Ρ.Τ Γεννήτριας . . . . .	78
5.1.1	Απόκριση Μοντέλου Α/Γ για Χαμηλό Φορτίο (P=0.3 α.μ.) . . . . .	78
5.1.2	Απόκριση Μοντέλου Α/Γ για Μέσο Φορτίο (P=0.7 α.μ.) . . . . .	81
5.1.3	Ευστάθεια Μικρών Διαταραχών . . . . .	84
5.1.4	Επιλογή Παραμέτρων Ελεγκτή Γωνίας Βήματος Πτερυγίων . . . . .	90
5.1.5	Απόκριση Μοντέλου Α/Γ σε Χρονοσειρά Ανέμου . . . . .	92
5.2	Απόκριση Μοντέλου Α/Γ με Ρύθμιση Ισχύος Μέσω της Διέγερσης . . . . .	94
5.2.1	Απόκριση Μοντέλου Α/Γ για Χαμηλό Φορτίο (P=0.3 α.μ.) . . . . .	94
5.2.2	Απόκριση Μοντέλου Α/Γ για Μέσο Φορτίο (P=0.7 α.μ.) . . . . .	97
5.2.3	Ευστάθεια Μικρών Διαταραχών . . . . .	100
5.2.4	Επιλογή Παραμέτρων Ελεγκτή Γωνίας Βήματος Πτερυγίων . . . . .	103
5.2.5	Απόκριση Μοντέλου Α/Γ σε Χρονοσειρά Ανέμου . . . . .	104
5.3	Σύγκριση Μεθόδων Ελέγχου Α/Γ . . . . .	106
5.4	Λειτουργία DC/DC Μετατροπέα Ανύψωσης σε Περίπτωση Σταθερής Διέγερσης . . . . .	107
5.4.1	Ευστάθεια Μικρών Διαταραχών . . . . .	110
<b>6</b>	<b>ΜΕΛΕΤΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΑΣΘΕΝΟΥΣ ΔΙΚΤΥΟΥ</b>	<b>112</b>
6.1	Περιγραφή Δικτύου . . . . .	112
6.2	Μελέτη Βραχυπρόθεσμης Αστάθειας Τάσης . . . . .	114
6.2.1	Αιολικό Πάρκο με Α/Γ Σταθερών Στροφών . . . . .	115
6.2.2	Αιολικό Πάρκο με Α/Γ με Πλήρη Μετατροπέα και Ρύθμιση Συντελεστή Ισχύος . . . . .	118
6.2.3	Αιολικό Πάρκο με Α/Γ με Πλήρη Μετατροπέα και Ρύθμιση Τάσης Δικτύου . . . . .	120
6.3	Προσδιορισμός Μέγιστης Αιολικής Διείδυσης . . . . .	123
6.3.1	Αιολικό Πάρκο με Α/Γ Σταθερών Στροφών . . . . .	123
6.3.2	Αιολικό Πάρκο με Α/Γ με Πλήρη Μετατροπέα και Ρύθμιση Συντελεστή Ισχύος . . . . .	125
6.4	Μελέτη Απόκρισης Δικτύου για Μεταβλητή Ταχύτητα Ανέμου . . . . .	126
<b>7</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ</b>	<b>129</b>
7.1	Συμπεράσματα . . . . .	129
7.2	Προοπτικές . . . . .	130
<b>A'</b>	<b>ΚΩΔΙΚΑΣ MATLAB</b>	<b>132</b>
1.1	initialization1.m . . . . .	132
1.2	wind.m . . . . .	134
1.3	initialization2.m . . . . .	134
1.4	equations.m . . . . .	136
1.5	modana.m . . . . .	136

Βιβλιογραφία

138

---

---

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

---

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Απελευθέρωση Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

#### 1.1.1 Εισαγωγή

Μέχρι πρόσφατα, στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας επικρατούσε, σχεδόν διεθνώς, μονοπωλιακό καθεστώς για την παραγωγή, μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας ή αν υπήρχαν διαφορετικές εταιρίες διανομής αυτές προμηθεύονταν την ηλεκτρική ενέργεια από έναν προμηθευτή. Η οργάνωση αυτή της αγοράς διευκόλυνε την ανάπτυξη μεγάλου μεγέθους συστημάτων μεταφοράς και σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και επέτρεπε στις κυβερνήσεις να ασκήσουν κοινωνική πολιτική. [1]

Η δημιουργία μιας ενιαίας αγοράς ενέργειας στις χώρες μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης στηριζόμενης σε ανοικτές και ανταγωνιστικές αγορές άρχισε να σχεδιάζεται στις αρχές της προηγούμενης δεκαετίας. Η κίνηση αυτή αποτελούσε μεγάλη πρόκληση για την Ευρωπαϊκή Ένωση δεδομένου ότι προβλεπόταν να έχει άμεση επίδραση στην ευρωπαϊκή βιομηχανία, τους μεγάλους εμπορικούς καταναλωτές αλλά και τους οικιακούς καταναλωτές, και γενικότερα να συμβάλλει στην ευημερία των καταναλωτών.

Σημαντικοί σταθμοί στην όλη πορεία του ενεργειακού τομέα της Ευρωπαϊκής Ένωσης τα τελευταία χρόνια, υπήρξαν οι δύο οδηγίες του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου για την σταδιακή απελευθέρωση των εσωτερικών αγορών ηλεκτρισμού και φυσικού αερίου, αντιστοίχως.

Η Οδηγία 96/92/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου για την απελευθέρωση της εσωτερικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω θέσπισης σχετικών κοινών κανόνων σε όλο το φάσμα δραστηριοτήτων του τομέα, τέθηκε σε ισχύ στις 19.02.1997, ενώ η έναρξη της πρώτης φάσης ανοίγματος της σχετικής αγοράς άρχισε τυπικά στις 19.02.1999. Για τη χώρα μας ισχύει από τις 19.02.2001.

Η εν λόγω οδηγία θεσπίζει κανόνες, οι οποίοι επιτρέπουν πραγματικό ανταγωνισμό μετα-

ξύ παραγωγών ηλεκτρικής ενέργειας. Μολονότι εξυπηρετεί την απελευθέρωση των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας, δίνει παράλληλα ιδιαίτερη έμφαση στις υπηρεσίες κοινής ωφέλειας, προβλέποντας μηχανισμούς υλοποίησης των επιλογών των εν λόγω υπηρεσιών στο πλαίσιο μιας ανταγωνιστικής αγοράς. Πιο συγκεκριμένα οι βασικές αρχές της είναι: [1]

- Κάθετα οργανωμένες ηλεκτρικές εταιρίες, δηλαδή εταιρίες που καλύπτουν και τους τρεις τομείς της παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας να ανεξαρτητοποιήσουν αυτούς τους τομείς.
- Να καταργηθούν αποκλειστικά δικαιώματα εταιριών.
- Όλοι οι πελάτες, ανεξάρτητοι παραγωγοί ηλεκτρικής ενέργειας και οποιοσδήποτε παράγει ή εμπορεύεται ηλεκτρική ενέργεια να έχει πρόσβαση στο δίκτυο μεταφοράς ή τροφοδοσίας ηλεκτρικής ενέργειας.

Σύμφωνα με αυτές τις αρχές μπορούν να δημιουργηθούν στην Ευρώπη δύο ανταγωνιστικές αγορές, δηλαδή οι αγορές της παραγωγής και της τροφοδοσίας (πώλησης) της ηλεκτρικής ενέργειας, που θα διασυνδέονται με μια μονοπωλιακή αγορά, δηλαδή τη μεταφορά. Η μεταφορά θα παραμείνει μονοπωλιακή, γιατί για να υπάρξει πραγματικός ανταγωνισμός στη μεταφορά θα έπρεπε να κατασκευαστεί ένα δίκτυο παράλληλο προς το υπάρχον κάτι που είναι πολύ δαπανηρό. Η τροφοδοσία των καταναλωτών θα γίνεται από εταιρίες, που θα χρησιμοποιούν συμβόλαια μεταφοράς.

### 1.1.2 Προβλήματα

Η διεθνής εμπειρία απέδειξε ότι για την επιτυχή απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρισμού απαιτείται η επίλυση πολύπλοκων και αλληλοσυγκρουόμενων τεχνοοικονομικών προβλημάτων, που επιτυγχάνεται με μακροχρόνιες και εξελισσόμενες διαδικασίες. Το νέο ανταγωνιστικό περιβάλλον αλλάζει τις ευθύνες αλλά και τις ευκαιρίες για την παραγωγή, μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας και διευρύνει τα τεχνικά προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Τα κυριότερα από αυτά είναι: [1]

- Αύξηση της πολυπλοκότητας λειτουργίας του ηλεκτρικού συστήματος. Το σύστημα μεταφοράς λειτουργούσε με στόχο το μέγιστο όφελος ενός, ενώ τώρα πρέπει να παρέχει υπηρεσίες, αδιάκριτα, σε όσους το ζητούν. Συνεπώς οι υπηρεσίες πρέπει να είναι αυστηρώς προγραμματισμένες και το σύστημα να λειτουργεί αξιόπιστα κάτι που δυσχεραίνεται από τα αλληλοσυγκρουόμενα συμφέροντα παραγωγών, προμηθευτών και καταναλωτών.
- Αύξηση της ισχύος που μεταφέρει το σύστημα. Αυτό θα οδηγήσει σε αύξηση της χρήσης των υπαρχόντων εγκαταστάσεων, μείωση της αξιοπιστίας του συστήματος και δυσκολίες στον προγραμματισμό των συντηρήσεων.



- Η αξιοπιστία κάλυψης του φορτίου. Ποιοί κανόνες θα ρυθμίζουν τα θέματα των παραγωγών που δεν τηρούν τις υποχρεώσεις τους σε παροχή ισχύος και των προμηθευτών που δεν υπολογίζουν σωστά τις ανάγκες τους σε ισχύ; Ποιός θα έχει την ευθύνη για την εξισορρόπηση του φορτίου και με ποιούς κανόνες θα λειτουργεί;

### 1.1.3 Κατάσταση στην Ελλάδα

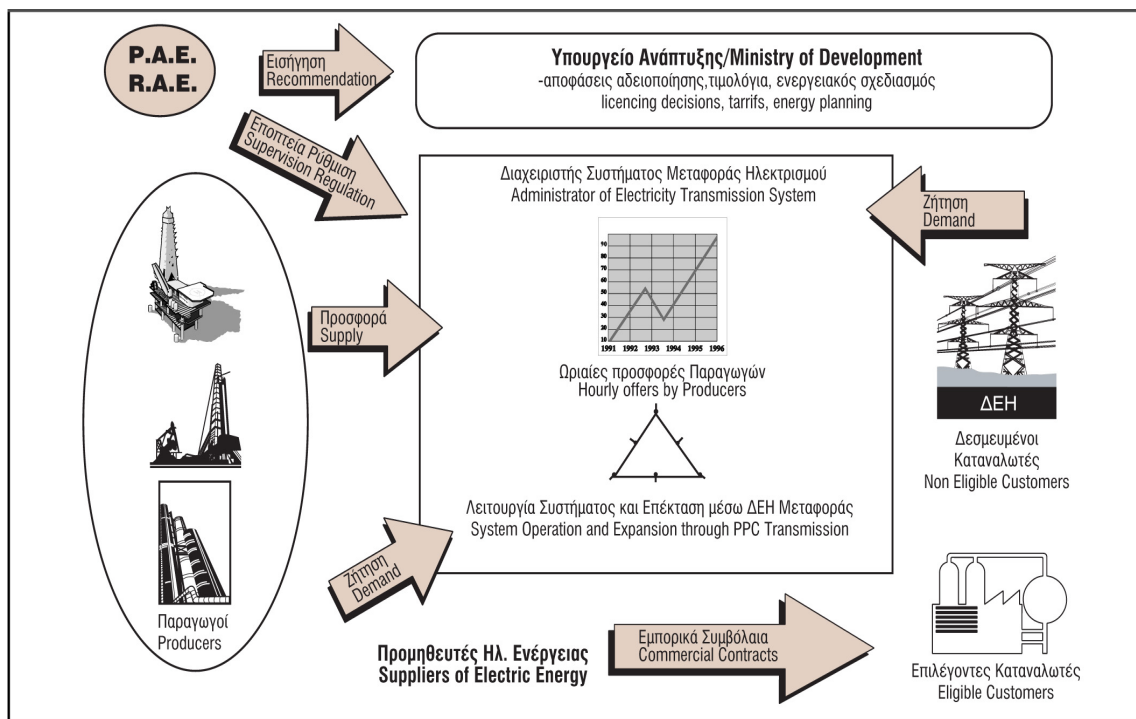
Μετά την θέσπιση και θέση σε ισχύ των κοινοτικών Οδηγιών 96/92/EK και 98/30/EK, η σταδιακή απελευθέρωση των κοινοτικών ενεργειακών αγορών ηλεκτρισμού και φυσικού αερίου, αντιστοίχως, είναι πλέον γεγονός.

Ειδικότερα, η Ελλάδα, στο πλαίσιο των αναγκαίων προσαρμογών προς τις απαιτήσεις των ανωτέρω οδηγιών, έχει ήδη θεσπίσει πρόσφατα το νέο σημαντικό Ν 2773/1999 (ΦΕΚ 286 Α/22.12.1999) περί απελευθέρωσης της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και ρύθμισης θεμάτων ενεργειακής πολιτικής, με τον οποίο εκσυγχρονίζεται το εθνικό σύστημα παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Βάσει του ανωτέρω νόμου ιδρύθηκε η ανεξάρτητη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (Ρ.Α.Ε.) που παρακολουθεί και ελέγχει τη λειτουργία ολόκληρης της αγοράς ενέργειας, γνωμοδοτεί για τη χορήγηση των αδειών στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας, επιβάλλει στους παραβάτες τα πρόστιμα και ενημερώνει την Επιτροπή της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την εξέλιξη της απελευθέρωσης της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης ιδρύθηκε και ο Διαχειριστής Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (Δ.Ε.Σ.Μ.Η.Ε.) που λειτουργεί, εκμεταλλεύεται, διασφαλίζει τη συντήρηση και μεριμνά για την ανάπτυξη του Συστήματος. Επίσης παρέχει πρόσβαση στο Σύστημα στους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας και στο διαχειριστή του δικτύου διανομής, που ανήκει και διαχειρίζεται η Δ.Ε.Η. Πιο συγκεκριμένα σύμφωνα με τον παραπάνω νόμο το κράτος έχει τη μέριμνα για τον εκσυγχρονισμό και την ανάπτυξη των δραστηριοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας, για την εξασφάλιση υπό συνθήκες ανταγωνισμού της παροχής αξιόπιστης και οικονομικής ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές και για την εφαρμογή των κανόνων της σταδιακής απελευθέρωσης της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο διάγραμμα 1.1 [2] παρουσιάζεται σε γραφική απεικόνιση η οργάνωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας όπως αυτή αναμένεται να λειτουργήσει.

### 1.1.4 Συμπεράσματα

Κατά την διάρκεια των δύο τελευταίων δεκαετιών, ο ανταγωνισμός στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται συνεχώς στην Ευρώπη ενώ η ανοιχτή πρόσβαση στο δίκτυο μεταφοράς είναι σε κάποιες περιπτώσεις ακόμα περιορισμένη. Οι περιορισμοί αυτοί πηγάζουν από το γεγονός ότι οι πρώην μονοπωλιακές εταιρείες προτιμούν να διοχετεύουν την δική τους μόνο παραγωγή σε περιπτώσεις συμφόρησης του δικτύου. Επιπλέον οι πολύπλοκοι κανόνες λειτουργίας και οι πολλές φορές αυθαίρετοι οικονομικοί διακανονισμοί κάνουν το σύστημα μεταφοράς τροχοπέδη της ουσιαστικής απελευθέρωσης και του υγιούς ανταγωνισμού.



Σχήμα 1.1: Οργάνωση της Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η διεθνής εμπειρία απέδειξε ότι η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρισμού είναι από τα πιο σύνθετα τεχνικοοικονομικά προβλήματα. Βασικοί στόχοι της απελευθέρωσης πρέπει να είναι η μείωση του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας με βελτίωση των προσφερόμενων υπηρεσιών, η διατήρηση της αξιοπιστίας του συστήματος, η διαφύλαξη του περιβάλλοντος και η δίκαιη κατανομή των κερδών μεταξύ καταναλωτών και επενδυτών. Όμως, αυτοί οι στόχοι είναι αλληλοσυγκρουόμενοι και απαιτείται ένα διοικητικό όργανο που να διασφαλίζει τις λεπτές ισορροπίες. Ο καθορισμός ενός συνόλου κανόνων, που να καθορίζουν τη λειτουργία της αγοράς είναι κρίσιμος, αλλά δεν είναι δυνατόν να καθοριστούν όλοι σε μια μέρα. Απαιτείται επίπονη μελέτη και σχεδιασμός γιατί οποιαδήποτε αποτυχία έχει καταστροφικές συνέπειες στην οικονομική και κοινωνική οργάνωση της χώρας, αφού ο ηλεκτρισμός είναι σημαντικό στοιχείο της σύγχρονης κοινωνίας. Οι θεσμικές αλλαγές στα συστήματα διαχείρισης και αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας συνεχώς επεκτείνονται σε όλο και περισσότερες χώρες και ηπείρους υπό το κράτος των συντελούμενων μεταβολών στις οικονομικές, τεχνολογικές, και κοινωνικές παραμέτρους. Ο τρόπος και ο ρυθμός αλλαγών ποικίλλουν από χώρα σε χώρα, ανάλογα με τις υφιστάμενες συνθήκες ενεργειακής πολιτικής και στο βαθμό της κρατικής παρέμβασης και της νομικής προετοιμασίας. Τα δημοσιευμένα δεδομένα από την εφαρμογή της αλλαγής στις χώρες που προηγήθηκαν, δείχνουν ευνοϊκή την επίδραση των αλλαγών τόσο στο κόστος όσο και στην ποιότητα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. [1]

## 1.2 Διεσπαρμένη Παραγωγή-Μικροδίκτυα

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια σημαντική αλλαγή στη συμβατική λειτουργία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας λόγω της μεγάλης κλίμακας διείσδυσης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο της μέσης ή της χαμηλής τάσης. Έτσι αναπτύσσεται η Διεσπαρμένη Παραγωγή, με γοργούς ρυθμούς, κατακτώντας ένα σημαντικό τμήμα της εγκατεστημένης ισχύος στα Ηλεκτρικά Συστήματα. Διαφαίνεται η τάση μετατόπισης από τις επενδύσεις σε μεγάλες μονάδες της κεντρικής παραγωγής, που συνδέονται στα Δίκτυα Μεταφοράς, σε πολλές μικρές διεσπαρμένες μονάδες, που συνδέονται απ'ευθείας στα Δίκτυα Διανομής. Με τη νέα αυτή φιλοσοφία αποφεύγεται η επιπλέον φόρτιση των Δικτύων Μεταφοράς. Επιπλέον σε περιπτώσεις γενικών διακοπών, καθίσταται ευκολότερη η επανεναργόποιηση των Ηλεκτρικών Συστημάτων.

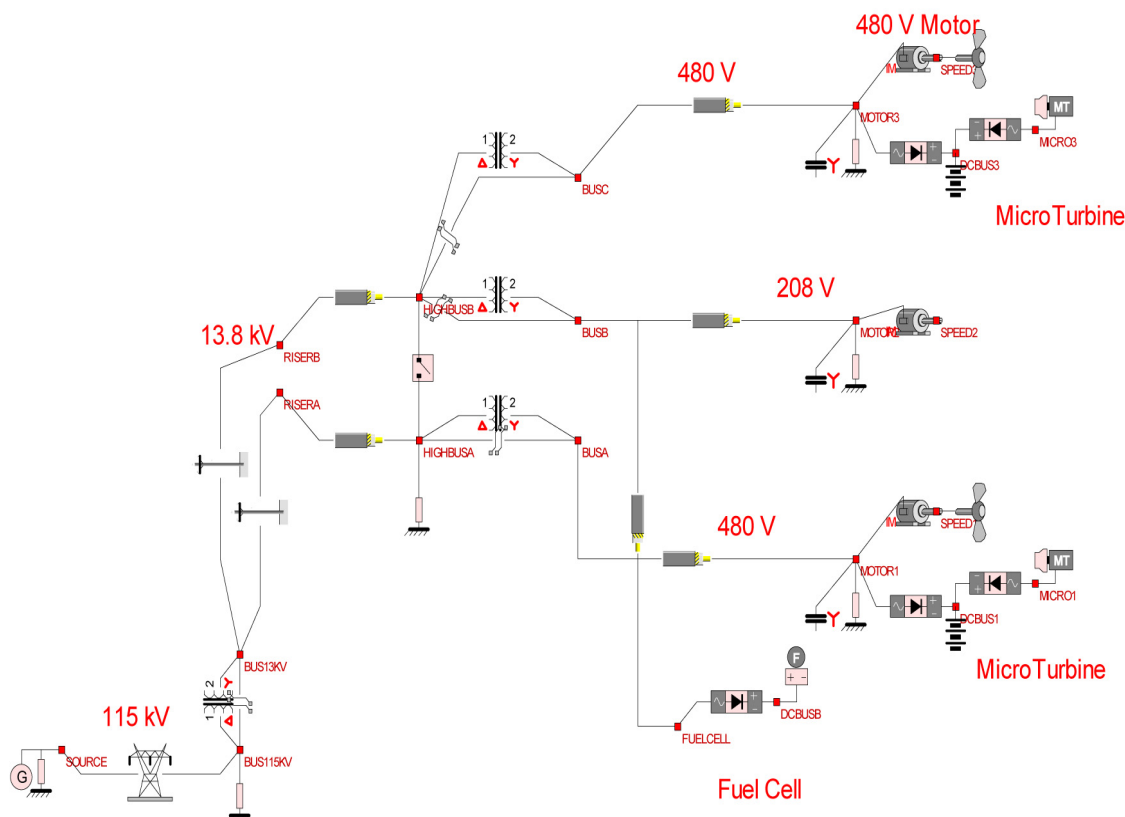
Για την μέγιστη αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων της Διεσπαρμένης Παραγωγής απαιτείται να αλλάξει η φιλοσοφία σχεδιασμού και ανάπτυξης των Δικτύων Διανομής. Είναι γεγονός ότι, τα παλιά δίκτυα Διανομής δεν ήταν σχεδιασμένα για να συνδέονται με μεγάλες ποσότητες ισχύος από Διεσπαρμένη Παραγωγή. Για αυτό είναι πολύ πιθανό να εμφανίζονται προβλήματα στη λειτουργία τους όταν ο βαθμός διείσδυσης της Διεσπαρμένης Παραγωγής ξεπεράσει ένα ορισμένο όριο της τάξης του 30% της θερμικής παραγωγής. Περαιτέρω, η διαχείριση των Δικτύων, που συνδέονται με Α.Π.Ε, είναι δύσκολη εξαιτίας της στοχαστικής φύσης των πρωτογενών μορφών ενέργειας, που χρησιμοποιούνται.

Αυτό ενισχύεται από την επερχόμενη λειτουργία των μικροδικτύων (Microgrids) τα οποία αποτελούν τμήμα μίας γενικότερης τάσης για αλλαγή του τρόπου λειτουργίας των ηλεκτρικών συστημάτων ανά τον κόσμο που ουσιαστικά οφείλεται στην γενικότερη έννοια της διεσπαρμένης παραγωγής.

Τα μικροδίκτυα είναι ένα νέο είδος συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που στο μέλλον αναμένεται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο. Αποτελούνται από μικρές μονάδες παραγωγής (μικροπηγές) όπως μικροτουρμπίνες, κυψέλες καυσίμου ή φωτοβολταϊκά κύτταρα σε συνδυασμό με μέσα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (μπαταρίες, σφόνδυλοι) αλλά και ελεγχόμενα φορτία. Τα παραπάνω λειτουργούν στην χαμηλή τάση, είτε συνδεδεμένα με το κεντρικό δίκτυο παραγωγής ισχύος είτε απομονωμένα (νησιδοποιημένα) με οργανωμένο και ελεγχόμενο τρόπο [3]. Ένα παράδειγμα μικροδικτύου φαίνεται στο σχήμα 1.2. [4]

Η ανάπτυξη των μικροδικτύων κρίνεται ελπιδοφόρα για την λειτουργία των Σ.Η.Ε. καθώς έχουν πολλά πλεονεκτήματα. Πιο συγκεκριμένα: [5]

- Η επίδραση των μικροδικτύων στο περιβάλλον αναμένεται να είναι μικρότερη σε σχέση με αυτή των μεγάλων συμβατικών θερμικών ή υδροηλεκτρικών σταθμών κι αυτό γιατί αναμένεται η μείωση εκπομπής αερίων υπεύθυνων για το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την ανάπτυξη τεχνολογιών που θα επιτρέπουν την συνεργασία ανάμεσα στα μικροδίκτυα και σε αποθηκευτικά μέσα ηλεκτρικής ενέργειας.
- Η μείωση της φυσικής και ηλεκτρικής απόστασης μεταξύ της παραγωγής και της κατανάλωσης είναι πολύ σημαντική καθώς συμβάλλει:



Σχήμα 1.2: Μονογραμμικό Διάγραμμα Ακτινικού Μικροδικτύου

- Στη βελτίωση της αέργυ υποστήριξης του συστήματος με αποτέλεσμα να βελτιώνεται το επίπεδο τάσης.
  - Στην αποσυμφόρηση των συστημάτων μεταφοράς και διανομής.
  - Στη μείωση των απωλειών στην υψηλή τάση.
  - Στη μείωση ή αναβολή επενδύσεων κεφαλαίου για την ενίσχυση των δικτύων μεταφοράς και διανομής, αλλά και των κεντρικών σταθμών παραγωγής.
- Τα μικροδίκτυα μπορούν να συμβάλλουν στην αύξηση της αξιοπιστίας του συστήματος και στην ποιότητα της ισχύος αφενός λόγω της καλύτερης σχέσης μεταξύ ζήτησης και παροχής και αφετέρου λόγω της μείωσης της επίδρασης των σφαλμάτων στα επίπεδα μεταφοράς ή/και διανομής.
  - Μπορεί να επιτευχθεί αύξηση της αποδοτικότητας παροχής ηλεκτρισμού και θέρμανσης (συστήματα συμπαραγωγής).
  - Τα μικροδίκτυα μπορούν να συμβάλλουν στη μείωση του ποσοστού κυριαρχίας στην αγορά ενέργειας των υπάρχοντων εταιριών παραγωγής με αποτέλεσμα τη μείωση του

κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας.

Ωστόσο η ανάπτυξη των μικροδικτύων αντιμετωπίζει μέχρι σήμερα αρκετά προβλήματα. Τα κυριότερα από αυτά είναι:

- Μεγάλο κόστος των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής: Αυτό λύνεται μέσω κρατικών επιδοτήσεων που προωθούν τις επενδύσεις. Ωστόσο μακροπρόθεσμα μπορεί να θεωρηθεί ως παράγοντας αλλοίωσης της υγιούς ανταγωνιστικότητας.
- Τεχνολογικές δυσκολίες που οφείλονται σε έλλειψη εμπειρίας και την τεχνολογική αδυναμία αποτελεσματικού ελέγχου μεγάλου αριθμού μικροπηγών. Γι αυτό το λόγο απαιτείται περισσότερη έρευνα όσον αφορά την ανάπτυξη δυναμικών μοντέλων των μικροπηγών, την προσομοίωση της λειτουργίας και του ελέγχου των μικροδικτύων και τέλος τις μεθόδους προστασίας τους.
- Έλλειψη κανονισμών, προτύπων και πρωτοκόλλων για σημαντικά θέματα όπως η ποιότητα ισχύος και η διείσδυση των μικροπηγών στην αγορά ενέργειας. Επίσης δεν υπάρχουν οδηγίες ασφάλειας και προστασίας.

## 1.3 Αιολική διείσδυση στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

### 1.3.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Ως Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.) ορίζονται οι ενεργειακές πηγές (αιολική, υδραυλική, βιομάζα, ηλιακή και γεωθερμική), οι οποίες υπάρχουν σε αφθονία στο φυσικό μας περιβάλλον. Είναι οι πρώτες μορφές ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος, σχεδόν αποκλειστικά, μέχρι τις αρχές του 20ου αιώνα, οπότε και στράφηκε στην εντατική χρήση του άνθρακα και των υδρογονανθράκων.

Το ενδιαφέρον για την ευρύτερη αξιοποίηση των Α.Π.Ε, καθώς και για την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδοτικών τεχνολογιών που δεσμεύουν το δυναμικό τους παρουσιάστηκε αρχικά μετά την πρώτη πετρελαϊκή χρήση του 1979 και παγιώθηκε την τελευταία δεκαετία, μετά τη συνειδητοποίηση των παγκόσμιων περιβαλλοντικών προβλημάτων. Τα εγγενή πλεονεκτήματα των Α.Π.Ε. και κυρίως η ουσιαστική συμβολή τους στην ενεργειακή ανεξάρτηση της ανθρωπότητας από τους εξαντλήσιμους ενεργειακούς πόρους, επιτάσσουν αυτήν τη στροφή.

Για πολλές χώρες, οι Α.Π.Ε. αποτελούν μία σημαντική εγχώρια πηγή ενέργειας, με μεγάλες δυνατότητες ανάπτυξης σε τοπικό και εθνικό επίπεδο. Συνεισφέρουν σημαντικά στο ενεργειακό τους ισοζύγιο, συμβάλλοντας στη μείωση της εξάρτησης από το ακριβό και εισαγόμενο πετρέλαιο και στην ενίσχυση της ασφάλειας του ενεργειακού τους εφοδιασμού. Παράλληλα, συντελούν και στην προστασία του περιβάλλοντος, καθώς έχει πλέον

διαπιστωθεί ότι ο ενεργειακός τομέας είναι ο πρωταρχικός υπεύθυνος για τη ρύπανση του περιβάλλοντος.

Πραγματικά, σχεδόν το 95% της ατμοσφαιρικής ρύπανσης οφείλεται στην παραγωγή, το μετασχηματισμό και τη χρήση των συμβατικών καυσίμων (άνθρακας και πετρέλαιο). Φαίνεται συνεπώς ότι ο μόνος δυνατός τρόπος για να μπορέσει η Ευρωπαϊκή Ένωση να ανταποκριθεί στο φιλόδοξο στόχο που έχει θέσει, για σημαντικό περιορισμό των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα ( $CO_2$ ), είναι να επιταχύνει την ανάπτυξη των Α.Π.Ε.

Τα κύρια πλεονεκτήματα των Α.Π.Ε, είναι τα εξής:

- Είναι πρακτικά ανεξάντλητες πηγές ενέργειας και συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από εξαντλήσιμους συμβατικούς ενεργειακούς πόρους.
- Είναι εγγύριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτητοποίησης και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε εθνικό επίπεδο.
- Είναι διάσπαρτες γεωγραφικά και οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, δίνοντας τη δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών αναγκών σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, ανακουφίζοντας έτσι τα συστήματα υποδομής και μειώνοντας τις απώλειες από τη μεταφορά ενέργειας.
- Προσφέρουν τη δυνατότητα ορθολογικής αξιοποίησης των ενεργειακών πόρων, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα των ενεργειακών αναγκών των χρηστών (π.χ. ηλιακή ενέργεια για θερμότητα χαμηλών θερμοκρασιών, αιολική ενέργεια για ηλεκτροπαραγωγή).
- Έχουν συνήθως χαμηλό λειτουργικό κόστος που δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων.
- Οι εγκαταστάσεις εκμετάλλευσης των Α.Π.Ε. έχουν σχεδιαστεί για να καλύπτουν τις ανάγκες των χρηστών και σε μικρή κλίμακα εφαρμογών ή σε μεγάλη κλίμακα, αντίστοιχα, έχουν μικρή διάρκεια κατασκευής, επιτρέποντας έτσι τη γρήγορη ανταπόκριση της προσφοράς προς τη ζήτηση ενέργειας.
- Οι επενδύσεις των Α.Π.Ε. δημιουργούν σημαντικό αριθμό νέων θέσεων εργασίας, ιδιαίτερα σε τοπικό επίπεδο.
- Μπορούν να αποτελέσουν σε πολλές περιπτώσεις πυρήνα για την αναζωογόνηση οικονομικά και κοινωνικά υποβαθμισμένων περιοχών και πόλο για την τοπική ανάπτυξη, με την προώθηση ανάλογων επενδύσεων (π.χ. θερμοκηπιακές καλλιέργειες με τη χρήση γεωθερμικής ενέργειας).
- Είναι φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο και η αξιοποίησή τους είναι γενικά αποδεκτή από το κοινό.

### 1.3.2 Αιολική Ενέργεια

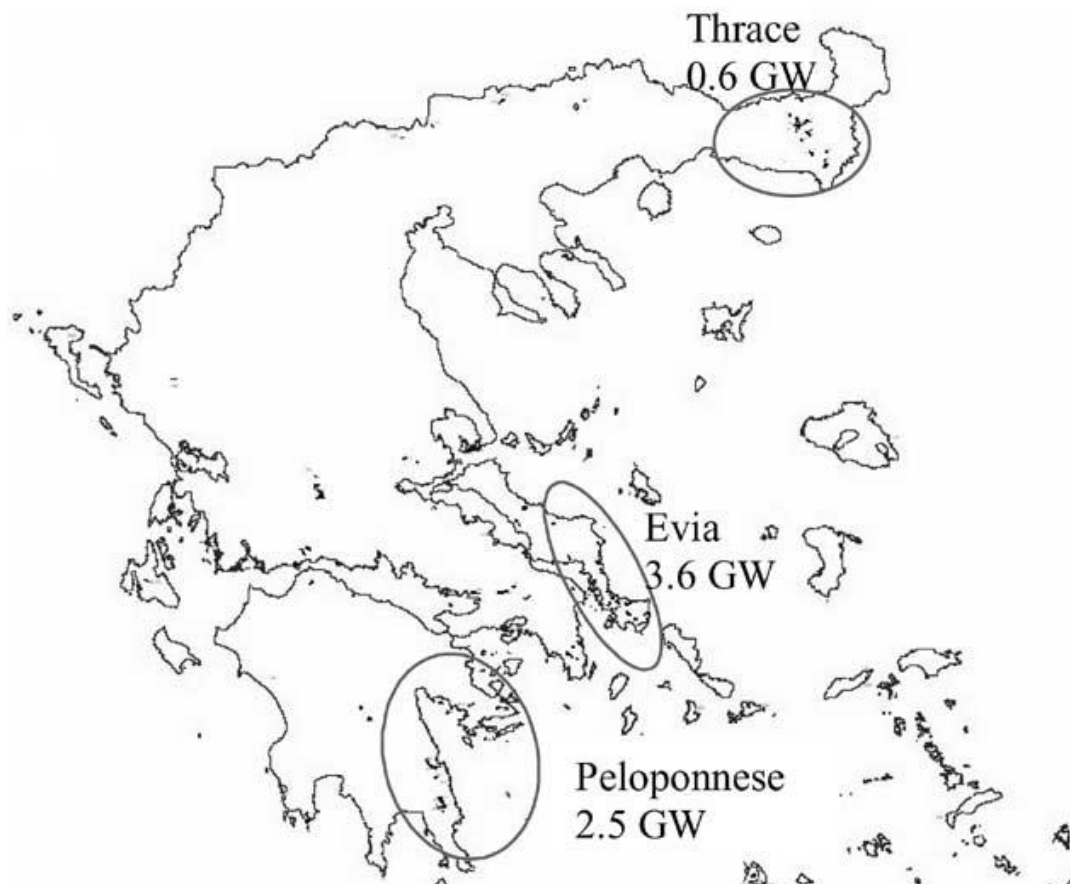
Κυρίαρχη θέση μεταξύ των Α.Π.Ε. κατέχει η αιολική ενέργεια. Αυτό οφείλεται, αφενός στην συνεχή βελτίωση της τεχνολογίας των ανεμογεννητριών και αφετέρου στη μείωση του κόστους της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από αυτές, φτάνοντας σε επίπεδο συγκρίσιμο με το κόστος παραγωγής από συμβατικές μονάδες.

Την τελευταία δεκαετία η παγκόσμια εγκατεστημένη αιολική ισχύς έχει αυξηθεί ραγδαία. Στις Η.Π.Α. υπολογίζεται ότι μέχρι το 2005 είχαν εγκατασταθεί 6.8 GW αιολικής ισχύος. Στην Αυστραλία η αιολική παραγωγή σχεδόν διπλασιάστηκε από τα 198 MW το 2003 στα 380 MW στο τέλος του 2004. Τέλος στην Ευρώπη στα τέλη του 2003 η αιολική διείσδυση έφτανε τα 28.7 GW, με τις Γερμανία, Ισπανία και Δανία να ξεχωρίζουν μεταξύ των άλλων χωρών όσον αφορά στην ισχύ των αιολικών πάρκων που διαθέτουν.

Στην Ελλάδα η κατάσταση σχετικά με την αιολική ενέργεια δεν είναι αρκετά ικανοποιητική. Παρά το μεγάλο αιολικό δυναμικό που έχει η χώρα μας, μόνο το 1.7% της συνολικής απαιτούμενης ενέργειας καλύφθηκε το 2003 από αιολική παραγωγή [6]. Μετά την υπογραφή του πρωτοκόλλου του Κιότο το Δεκέμβριο του 1997 η Ελλάδα, ως μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ακολουθεί την ευρωπαϊκή πολιτική όσον αφορά την εκπομπή αερίων που είναι υπεύθυνα για το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Κύριος στόχος είναι η επίτευξη ποσοστού 20.1% διείσδυσης Α.Π.Ε. στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι το 2010. Γι' αυτό το λόγο δίνεται πληθώρα κινήτρων στους ανεξάρτητους παραγωγούς μεταξύ των οποίων επενδυτικές επιχορηγήσεις, εγγυημένη σύνδεση στο δίκτυο, μακροπρόθεσμα συμβόλαια κτλ. Επιπρόσθετα, η απελευθέρωση των ενεργειακών αγορών καταργεί το καθετοποιημένο σύστημα παραγωγής - μεταφοράς - διανομής και επομένως παρέχει τη δυνατότητα στους υποψήφιους ανεξάρτητους παραγωγούς να επενδύσουν σε περιοχές της επιλογής τους ανάλογα με τα συμφέροντά τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να έχουν κατατεθεί στην Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (Ρ.Α.Ε.) αιτήσεις για εγκατάσταση αιολικών πάρκων, ισχύος πάνω από 13.000 MW. Περισσότερες από τις μισές αιτήσεις (6.700 MW) αφορούν περιοχές της Ελλάδας με μεγάλο αιολικό δυναμικό όπως η Εύβοια, η Νοτιοανατολική Πελοπόννησος και η Θράκη [7], όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3 [7].

Ωστόσο, παρά το τεράστιο ενδιαφέρον από ανεξάρτητους παραγωγούς, σήμερα είναι εγκατεστημένα και λειτουργούν αιολικά πάρκα συνολικής ισχύος περίπου 500 MW. Κύρια εμπόδια αποτελούν αφενός οι χρονοβόρες και επίπονες διαδικασίες έκδοσης αδειών εγκατάστασης (που κυρίως οφείλονται στην έλλειψη χωροταξικού σχεδιασμού και την μη επαρκή στελέχωση και εκπαίδευση των αρμόδιων περιφερειακών υπηρεσιών) και αφετέρου νομικά ζητήματα που οφείλονται σε αντιδράσεις πολιτών (οι οποίες οφείλονται εν γένει στην ελλιπή ενημέρωσή τους). Από τεχνικής απόψεως περιορισμοί διείσδυσης αιολικής ισχύος δημιουργούνται από τα όρια μεταφερόμενης ισχύος στην ενδοχώρα και από τα όρια διείσδυσης στα νησιά. Έτσι παρά το γεγονός ότι έχει εγκριθεί από την Ρ.Α.Ε. η λειτουργία αιολικών πάρκων ισχύος 3260 MW, η παρούσα συνολική αιολική διείσδυση είναι μικρή [8].

Στο σχήμα 1.4 [9] παρατηρούμε την εξέλιξη της αιολικής εγκατεστημένης ισχύος στην Ελλάδα. Μετά το 1998 παρατηρείται μια ραγδαία αύξηση των εγκατεστημένων αιολικών πάρκων ενώ η πρόβλεψη για την εξέλιξή τους είναι αρκετά ευοίωνη.



Σχήμα 1.3: Γεωγραφική διανομή αιολικών πάρκων προς εγκατάσταση

## 1.4 Τεχνολογίες Ανεμογεννητριών

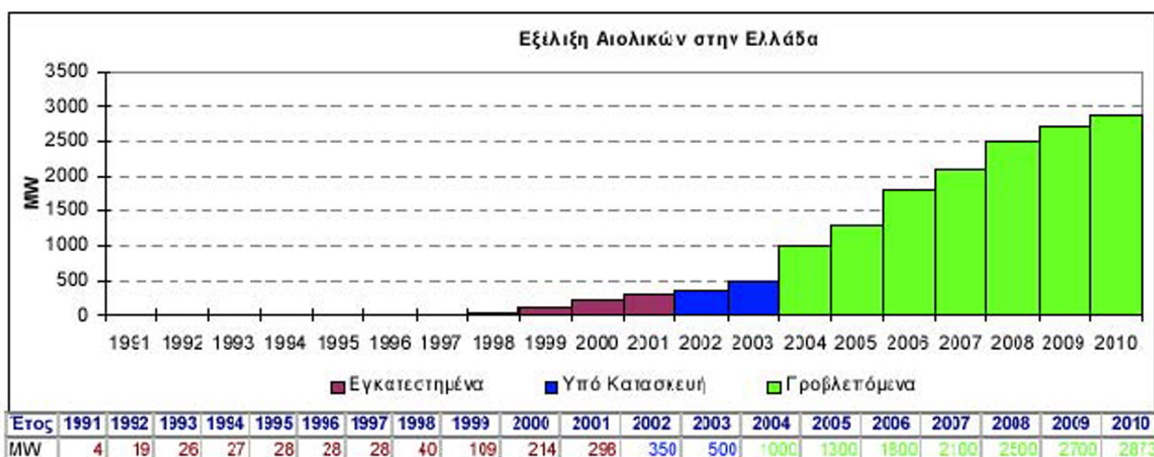
Η λειτουργία της ανεμογεννήτριας (Α/Γ) βασίζεται σε δύο συστήματα μετατροπής ενέργειας:

- το μηχανικό σύστημα, το οποίο μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική ροπή στον ρότορα.
- το ηλεκτρικό σύστημα, στο οποίο η γεννήτρια μετατρέπει την μηχανική ροπή του ρότορα σε ηλεκτρική ενέργεια.

Παρά το γεγονός ότι η παραπάνω περιγραφή φαίνεται αρκετά απλοϊκή στην πραγματικότητα η Α/Γ είναι ένα πολύπλοκο σύστημα το οποίο απαιτεί γνώσεις μηχανολόγου, ηλεκτρολόγου και πολιτικού μηχανικού.

Στο σχήμα 1.5 παρατηρούμε σε λεπτομέρεια τα στοιχεία μιας τυπικής Α/Γ της κατασκευάστριας εταιρίας Enercon [10].



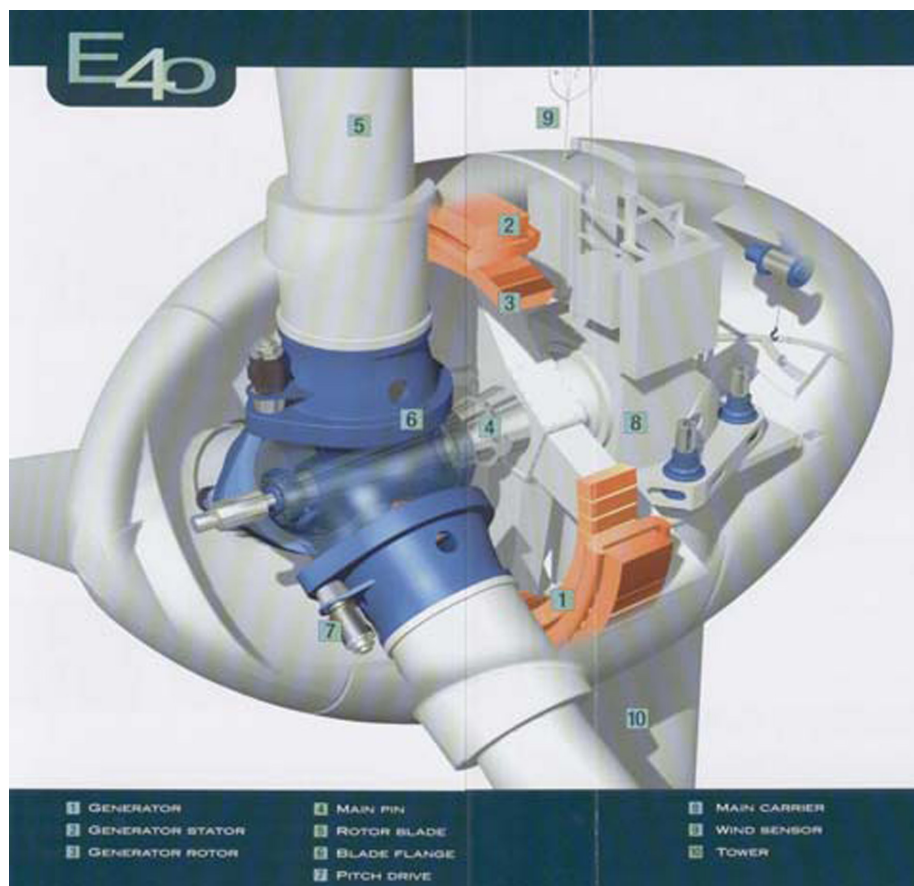


Σχήμα 1.4: Εγκατεστημένη ισχύς των Αιολικών Πάρκων στην Ελλάδα και πρόβλεψη της εξέλιξης της έως το έτος 2010 (πηγή - ΚΑΠΕ)

Οι Α/Γ σήμερα χωρίζονται κυρίως σε μεταβλητών και σταθερών στροφών αναφορικά με την χρήση ή όχι ηλεκτρονικών μετατροπών. Σε αντίθεση με τις Α/Γ σταθερών στροφών που συνδέονται απ'ευθείας στο δίκτυο, οι Α/Γ μεταβλητών στροφών χρησιμοποιούν διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος για την σύνδεσή τους. Τα δύο προαναφερθέντα είδη Α/Γ έχουν το καθένα τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματά του [9, 11].

Πιο συγκεκριμένα οι Α/Γ σταθερών στροφών είναι κατασκευαστικά απλούστερες με αποτέλεσμα να είναι και πιο φθηνές. Πρέπει όμως να είναι και πιο στιβαρές λόγω των μεγαλύτερων μηχανικών καταπονήσεων που δέχονται καθώς η ταχύτητα του δρομέα δεν μπορεί να αλλάξει με αποτέλεσμα οι διαταραχές του ανέμου να μεταφράζονται σε διαταραχές της ροπής. Αυτό εν μέρει καταργεί την μείωση του κόστους που επιτυγχάνεται από το απλούστερο ηλεκτρικό σύστημα. Ένα επιπρόσθετο πρόβλημα είναι αυτό του θορύβου καθώς το επίπεδο θορύβου σχετίζεται με την ταχύτητα του δρομέα της μηχανής η οποία είναι σταθερή. Ωστόσο το πρόβλημα αυτό συνήθως εξαλείφεται με τη χρήση μηχανών με δυνατότητα αλλαγής του αριθμού των πόλων τους με αποτέλεσμα η μηχανή να περιστρέφεται με λιγότερες στροφές σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου.

Το κύριο πλεονέκτημα των Α/Γ μεταβλητών στροφών είναι η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος παρά το γεγονός ότι η ηλεκτρική απόδοση μειώνεται λόγω μικρών απωλειών που οφείλονται στη χρήση των ηλεκτρονικών ισχύος. Επιπρόσθετα έχουμε μικρότερες μηχανικές καταπονήσεις και εξομάλυνση των διαταραχών της ισχύος εξόδου κάτι που συμβάλλει σε βελτίωση της ποιότητας ισχύος. Τέλος παρέχουν τη δυνατότητα ανταλλαγής αέργου ισχύος με το δίκτυο συμβάλλοντας έτσι στη ρύθμιση της τάσης του. Τα κύρια μειονεκτήματα που παρουσιάζουν τα συστήματα μεταβλητών στροφών είναι το αυξημένο κόστος, η πολυπλοκότητα τους και η έγχυση αρμονικών στο δίκτυο. Το πρόβλημα του αυξημένου κόστους αίρεται σταδιακά καθώς τα ονομαστικά μεγέθη και οι χρησιμοποιούμενες διακοπτικές

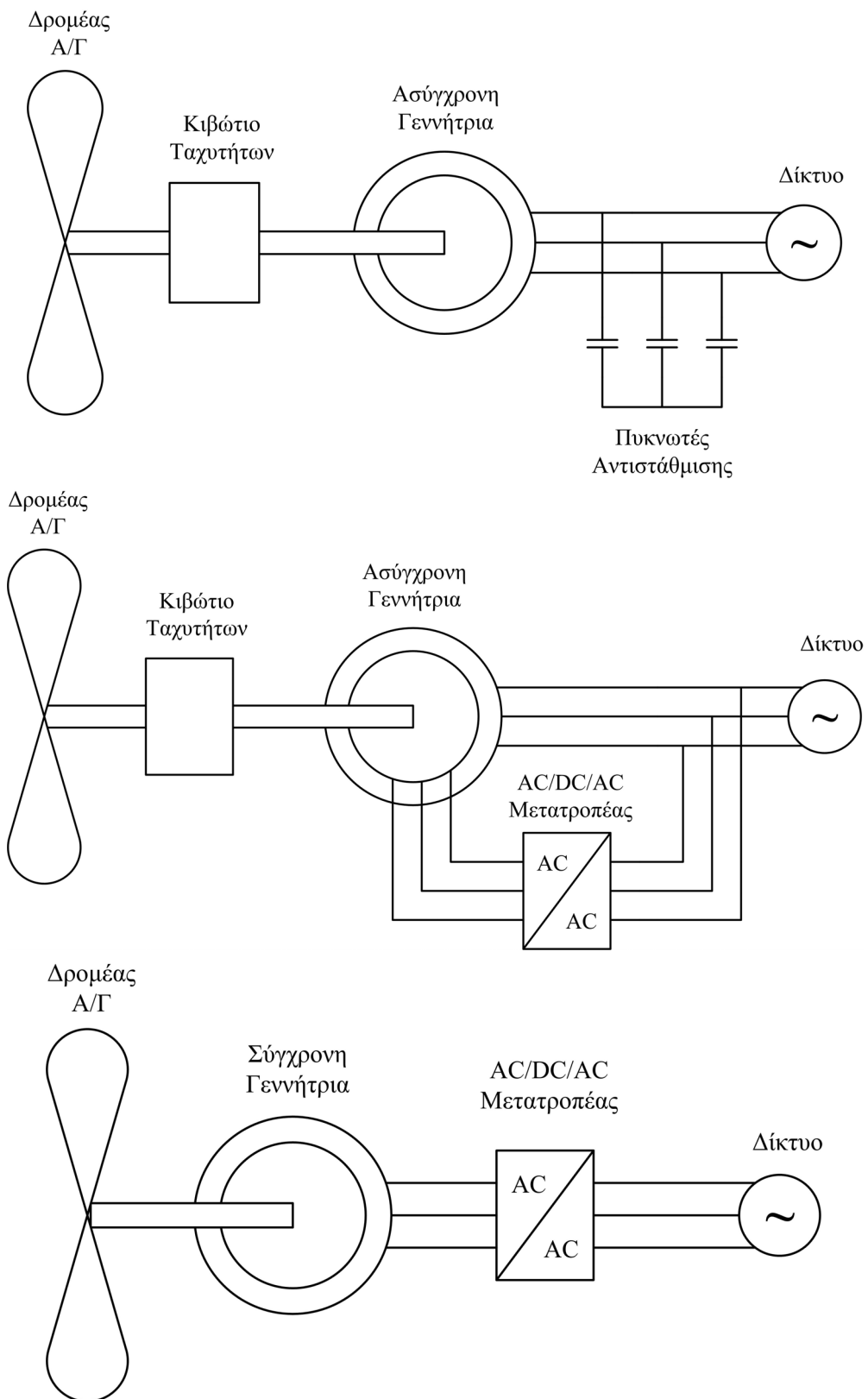


Σχήμα 1.5: Διαμόρφωση του ηλεκτρικού μέρους της Enercon E-40, 600 kW

συχνότητες των ηλεκτρονικών ισχύος αυξάνονται, ενώ το κόστος τους μειώνεται.

Οι συνηθέστεροι τύποι των Α/Γ που είναι εγκατεστημένες στις μέρες μας, αναφορικά με τη διαμόρφωση του ηλεκτρικού μέρους τους φαίνονται στο σχήμα 1.6 και είναι οι εξής:

- Α/Γ σταθερών στροφών, με ασύγχρονη γεννήτρια κλωβού, απ'ευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο.
- Α/Γ μεταβλητών στροφών, με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης (τυλιγμένου δρομέα) με σύστημα μετατροπών ισχύος AC/DC/AC συνδεδεμένο στο δρομέα. Οι μετατροπείς AC/DC και DC/AC είναι δύο όμοιοι μετατροπείς με έλεγχο PWM.
- Α/Γ μεταβλητών στροφών, με σύγχρονη μηχανή είτε μονίμων μαγνητών είτε με σύστημα διέγερσης. Στην περίπτωση πολυπολικής γεννήτριας το κιβώτιο ταχυτήτων μπορεί να παραληφθεί.



Σχήμα 1.6: Εναλλακτικές διαμορφώσεις του ηλεκτρικού μέρους των σημερινών Α/Γ

Συγκρίνοντας τα είδη των Α/Γ μεταβλητών στροφών, συμπεραίνουμε ότι η ανεμογεννήτρια με ασύγχρονη μηχανή διπλής τροφοδότησης έχει το πλεονέκτημα ότι αποτελείται από μια σχετικά απλή μηχανή και φθηνούς ηλεκτρονικούς μετατροπείς καθώς το μέγεθός τους είναι περιορισμένο λόγω του γεγονότος ότι από το δρομέα διέρχεται κλάσμα της συνολικής ισχύος εξόδου, ανάλογο προς την ολίσθηση λειτουργίας της γεννήτριας. Ωστόσο παραμένει το μειονέκτημα της αναγκαστικής ύπαρξης του κιβωτίου ταχυτήτων. Όσον αφορά την Α/Γ με σύγχρονη γεννήτρια, αυτή έχει το πλεονέκτημα της απάλειψης του κιβωτίου ταχυτήτων επιτυγχάνοντας έτσι μείωση του κόστους, του βάρους και του θορύβου. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα είναι ότι έχει τη δυνατότητα, είτε με τη βοήθεια του πεδίου διεγέρσεως της είτε με μόνιμους μαγνήτες, να παράγει η ίδια την απαιτούμενη άεργο ισχύ για την εγκατάσταση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο διάκενό της, με αποτέλεσμα στην πλευρά της γεννήτριας να απαιτείται ένας απλός ανορθωτής διόδων. Ωστόσο μειονεκτεί στο γεγονός ότι απαιτείται ογκώδης, πολύπλοκη και ακριβή μηχανή ενώ και οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς πρέπει να είναι μεγάλοι καθώς τους διαπερνά όλη η παραγόμενη ισχύς.

Ένα άλλο κριτήριο διαχωρισμού των Α/Γ είναι ο τύπος των πτερυγίων και ο τρόπος ελέγχου της γωνίας τους. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι πτερυγίων για τον έλεγχο και περιορισμό της αεροδυναμικής ισχύος και ροπής:

- Οι Α/Γ με αεροδυναμικό έλεγχο της ροπής και ισχύος του δρομέα (stall controlled), διαθέτουν πτερύγια σταθερής κλίσης τα οποία σε υψηλές ταχύτητες ανέμου εμφανίζουν απώλεια αεροδυναμικής στήριξης. Με αυτό τον τρόπο περιορίζεται η αναπτυσσόμενη ροπή και η παραγόμενη ενέργεια.
- Πτερύγια με έλεγχο του βήματός τους, που μπορούν να περιστραφούν κατά τον διαμήκη άξονά τους (pitch controlled). Με αυτό τον τρόπο όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει την ονομαστική της τιμή η γωνία pitch μεταβάλλεται αντίθετα, μεγαλώνει δηλαδή η γωνία με τον άνεμο αποκόπτοντας με αυτό τον τρόπο την περίσσεια αεροδυναμικής ισχύος. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι η ισχύς εξόδου της γεννήτριας μπορεί να ελεγχθεί ταχύτερα με αποτέλεσμα να μην καταπονείται το σύστημα σε περιόδους ριπών ανέμου. Ο ενεργός έλεγχος της γωνίας pitch χρησιμοποιείται σε μεγάλες Α/Γ, άνω του 1 MW.

## 1.5 Αδιάκοπη Παροχή Ισχύος σε Συνθήκες Σφάλματος

Ο αριθμός των αιολικών πάρκων που έχουν συνδεθεί τα τελευταία χρόνια σε πολλές χώρες του κόσμου έχει αυξηθεί με απροσδόκητους ρυθμούς. Επιπρόσθετα το μέσο μέγεθος των εγκατεστημένων Α/Γ τείνει να αυξάνει ολοένα και περισσότερο λόγω των τεχνολογικών καινοτομιών. Το γεγονός αυτό γεννά την ανησυχία ότι εκτεταμένη αποσύνδεση Α/Γ εξαιτίας διαταραχών του δικτύου μπορεί να οδηγήσει σε αστάθειες του συστήματος και να

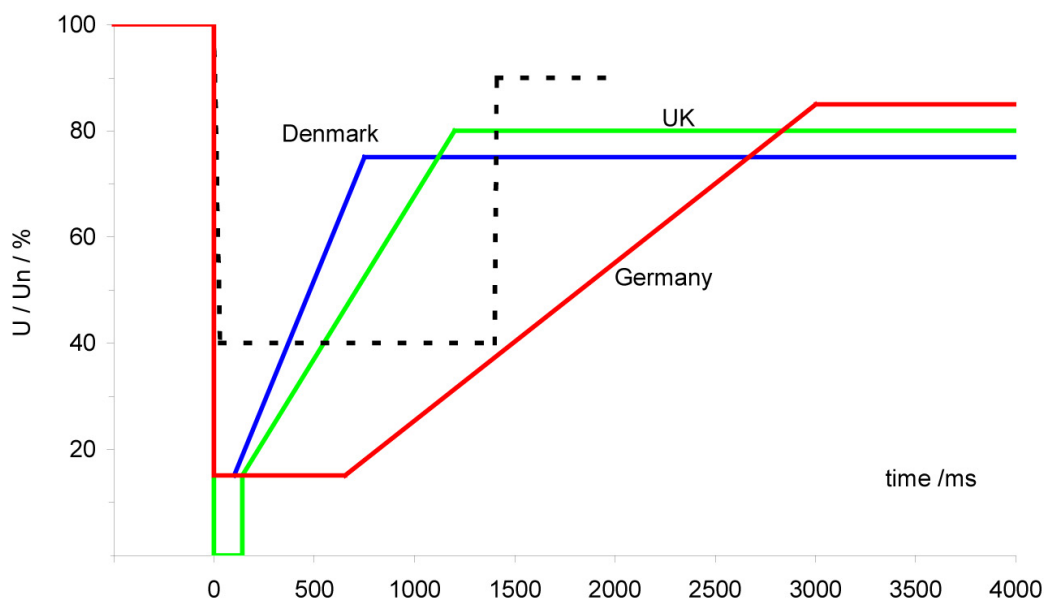
προκαλέσει μικρά ή μεγάλα μπλακάουτ. Παραδοσιακά οι Α/Γ αντιμετωπίζονταν με τη φιλοσοφία της διεσπαρμένης παραγωγής η οποία προέβλεπε την αποσύνδεσή τους ακόμα και σε περίπτωση μικρών διαταραχών του δικτύου [12]. Ωστόσο η νέα φιλοσοφία για τη σύνδεση τους στο δίκτυο είναι να έχουν την δυνατότητα να υποστηρίζουν το δίκτυο σε περιπτώσεις διαταραχών σε αυτό. Σε χώρες με μεγάλη διείσδυση αιολικής ενέργειας όπως η Δανία και η Γερμανία νέες κατευθυντήριες γραμμές έχουν ήδη υιοθετηθεί. Τα κυριότερα σημεία της νέας οδηγίας είναι [13]:

- Καθορισμός ορίων τάσης στα σημεία σύνδεσης των ανεμογεννητριών με το δίκτυο.
- Το αιολικό πάρκο πρέπει να λειτουργεί σε συχνότητα μεταξύ 47.5 Hz - 51.5 Hz. Σε περιπτώσεις υπερσυχνότητας πρέπει να μειώνεται η ενεργός ισχύς.
- Μείωση ενεργού ισχύος σε εξαιρετικά δυσχερείς καταστάσεις του δικτύου.
- Έλεγχος αέργου ισχύος ή του συντελεστή ισχύος σε μεγάλο εύρος (επαγωγικό ή χωρητικό).
- Fault-Ride-Through: σε περιπτώσεις βυθίσεων τάσης οι ανεμογεννήτριες δεν πρέπει να αποσυνδέονται. Θα πρέπει να υποστηρίζουν την τάση παράγοντας άεργο ισχύ.
- Αυστηρότερα όρια με σκοπό την βελτίωση της ποιότητας ισχύος π.χ. για αρμονικές, flicker και βυθίσεις τάσης.

Τα όρια της τάσης πάνω από τα οποία πρέπει να βρίσκονται οι Α/Γ στη Δανία, στη Γερμανία και στη Μ. Βρετανία φαίνονται στο σχήμα 1.8 [13]. Όταν η τάση στο σημείο σύνδεσης του πάρκου είναι πάνω από την αντίστοιχη καμπύλη τότε οι ανεμογεννήτριες δεν επιτρέπεται να αποσυνδεθούν. Πρέπει επίσης να λάβουμε υπόψη ότι η τάση στα άκρα των Α/Γ είναι εν γένει μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή του σημείου σύνδεσης λόγω της ύπαρξης μετασχηματιστών και καλωδίων. Επομένως μια βύθιση τάσης π.χ στο 15% της ονομαστικής στο σημείο σύνδεσης μεταφράζεται σε τάση περίπου 30% της ονομαστικής στα άκρα των Α/Γ.

### 1.5.1 Τεχνολογία Α.Π.Ι.Σ. για Α/Γ με Πλήρη Μετατροπέα

Για την επίτευξη Αδιάκοπης Παροχής Ισχύος σε Συνθήκες Σφάλματος (Α.Π.Ι.Σ.) (low voltage ride-through ή fault ride-through) σε Α/Γ με πλήρη μετατροπέα, ο μετατροπέας που βρίσκεται από την πλευρά του δικτύου σχεδιάζεται έτσι ώστε να παρέχει την μέγιστη άεργο ισχύ που μπορεί με βάση το μέγιστο ρεύμα του, έτσι ώστε να συμβάλλει στην υποστήριξη της τάσης. Σε περίπτωση που η τάση μειωθεί σε επίπεδο που το μέγιστο ρεύμα ξεπεράσει το όριο προστασίας του, τότε ο μετατροπέας μπορεί να εξασφαλίσει την αποκοπή των IGBT's και να είναι σε επιφυλακή για να επανέλθει σε λειτουργία μετά την εκκαθάριση του σφάλματος. Ο ανορθωτής που βρίσκεται στην πλευρά της γεννήτριας τροφοδοτεί μια αντίσταση ώστε να αποφευχθεί αφενός υπερβολική επιτάχυνση της μηχανής και αφετέρου αύξηση της DC



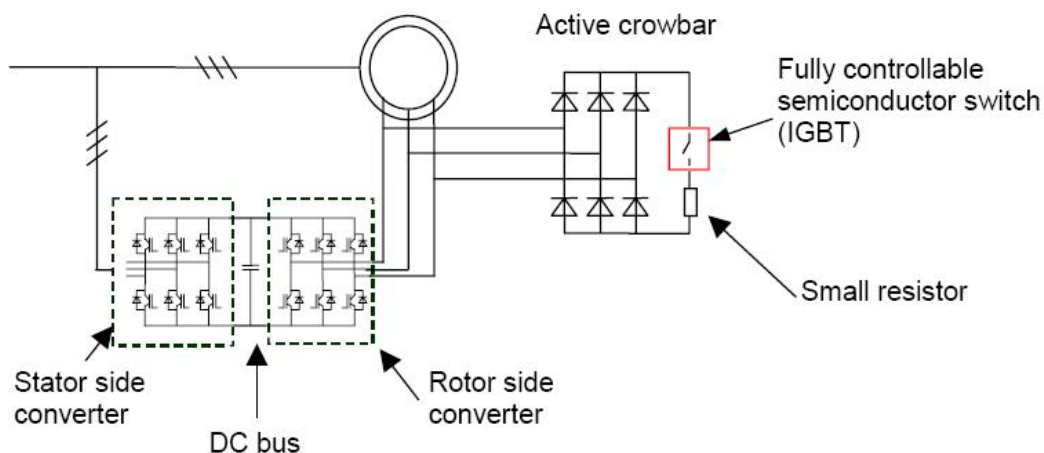
Σχήμα 1.7: Καμπύλες ορίων τάσης που ισχύουν σε Δανία, Γερμανία και Μ. Βρετανία

τάσης του πυκνωτή πέρα των ορίων. Επιπλέον, επειδή η γεννήτρια είναι πλέον αποζευγμένη από το δίκτυο τα μεταβατικά ρεύματα στο στάτη και το δρομέα της δεν έχουν μεγάλες τιμές.

### 1.5.2 Τεχνολογία Α.Π.Ι.Σ. για Α/Γ Διπλής Τροφοδότησης

Το crowbar είναι μια διάταξη ημιαγωγικών στοιχείων που χρησιμοποιείται για την προστασία των μετατροπέων των ανεμογεννητριών σε περιπτώσεις βύθισεων τάσης. Για την ανεμογεννήτρια διπλής τροφοδότησης το crowbar αποτελείται από έναν ανορθωτή διόδων και έναν ελεγχόμενο ημιαγωγικό διακόπτη (συνήθως IGBT) σε σειρά με μια μικρή αντίσταση [14, 15].

Η λειτουργία του crowbar ενεργοποιείται όταν λόγω βύθισης τάσης στο ζυγό που συνδέεται η Α/Γ, το ρεύμα του δρομέα είτε η DC τάση του πυκνωτή αυξάνονται πέρα των ορίων προστασίας. Για την προστασία των ηλεκτρονικών μετατροπέων και του πυκνωτή από μεγάλες τάσεις και ρεύματα ενεργοποιείται το IGBT με αποτέλεσμα ο μετατροπέας που βρίσκεται από την πλευρά του δρομέα να αδρανοποιείται και το ρεύμα του δρομέα να περνάει από το crowbar. Όταν το crowbar ενεργοποιείται, η μηχανή λειτουργεί σαν μια τυπική ασύγχρονη μηχανή με μια μικρή εξωτερική αντίσταση στο δρομέα με αποτέλεσμα να αρχίζει να καταναλώνει άεργο ισχύ. Η ενεργός ισχύς εξαρτάται από την ολίσθηση της μηχανής. Αν η ταχύτητα είναι μεγαλύτερη από τη σύγχρονη τότε η μηχανή συνεχίζει να παράγει ενεργό ισχύ. Αντίθετα αν η ταχύτητα είναι μικρότερη από την σύγχρονη τότε η μηχανή αρχίζει να καταναλώνει ενεργό ισχύ. Ωστόσο λόγω της χαμηλής τάσης του στάτη, η ενεργός και η άεργος ισχύς είναι σχετικά μικρές ενώ τα ρεύματα του στάτη είναι αρκετά μεγάλα.



Σχήμα 1.8: Αρχή λειτουργίας του crowbar

Λόγω της μικρής σύνθετης αντίστασης του crowbar και της χαμηλής τάσης στο στάτη η μαγνητική ροή της γεννήτριας αρχίζει να μειώνεται. Τα ρεύματα στο στάτη και το δρομέα μειώνονται επίσης. Τέλος η τάση του πυκνωτή επανέρχεται σε αποδεκτές τιμές καθώς η περίσσεια ενέργεια διοχετεύθηκε στο δίκτυο μέσω του μετατροπέα που βρίσκεται από την πλευρά του δικτύου.

Στη συνέχεια το crowbar απενεργοποιείται και το ρεύμα του δρομέα περνάει από το μετατροπέα. Αν η τάση του δρομέα είναι μικρότερη από την DC τάση του πυκνωτή το ρεύμα σταδιακά μηδενίζεται. Το ρεύμα του στάτη παρόμοια μειώνεται και αυτό σε χαμηλά επίπεδα. Από τη στιγμή που το ρεύμα του δρομέα παραμένει κοντά στο μηδέν αρκετά για να καταστεί σίγουρο ότι το μεταβατικό έχει παρέλθει, ο μετατροπέας στην πλευρά του δρομέα ενεργοποιείται και ελέγχει την ενεργό και άεργο ισχύ που παρέχει η γεννήτρια στο δίκτυο.

## 1.6 Ευστάθεια Μικρών Διαταραχών

Μία από τις βασικότερες ιδιότητες που χαρακτηρίζουν ένα δυναμικό σύστημα, είναι η ευστάθειά του. Ένα σύστημα χαρακτηρίζεται ευσταθές όταν τείνει να επανέλθει στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του, αφού υποστεί μια διαταραχή. Αντίθετα, χαρακτηρίζεται ασταθές στην περίπτωση που δεν επανέλθει στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του, αφότου δεχτεί την διαταραχή. Ας θεωρήσουμε ένα σύστημα που περιγράφεται από  $n$  τον αριθμό, μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις της μορφής:

$$[\dot{x}] = [f(x,u)] \quad (1.1)$$

όπου  $x$  : ο πίνακας των μεταβλητών κατάστασης, διαστάσεων  $n \times 1$   
 $u$  : ο πίνακας των εισόδων του συστήματος, διαστάσεων  $n \times 1$

$f$  : ο πίνακας συναρτήσεων, διαστάσεων  $n \times 1$

Οι θέσεις ισορροπίας του παραπάνω συστήματος χαρακτηρίζονται από τη συνθήκη:

$$[\dot{x}] = [f(x,u)] = [0] \quad (1.2)$$

και ονομάζονται θέσεις ισορροπίας ή θέσεις μονίμου καταστάσεως.

Η μελέτη της ευστάθειας μονίμου καταστάσεως (ή μικρών διαταραχών) ενός συστήματος, έγκειται στην μελέτη της απόκρισης του συστήματος, αν συμβεί μια μικρή διαταραχή  $[\Delta x]$  των μεταβλητών κατάστασης γύρω από ένα σημείο λειτουργίας  $[x_0]$ . Στην περίπτωση που το σύστημα επανέλθει στο αρχικό σημείο λειτουργίας  $[x_0]$ , τότε έχουμε ευσταθή μόνιμο κατάσταση, ενώ αν απομακρυνθεί από τη θέση  $[x_0]$ , τότε το σημείο λειτουργίας είναι ασταθές [16].

Για την ανάλυση της ευστάθειας μονίμου καταστάσεως ενός εν γένει μη γραμμικού συστήματος, είναι απαραίτητη η γραμμικοποίηση του συστήματος γύρω από μία περιοχή του εξεταζόμενου σημείου ισορροπίας. Πιο συγκεκριμένα αν οι συναρτήσεις  $f_n$  αναπτυχθούν κατά Taylor και διατηρηθεί μόνο ο πρώτος όρος από τις σειρές τότε το γραμμικοποιημένο σύστημα παίρνει τη μορφή:

$$[\Delta \dot{x}] = [A][\Delta x] + [B][\Delta u] \quad (1.3)$$

Ο πίνακας κατάστασης  $A$  στην περίπτωση αυτή είναι ο Ιακωβιανός Πίνακας του συστήματος, ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση 1.4:

$$A = \frac{\partial f}{\partial x} = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1(x,u)}{\partial x_1} \right|_{x=x_0} & \cdots & \left. \frac{\partial f_1(x,u)}{\partial x_n} \right|_{x=x_0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_n(x,u)}{\partial x_1} \right|_{x=x_0} & \cdots & \left. \frac{\partial f_n(x,u)}{\partial x_n} \right|_{x=x_0} \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

Με τον τρόπο αυτό, η μελέτη ευστάθειας των σημείων ισορροπίας του μη γραμμικού συστήματος ανάγεται στη μελέτη ευστάθειας του γραμμικοποιημένου συστήματος γύρω από κάθε σημείο ισορροπίας, δηλαδή στον υπολογισμό των ιδιοτιμών του πίνακα  $A$ .

Οι ιδιοτιμές του πίνακα  $A$  υπολογίζονται από την σχέση 1.5:

$$\det(\lambda I - A) = 0 \quad (1.5)$$

και είναι εν γένει μιγαδικοί αριθμοί:

$$\lambda_i = \sigma_i + j\omega_i \quad i = 1, \dots, n \quad (1.6)$$

Όταν όλες οι ιδιοτιμές έχουν αρνητικό πραγματικό μέρος, τότε το σύστημα είναι ευσταθές και η απόκριση είναι μια φθίνουσα συνάρτηση. Αν  $\omega_i = 0$  πρόκειται για μια φθίνουσα εκθετική συνάρτηση ενώ αν  $\omega_i \neq 0$  τότε παρουσιάζεται μια φθίνουσα ταλάντωση.

Για κάθε ιδιοτιμή  $\lambda_i$  αντιστοιχεί ένα  $n \times 1$  διάνυσμα  $u_i$  τέτοιο ώστε:

$$\det(\lambda_i I - A) = 0 \quad (1.7)$$



και

$$i = 1, \dots, n$$

$$[A][u_i] = \lambda_i[u_i] \quad (1.8)$$

Το διάνυσμα αυτό λέγεται δεξί ιδιοδιάνυσμα της ιδιοτιμής  $\lambda_i$ . Αντίστοιχα ορίζεται το  $1 \times n$  διάνυσμα που ικανοποιεί τη σχέση:

$$[v_i][A] = \lambda_i[v_i] \quad (1.9)$$

και ονομάζεται αριστερό ιδιοδιάνυσμα της ιδιοτιμής  $\lambda_i$ . Τα δεξιά και αριστερά ιδιοδιανύσματα τα οποία αντιστοιχούν σε διαφορετικές ιδιοτιμές είναι ορθογώνια μεταξύ τους. Δηλαδή, εάν  $\lambda_i \neq \lambda_j$ , ισχύει ότι:

$$[v_j][u_i] = 0 \quad i \neq j \quad (1.10)$$

Αντίθετα, για τα ιδιοδιανύσματα που αντιστοιχούν στην ίδια ιδιοτιμή  $\lambda_i$ , ισχύει ότι:

$$[v_i][u_i] = C_i \quad (1.11)$$

όπου  $C_i$  είναι μία μη μηδενική σταθερά. Συνηθίζεται η κανονικοποιημένη μορφή των ιδιοδιανυσμάτων, η οποία προκύπτει για  $C_i = 1$  [17].

Το γινόμενο του  $i$  στοιχείου του αριστερού και δεξιού ιδιοδιανύσματος της ιδιοτιμής  $k$ , ορίζει τον συντελεστή συμμετοχής της μεταβλητής κατάστασης  $x_i$  στην ιδιοτιμή  $k$ .

$$p_{ki} = u_{ki}v_{ki} \quad (1.12)$$

Ο συντελεστής συμμετοχής ( $p_{ki}$ ) αποτελεί ένα αδιάστατο μέγεθος, λόγω του τρόπου ορισμού των δεξιών και αριστερών ιδιοδιανυσμάτων. Το μέτρο του συντελεστή συμμετοχής εκφράζει το ποια μεταβλητή κατάστασης επηρεάζει περισσότερο την μετατόπιση μιας ιδιοτιμής. Μικρή τιμή του μέτρου του συντελεστή συμμετοχής μιας μεταβλητής κατάστασης, σημαίνει μικρή επίδραση της συγκεκριμένης μεταβλητής κατάστασης στην ιδιοτιμή.

## 1.7 Επισκόπηση Βιβλιογραφίας

Σημαντικό κομμάτι της βιβλιογραφίας για τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας τα τελευταία χρόνια είναι αφιερωμένο στη μελέτη της διεύθυνσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας σε αυτά. Κυρίαρχη θέση κατέχει η αιολική ενέργεια, καθώς όπως έχει αναφερθεί, αποτελεί υπό τις παρούσες συνθήκες τη μόνη από τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας που μπορεί να συγκριθεί με τις αντίστοιχες συμβατικές τόσο από πλευράς κόστους όσο και από πλευράς παραγόμενων μεγεθών ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα βιβλία και οι εργασίες που ασχολούνται με την αιολική ενέργεια καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα από ποικίλες θεματικές περιοχές. Τα τελευταία χρόνια, κυρίαρχο ρόλο κατέχει η μοντελοποίηση εναλλακτικών διαμορφώσεων του ηλεκτρικού μέρους Α/Γ μεταβλητών

στροφών. Οι περισσότερες αναφορές αφορούν τις Α/Γ με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης [11, 18, 19]. Όσον αφορά στις Α/Γ με σύγχρονη γεννήτρια και πλήρη μετατροπέα, η πλειοψηφία της βιβλιογραφίας αναφέρεται στην περίπτωση που η γεννήτρια είναι μονίμων μαγνητών [11, 20]. Αντίθετα, οι εργασίες όπου η σύγχρονη γεννήτρια είναι εξοπλισμένη με τύλιγμα διέγερσης είναι λιγοστές [21, 22]. Στις εργασίες [14] και [23] γίνεται πληρέστερη μοντελοποίηση των Α/Γ με δυνατότητα low voltage ride-through. Η δημοσίευση [24] παρουσιάζει και αναλύει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τριών ειδών ανεμογεννητριών: α) της ασύγχρονης σταθερών στροφών, β) της ασύγχρονης με διπλή τροφοδότηση και γ) της σύγχρονης με πλήρη μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος.

Ένα επίσης πολύ ενδιαφέρον θεματικό περιεχόμενο, με μεγάλο όγκο ερευνητικής δραστηριότητας τελευταία, αφορά την σύνδεση αιολικών πάρκων στα Σ.Η.Ε. και τις επιπτώσεις που μπορεί να έχει η ολόένα αυξανόμενη αυτή διείσδυση στην ευστάθεια τάσης αλλά και στην ποιότητα ισχύος του δικτύου. Στη δημοσίευση [25] εξάγονται ισοδύναμα μοντέλα αιολικών πάρκων με ασύγχρονες ανεμογεννήτριες σταθερών ή μεταβλητών στροφών, τα οποία θεωρούνται κατάλληλα για δυναμικές προσομοιώσεις. Ομοίως, στην εργασία [26] πραγματοποιούνται δυναμικές προσομοιώσεις σε ένα δίκτυο με υψηλό επίπεδο αιολικής διείσδυσης, προκειμένου να μελετηθεί από πλευράς ευστάθειας και ποιότητας ισχύος. Στην εργασία [27] διερευνώνται τα επιτρεπτά όρια αιολικής διείσδυσης σε ένα ασθενές δίκτυο τόσο από πλευράς ευστάθειας τάσης όσο και από πλευράς θερμικής φόρτισης των γραμμών διανομής. Στην εργασία [28] αναλύεται η επίδραση της αιολικής διείσδυσης σε νησιωτικά δίκτυα από πλευράς ευστάθειας του δικτύου. Επιπρόσθετα, στη δημοσίευση [29] παρουσιάζεται η ανάλυση της μεταβατικής ευστάθειας ενός αιολικού πάρκου με ασύγχρονες ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών. Στην εργασία [30] γίνεται σύγκριση της συμμετοχής διαφόρων τύπων ασύγχρονων ανεμογεννητριών στις ταλαντώσεις ενός Σ.Η.Ε με ανάλυση των ιδιοτιμών του αντίστοιχου γραμμικοποιημένου δικτύου. Τέλος, στην εργασία [31] μελετάται η επίδραση της αιολικής διείσδυσης σε ασθενή δίκτυα.

## 1.8 Αντικείμενο και Δομή Διπλωματικής

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη μοντέλων Α/Γ μεταβλητών στροφών με σύγχρονη μηχανή και πλήρη μετατροπέα, κατάλληλων για μελέτες ευστάθειας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Πιο συγκεκριμένα, αρχικά αναλύονται οι μέθοδοι ελέγχου των αναπτυχθέντων μοντέλων των Α/Γ. Επιπρόσθετα περιγράφεται η υλοποίηση των μοντέλων σε περιβάλλον Simulink. Στη συνέχεια μελετάται και σχολιάζεται η απόκριση των αναπτυχθέντων μοντέλων για διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Τέλος μελετάται και συγκρίνεται η συμπεριφορά τους όταν είναι συνδεδεμένα σε ασθενές δίκτυο με μεγάλη διείσδυση αιολικής ενέργειας.

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από 7 κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφεται η σημερινή κατάσταση στην αγορά και στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα παρατίθενται κάποια στοιχεία σχετικά με την απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην χώρα μας, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της. Επιπρόσθετα α-

ναλύονται οι αλλαγές που επικέρει στα Σ.Η.Ε η συνεχής ένταξη μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο της μέσης ή της χαμηλής τάσης. Η αλλαγή αυτή, παρά την πληθώρα των πλεονεκτημάτων που μπορεί να αποφέρει συνιστά πρόκληση, καθώς απαιτείται η επίλυση πολλών τεχνολογικών δυσκολιών που εμφανίζονται. Στη συνέχεια αναλύονται τα πλεονεκτήματα της χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με έμφαση στην αιολική ενέργεια. Ακολουθεί η περιγραφή και σύγκριση των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται στις μέρες μας στην κατασκευή Α/Γ. Ακολουθεί μια αναφορά στους νέους κανόνες που αρχίζουν να θεσπίζονται τα τελευταία χρόνια, όσον αφορά στην σύνδεση των αιολικών πάρκων στο δίκτυο και τις προϋποθέσεις που πρέπει να ικανοποιούν. Τέλος δίνονται κάποια θεωρητικά στοιχεία σχετικά με την ευστάθεια μικρών διαταραχών και τη γραμμικοποίηση συστημάτων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των επιμέρους συστημάτων που απαρτίζουν το σύστημα της Α/Γ με πλήρη μετατροπέα, που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία. Αρχικά γίνεται αναφορά στην παραγωγή χρονοσειρών ανέμου και στο αεροδυναμικό μέρος των Α.Γ συμπεριλαμβανομένου και του συστήματος ελέγχου της γωνίας βήματος πτερυγίων. Στη συνέχεια γίνεται μια εκτεταμένη αναφορά στη γενική θεωρία περί σύγχρονων μηχανών (μετασχηματισμός Park και πλαίσιο αναφοράς) για να καταλήξουμε, μέσω των παραδοχών που έγιναν, στις εξισώσεις που περιγράφουν το μοντέλο της γεννήτριας της Α/Γ που θα μοντελοποιηθεί. Ακολουθεί σύντομη περιγραφή και παράθεση των βασικών σχέσεων που ισχύουν για τον τριφασικό ανορθωτή διόδων, τον μετατροπέα ανύψωσης τάσης και τον PWM αντιστροφέα.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται οι συνθήκες λειτουργίας και οι μέθοδοι ελέγχου των αναπτυχθέντων μοντέλων των Α/Γ. Πιο συγκεκριμένα αναλύονται οι περιορισμοί που εισάγει η σύνδεση του τριφασικού ανορθωτή στην έξοδο της γεννήτριας στον τρόπο λειτουργίας της διάταξης. Επίσης, περιγράφεται η στρατηγική ελέγχου των στροφών που επιλέχθηκε για την επίτευξη μέγιστης απολαβής ισχύος. Στη συνέχεια καθορίζεται η μέγιστη παραγόμενη ισχύς και τα όρια ρεύματος της σύγχρονης γεννήτριας για δεδομένη τιμή της Η.Ε.Δ. διέγερσης και με βάση τους παραπάνω περιορισμούς. Επιπρόσθετα γίνεται διαστασιολόγηση του PWM αντιστροφέα για να έχει τη δυνατότητα να ανταλλάσσει άεργο ισχύ με το δίκτυο υπό συνθήκες χαμηλής τάσης. Τέλος περιγράφονται οι τρόποι ελέγχου της ρύθμισης της διέγερσης καθώς και η μοντελοποίηση των επιμέρους ελέγχων για κάθε μοντέλο Α/Γ που αναπτύχθηκε.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται σε λεπτομέρεια η υλοποίηση των μοντέλων των Α/Γ σε περιβάλλον Simulink. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφεται η βασική δομή λειτουργίας του κάθε μοντέλου καθώς και η μοντελοποίηση των υποσυστημάτων που το αποτελούν. Επίσης επεξηγείται ο τρόπος που συνδέονται τα επιμέρους υποσυστήματα για να απαρτήσουν το συνολικό μοντέλο της Α/Γ. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην μεθοδολογία αρχικοποίησης κάθε μοντέλου Α/Γ.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις των μοντέλων των Α/Γ που αναπτύχθηκαν. Πιο συγκεκριμένα εξετάζεται αρχικά η απόκριση κάθε μοντέλου σε μικρή διαταραχή του ανέμου για χαμηλό και μέσο φορτίο. Στη συνέχεια υπολο-

γίζονται και σχολιάζονται οι ιδιοτιμές και τα ιδιοδιανύσματα για διάφορα σημεία λειτουργίας. Επίσης επιλέγονται μέσω προσομοιώσεων οι παράμετροι του ελεγκτή της γωνίας βήματος πτερυγίων. Τέλος εξετάζεται η απόκριση των μοντέλων των Α/Γ σε χρονοσειρά ανέμου.

Στο έκτο κεφάλαιο μελετάται η ευστάθεια ενός ασθενούς δικτύου με σημαντική διείσδυση αιολικής ενέργειας, ανάλογα με το είδος των Α/Γ που χρησιμοποιούνται στα αιολικά πάρκα που το απαρτίζουν σε περίπτωση σοβαρής διαταραχής. Πιο συγκεκριμένα εξετάζεται η συμπεριφορά του δικτύου στις περιπτώσεις που ένα νέο αιολικό πάρκο που πρόκειται να εγκατασταθεί, αποτελείται από Α/Γ σταθερών στροφών, ή από Α/Γ μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα και ρύθμιση συντελεστή ισχύος ή από Α/Γ μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα και ρύθμιση τάσης. Εν συνεχεία προσδιορίζεται η μέγιστη αιολική διείσδυση για τις παραπάνω περιπτώσεις. Τέλος συγκρίνεται η συμπεριφορά των μοντέλων των Α/Γ που αναπτύχθηκαν στην παρούσα εργασία όταν είναι συνδεδεμένα στο παραπάνω δίκτυο και υλοποιούν ρύθμιση της τάσης του ζυγού που συνδέεται το αιολικό πάρκο.

Τέλος στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξάγονται από τη μελέτη των προηγούμενων κεφαλαίων. Επίσης αναλύονται θέματα με τα οποία δεν ασχολείται η παρούσα εργασία και τα οποία μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενα μελλοντικής ερευνητικής μελέτης.

---

---

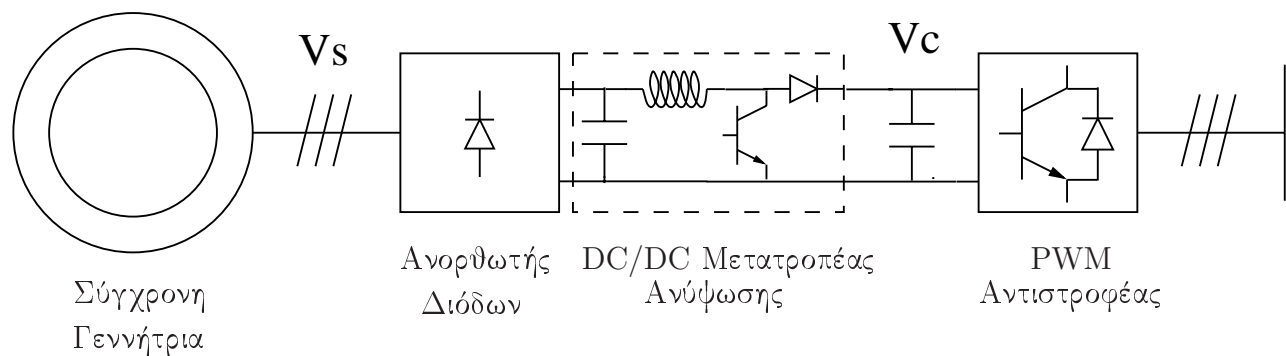
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

---

### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ Α/Γ ΜΕ ΠΛΗΡΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ

#### 2.1 Περιγραφή Συστήματος Α/Γ

Το μοντέλο της ανεμογεννήτριας (Α/Γ) μεταβλητών στροφών που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία αποτελείται από σύγχρονη μηχανή με τύλιγμα διέγερσης. Το κιβώτιο ταχυτήτων παραλείπεται λόγω της πολυπολικής γεννήτριας και της παρεμβολής του μετατροπέα με αποτέλεσμα ο δρομέας του ανεμοκινητήρα να συνδέεται στον ίδιο άξονα με το δρομέα της γεννήτριας.



Σχήμα 2.1: Διάταξη της Ανεμογεννήτριας

Η γεννήτρια συνδέεται στο δίκτυο μέσω ενός πλήρους μετατροπέα AC/DC/AC, ο οποίος αποτελείται από έναν ανορθωτή διόδων και έναν PWM αντιστροφέα. Στην περίπτωση που η διέγερση της γεννήτριας δεν μπορεί να αυξηθεί πάνω από ένα όριο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας DC/DC μετατροπέας ανύψωσης, για τον έλεγχο της τάσης εισόδου του

PWM αντιστροφέα όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1.

Το σύστημα διέγερσης της γεννήτριας χρησιμοποιείται, είτε για να υλοποιεί την στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος (MPT strategy), είτε για να ελέγχει την τάση στα άκρα της μέσω ενός αυτόματου ρυθμιστή τάσης (Automatic Voltage Regulator, AVR), όπως συνηθίζεται στις κλασσικές σύγχρονες γεννήτριες που είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο. Ο PWM αντιστροφέας χρησιμοποιείται είτε για να κρατάει σταθερή την τάση εισόδου του ελέγχοντας την ενεργό ισχύ που μεταφέρεται από την DC πλευρά προς το δίκτυο, είτε για να υλοποιεί την στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος αντίστοιχα. Επίσης ο PWM αντιστροφέας ελέγχει την ανταλλαγή αέργου ισχύος με το δίκτυο με δύο τρόπους :

- είτε κρατώντας τον συντελεστή ισχύος από την πλευρά του δικτύου στην επιθυμητή τιμή (συνήθως μοναδιαίος).
- είτε ελέγχοντας την τάση του ζυγού που συνδέεται η ανεμογεννήτρια μεταβάλλοντας την άεργο ισχύ που παρέχει στο δίκτυο. Αυτό γίνεται ολοένα και περισσότερο αναγκαίο τα τελευταία χρόνια λόγω της μεγάλης διείσδυσης της αιολικής ενέργειας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

Τέλος η Α/Γ διαθέτει πτερύγια με δυνατότητα ελέγχου της γωνίας του βήματός τους (pitch control) έτσι ώστε η ισχύς εξόδου να περιορίζεται στην ονομαστική της τιμή για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής.

## 2.2 Προσομοίωση του Ανέμου

Για την προσομοίωση μιας Α/Γ απαιτείται η χρήση κατάλληλων χρονοσειρών ανέμου οι οποίες όμως τις περισσότερες φορές δεν είναι διαθέσιμες με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η αναπαραγωγή τους.

Ο άνεμος είναι μέγεθος χωρικά και χρονικά συνεχές. Βραχυπρόθεσμα μπορεί να υποτεθεί ότι αποτελείται από μία σταθερή μέση τιμή και μία τυχαία μεταβαλλόμενη συνιστώσα (τύρβη). Επομένως, εάν η χωρική συσχέτιση της τύρβης είναι γνωστή μπορούν να αναπαραχθούν χρονοσειρές ανέμου χωρικά και χρονικά μεταβαλλόμενες. Έτσι η στιγμιαία ισοδύναμη ταχύτητα του ανέμου δίνεται από τη σχέση 2.1 [9]:

$$V_w(t) = \bar{V}_w + v(t) \quad (2.1)$$

όπου  $V_w(t)$  : η στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου

$\bar{V}_w$  : η μέση ταχύτητα του ανέμου στο διάστημα της προσομοίωσης

$v(t)$  : η στιγμιαία τιμή της τυρβώδους συνιστώσας του ανέμου

Για την περιγραφή της φασματικής πυκνότητας της τύρβης η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη συνάρτηση είναι η Von Karman. Η συνάρτηση αυτή εξαρτάται πρωτογενώς από τα χαρακτηριστικά του εδάφους και το εκάστοτε ύψος της μέτρησης του ανέμου από αυτό.

Με δεδομένη τη συνάρτηση της φασματικής πυκνότητας, οι χρονοσειρές της τυρβώδους συνιστώσας του ανέμου μπορούν να αναπαραχθούν με σύνθεση Fourier όπως φαίνεται στη σχέση 2.2 [32]:

$$v(t) = \sqrt{2\Delta f} \sum_{i=1}^N (\sqrt{S_v(f_i)} \cdot \cos(2\pi f_i t + \varphi_i)) \quad (2.2)$$

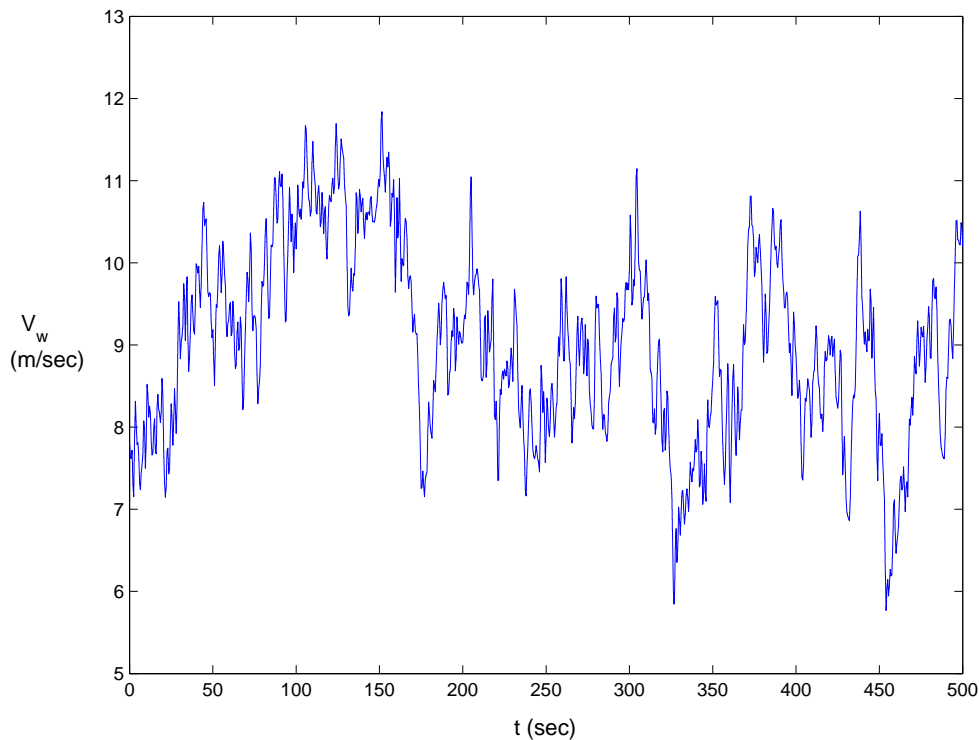
όπου  $S_v(f_i)$  : η κατανομή του φασματικού περιεχομένου της τύρβης

$N$  : ο αριθμός των εξεταζόμενων συχνοτήτων

$f_i = (i - \frac{1}{2}) \cdot \Delta f$  : η  $i$ -στή συχνότητα του φασματικού περιεχομένου της τύρβης

$\Delta f$  : η απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών συχνοτήτων

$\varphi_i$  : ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές φάσης ομοιόμορφα κατανεμημένες στο διάστημα  $[0, 2\pi]$ .



Σχήμα 2.2: Χρονοσειρά Ανέμου Μέσης Τιμής 9 m/sec

Κατά την αναπαραγωγή της χρονοσειράς του ανέμου πρέπει να επιλεγεί το εύρος των διαστημάτων της συχνότητας,  $\Delta f$ , καθώς και το πλήθος τους. Θα πρέπει όμως να ληφθεί υπόψη ότι η συγκεκριμένη διαδικασία ισχύει για το ορισμένο χρονικό διάστημα προσομοίωσης, γεγονός που επιβάλλει τους αντίστοιχους περιορισμούς στις εξεταζόμενες συχνότητες.

Γενικά ισχύει ότι η επιλογή των  $N, \Delta f$  πρέπει να είναι τέτοια ώστε η περίοδος που αντιστοιχεί στην ελάχιστη συχνότητα  $\Delta f/2$  να είναι μεγαλύτερη από το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης (θεώρημα του Shannon) και η μέγιστη συχνότητα  $(N - 0,5)\Delta f$  να είναι τουλάχιστον διπλάσια της ταχύτητας περιστροφής της έλικας [9].

Στο σχήμα 2.2 φαίνεται μία χρονοσειρά ανέμου μέσης τιμής 9 m/sec.

## 2.3 Αεροδυναμικό Μέρος

Η βασική σχέση που περιγράφει τη λειτουργία μιας Α/Γ εκφράζοντας την ισχύ του δρομέα των πτερυγίων της είναι:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A V_w^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (2.3)$$

όπου  $P_m$  : η μηχανική ισχύς στον άξονα της Α/Γ (W)  
 $\rho$  : η πυκνότητα του αέρα (τυπικά  $1.225 \text{ kg/m}^3$ )  
 $A$  : η επιφάνεια του δρομέα ( $\text{m}^2$ )  
 $V_w$  : η ταχύτητα του ανέμου (m/sec)  
 $C_p$  : ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος

Τυπικές βέλτιστες τιμές του  $C_p$  είναι από 0.4 έως 0.5, ενώ το θεωρητικό μέγιστο όριο είναι 0.593 (όριο Betz).

Όπως φαίνεται από την σχέση 2.3 ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος  $C_p$  εξαρτάται από:

- την ταχύτητα ακροπτερυγίου  $\lambda$  (tip speed ratio) που δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda = \frac{R\omega_R}{V_w} \quad (2.4)$$

όπου  $\omega_R$  : η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της Α/Γ

$R$  : η ακτίνα του δρομέα της Α/Γ

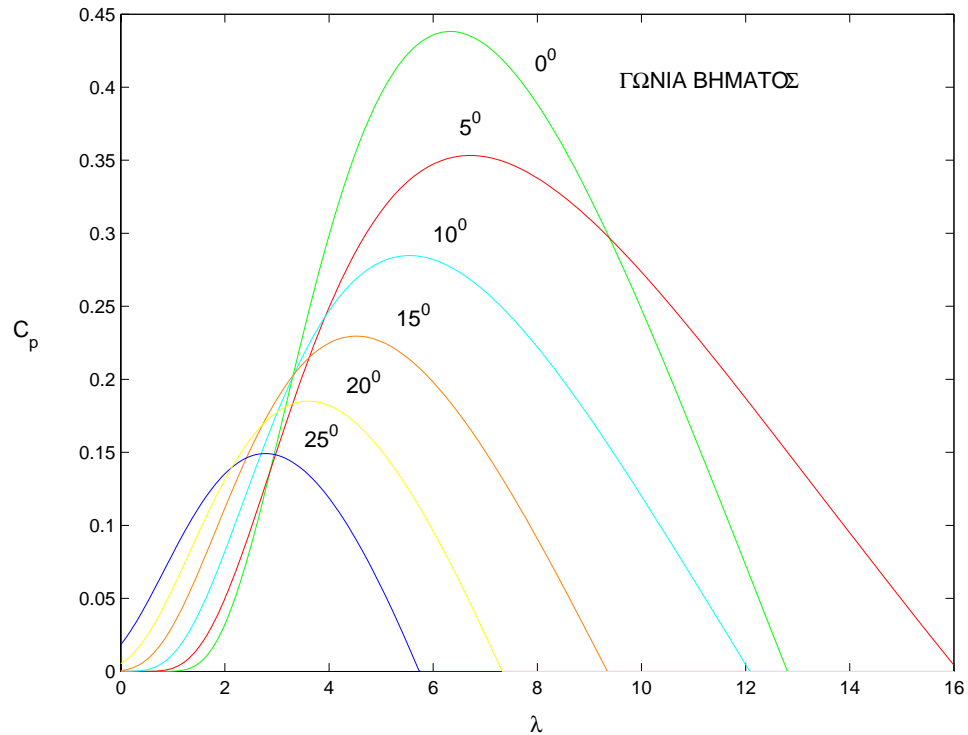
- τη γωνία βήματος των πτερυγίων του δρομέα  $\beta$

Η αεροδυναμική ροπή που αντιστοιχεί στην αεροδυναμική ισχύ προσδιορίζεται μέσω της σχέσης 2.5:

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_R} \quad (2.5)$$

Η αναλυτική σχέση η οποία χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για τον υπολογισμό του  $C_p$  συναρτήσει των  $\lambda$  και  $\beta$  είναι η εξής:





Σχήμα 2.3: Καμπύλες αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος  $C_p$  - ταχύτητας ακροπτερυγίου  $\lambda$  για διάφορες τιμές της γωνίας βήματος  $\beta$

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \cdot \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) \cdot e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (2.6)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2.7)$$

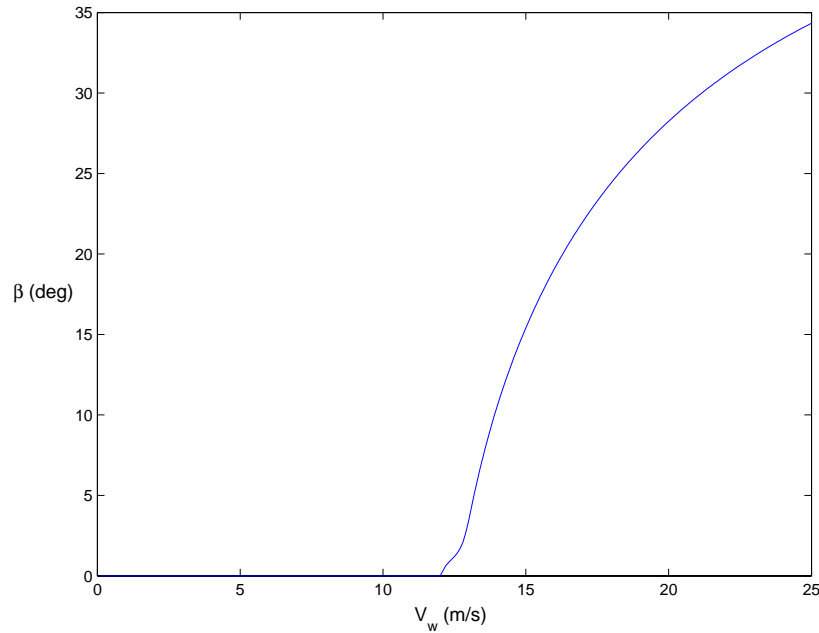
Στο σχήμα 2.3 φαίνονται οι καμπύλες  $C_p$  -  $\lambda$  με παράμετρο τη γωνία βήματος  $\beta$ .

Από τις σχέσεις 2.6 και 2.7 και για  $\beta = 0^\circ$  προκύπτει ότι ο βέλτιστος αεροδυναμικός συντελεστής είναι  $C_{p,opt} = 0.438$  και επιτυγχάνεται για  $\lambda_{opt} = 6.3$ .

## 2.4 Ρυθμιστής Γωνίας Βήματος Πτερυγίων (Pitch Control)

Για τον περιορισμό της ισχύος εξόδου στην ονομαστική της τιμή για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής, η Α/Γ διαθέτει πτερύγια με δυνατότητα ελέγχου της γωνίας

βήματός τους (pitch control).



Σχήμα 2.4: Χαρακτηριστική έλεγχου της γωνίας βήματος

Πιο συγκεκριμένα σε ταχύτητες ανέμου μικρότερες της ονομαστικής, η γωνία βήματος βρίσκεται στην ελάχιστη τιμή της ( $\beta = 0^\circ$ ). Σε υψηλότερες ταχύτητες ανέμου, η γωνία βήματος αυξάνεται έτσι ώστε ο συντελεστής  $C_p$  και κατά συνέπεια η μηχανική ροπή να μειωθούν με στόχο η ταχύτητα περιστροφής και η παραγόμενη ισχύς να παραμείνουν στην ονομαστική τους τιμή.

Στο σχήμα 2.4 φαίνεται η γωνία βήματος για διάφορες ταχύτητες του ανέμου στη μόνιμη κατάσταση. Η καμπύλη 2.4 σχεδιάστηκε με βάση τις σχέσεις 2.3, 2.4, 2.6 και 2.7 και με δεδομένο ότι η μηχανική ισχύς και η ταχύτητα της Α/Γ έχουν ονομαστική τιμή.

## 2.5 Μοντέλο Σύγχρονης Μηχανής Α/Γ

### 2.5.1 Γενικά Περί Σύγχρονων Μηχανών

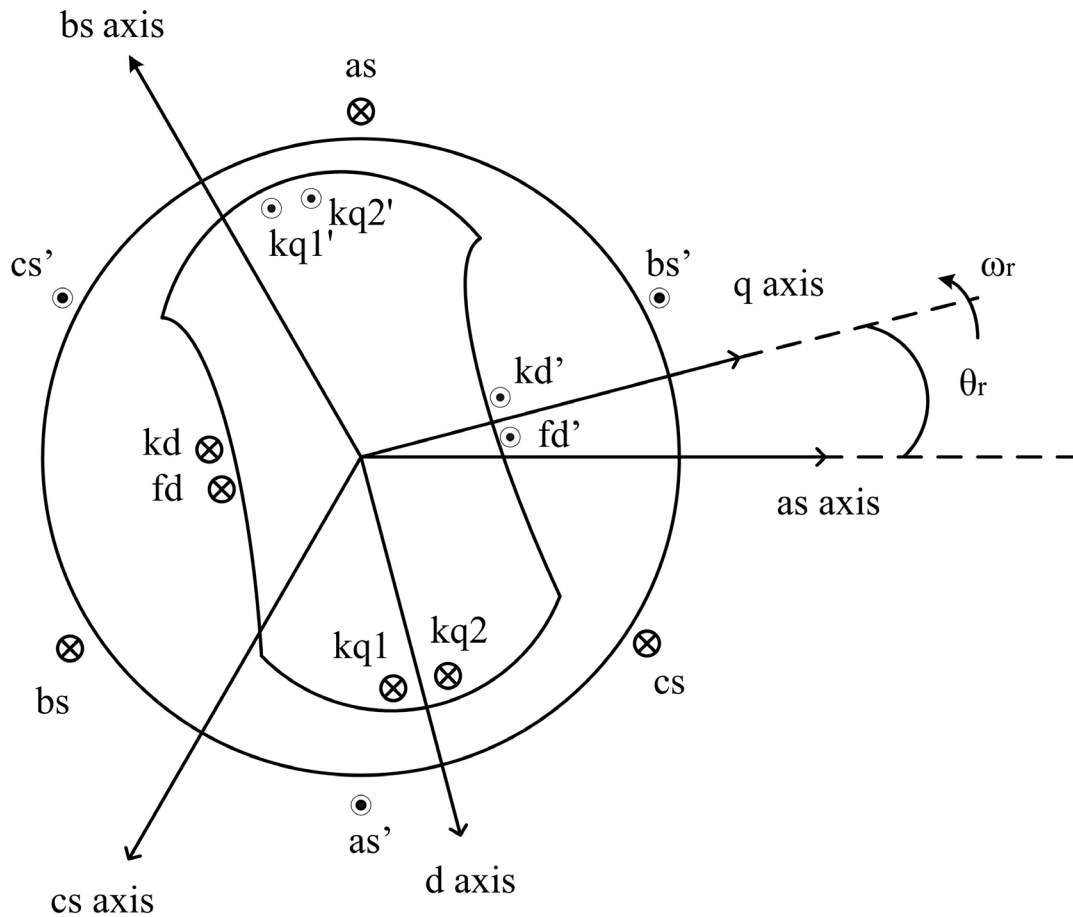
Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται οι βασικές διαφορικές και αλγεβρικές εξισώσεις, οι οποίες περιγράφουν μία συμμετρική τριφασική σύγχρονη γεννήτρια.

Για την εξαγωγή των εξισώσεων της σύγχρονης γεννήτριας γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές [17, 33]:

- Τα τυλίγματα του στάτη έχουν ημιτονοειδή κατανομή κατά μήκος του διακένου.

- Οι αύλακες του στάτη δεν προκαλούν σημαντική μεταβολή των αυτεπαγωγών και των αλληλεπαγωγών λόγω της θέσης του δρομέα.
- Το φαινόμενο της μαγνητικής υστέρησης αμελείται.
- Η συνεισφορά του μαγνητικού κορεσμού αμελείται.

Μία 2-πολική, 3-φασική σύγχρονη μηχανή, με έκτυπους πόλους και τα τυλίγματα του στάτη συνδεδεμένα κατά αστέρα φαίνεται στο σχήμα 2.5.

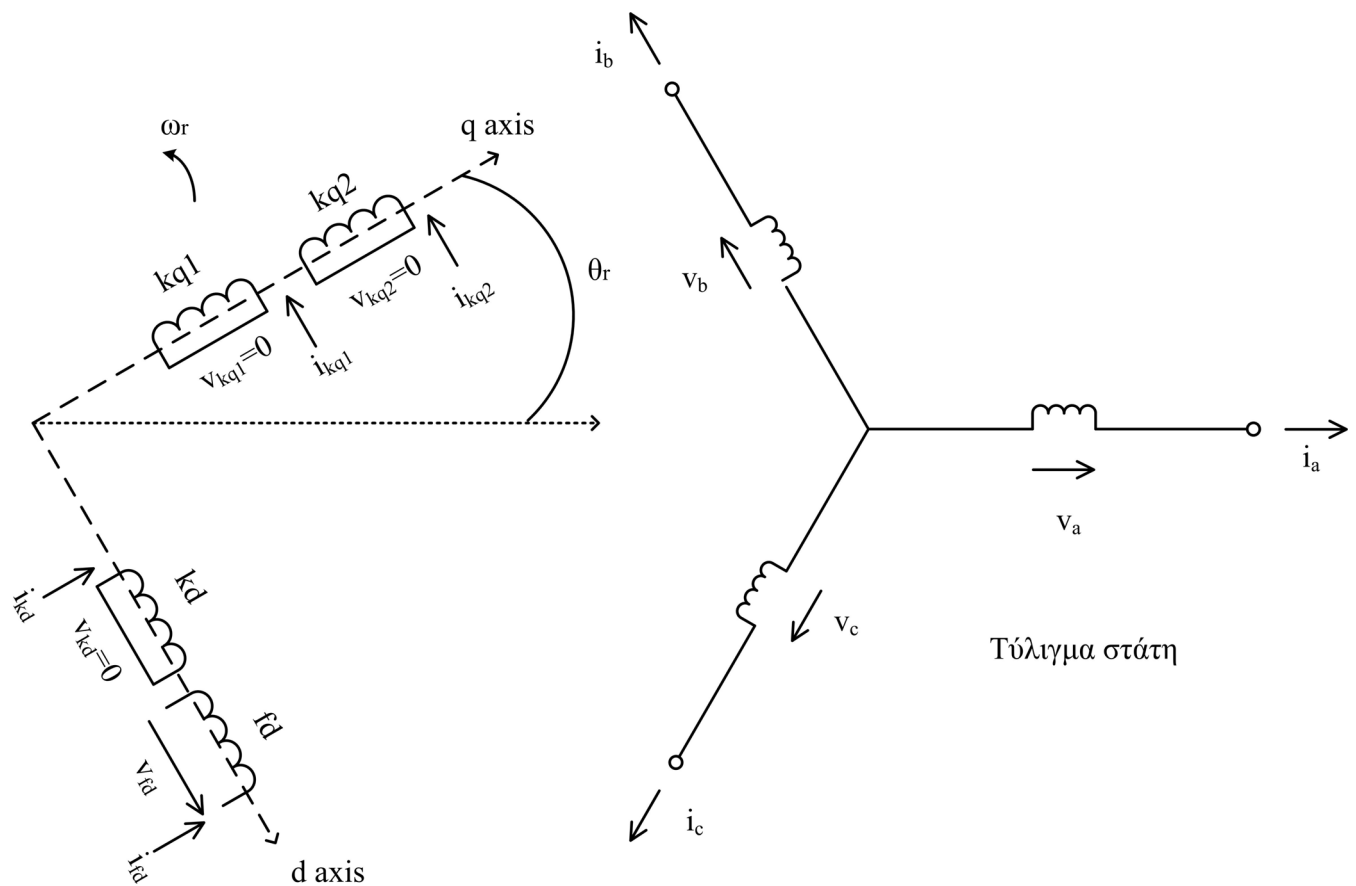


Σχήμα 2.5: Παράσταση σύγχρονης μηχανής με έκτυπους πόλους

Τα τυλίγματα των τριών φάσεων του στάτη είναι όμοια μεταξύ τους και ημιτονοειδώς διανεμημένα. Το κάθε ένα έχει  $N_s$  ισοδύναμα ελίγματα και ωμική αντίσταση  $r_s$ . Ο δρομέας διαθέτει τύλιγμα πεδίου, με  $N_{fd}$  ισοδύναμα ελίγματα και ωμική αντίσταση  $r_{fd}$ , καθώς και τρία βραχυκυκλωμένα τυλίγματα αποσβέσεως τα οποία έχουν ισοδύναμα ελίγματα  $N_{kq1}$ ,  $N_{kq2}$ ,  $N_{kd}$  και αντιστάσεις  $r_{kq1}$ ,  $r_{kq2}$ ,  $r_{kd}$  αντίστοιχα [34].

Στο σχήμα 2.6 σημειώνονται οι μαγνητικοί άξονες των τυλιγμάτων του στάτη. Επίσης, εισάγονται ο εγκάρσιος άξονας (άξονας q - quadrature) και ο ευθύς άξονας (άξονας d - direct). Ο άξονας q είναι ο άξονας των τυλιγμάτων αποσβέσεως  $kq_1$  και  $kq_2$ , ενώ ο άξονας d ταυτίζεται με τον άξονα του τυλίγματος διέγερσης και του τυλίγματος αποσβέσεως kd. Ο άξονας q, για τη θετική φορά περιστροφής, λαμβάνεται να προηγείται κατά  $90^\circ$  του άξονα d. Η γωνία του δρομέα  $\theta_r$  μετράται ως προς τον άξονα του πηνίου as.

Οι εντάσεις του στάτη θεωρούνται συμβατικά εξερχόμενες από τους ακροδέκτες της μηχανής, δηλαδή ακολουθείται η γνωστή σύμβαση γεννήτριας για τη γραφή των εξισώσεων. Συνεπώς, με τη δεδομένη θετική φορά των μαγνητικών αξόνων, αρνητικές πεπλεγμένες ροές προκύπτουν από θετικά ρεύματα στο στάτη.



Σχήμα 2.6: Κυκλωματική παράσταση σύγχρονης μηχανής

### 2.5.2 Μετασχηματισμός του Park

Με δεδομένο ότι οι επαγωγές των τυλιγμάτων της μηχανής είναι συναρτήσεις της γωνίας του δρομέα  $\theta_r$  και, επομένως, της γωνιακής ταχύτητας  $\omega_r$ , οι διαφορικές εξισώσεις των τά-

σεων είναι μη γραμμικές και οι συντελεστές των μεταβλητών είναι χρονικά μεταβαλλόμενοι. Επιπλέον, η ταχύτητα του δρομέα είναι συνάρτηση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής, η οποία προκύπτει από γινόμενα εντάσεων. Προφανώς, η επίλυση των εξισώσεων είναι εξαιρετικά πολύπλοκη, και καθίσταται αναγκαία η χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Ο μετασχηματισμός του Park αποτελεί το μαθηματικό εργαλείο για την ανάλυση των σύγχρονων μηχανών. Ο μετασχηματισμός αυτός συνίσταται στην αντικατάσταση των τριών τυλίγμάτων  $a, b, c$  του στάτη από τρία υποθετικά (ισοδύναμα) τυλίγματα  $d, q, 0$ . Με τον τρόπο αυτό ο μετασχηματισμός του Park συμβάλλει στην απλοποίηση των εξισώσεων, μετατρέποντας τους χρονικά μεταβαλλόμενους συντελεστές σε χρονικά αμετάβλητους. Τα τυλίγματα  $d, q$  του στάτη περιστρέφονται μαζί με το δρομέα της μηχανής και βρίσκονται στους ίδιους άξονες με τα αντίστοιχα τυλίγματα του δρομέα (τύλιγμα διεγέρσεως και τυλίγματα αποσβέσεως). Το τρίτο τύλιγμα  $0$  δεν είναι μαγνητικά συζευγμένο με τα άλλα δύο νέα τυλίγματα του στάτη και παίζει ρόλο μόνο σε συνθήκες ασύμμετρης φόρτισης της μηχανής. Επειδή στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε μόνο με συμμετρικές συνθήκες φόρτισης, το τύλιγμα  $0$  παραλείπεται [17]. Η σχηματική παράσταση των τυλιγμάτων μίας σύγχρονης μηχανής μετά την εφαρμογή του μετασχηματισμού του Park φαίνεται στο σχήμα 2.7.

Στη γενικότερη περίπτωση, η αλλαγή των μεταβλητών, που συνιστά έναν μετασχηματισμό των τριφασικών μεταβλητών ενός στατικού κυκλώματος ( $abc$ ) σε μεταβλητές ενός στρεφόμενου συστήματος αναφοράς ( $qd0s$ ), γράφεται [35]:

$$\mathbf{f}_{qd0s} = \mathbf{K}_s \mathbf{f}_{abc} \quad (2.8)$$

όπου

$$(\mathbf{f}_{qd0s})^T = \begin{bmatrix} f_{qs} & f_{ds} & f_{0s} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

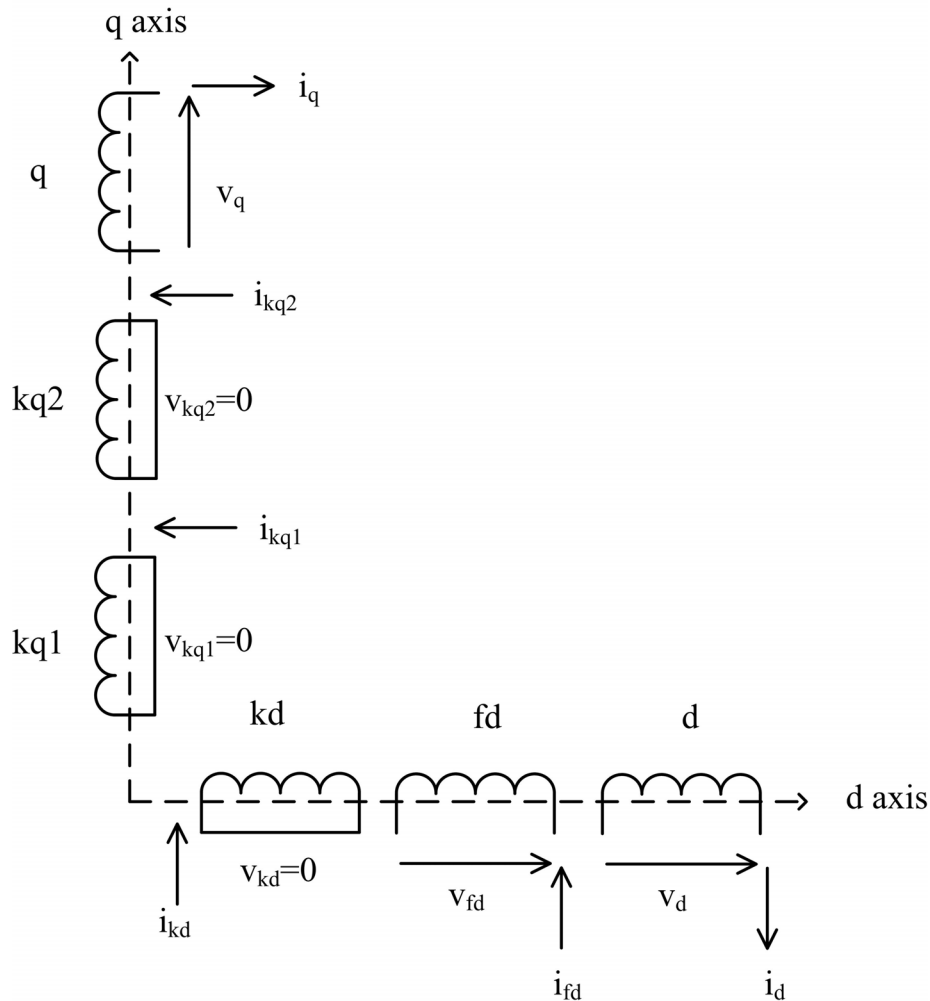
$$(\mathbf{f}_{abc})^T = \begin{bmatrix} f_{as} & f_{bs} & f_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$\mathbf{K}_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \theta & \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$\theta = \int_0^t \omega(\xi) d\xi + \theta(0) \quad (2.12)$$

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός  $\mathbf{f}_{abc} = \mathbf{K}_s^{-1} \mathbf{f}_{qd0s}$  κάνει χρήση του πίνακα :

$$(\mathbf{K}_s)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \\ \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$



Σχήμα 2.7: Τυλίγματα σύγχρονης μηχανής μετά το μετασχηματισμό του Park

Στις εξισώσεις αυτές, το σύμβολο  $f$  συμβολίζει τάση, ένταση, ή πεπλεγμένη ροή. Ο εκθέτης  $T$  συμβολίζει τον ανάστροφο ενός πίνακα. Η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής των αξόνων είναι αυθαίρετη, και μπορεί να είναι οποιαδήποτε συνάρτηση του χρόνου, αρκεί η γωνία  $\theta$  να είναι συνεχής.

Ο μετασχηματισμός του Park αποτελεί μια ειδική περίπτωση του μετασχηματισμού  $abc \rightarrow qd0s$ , όπου η γωνιακή ταχύτητα του στρεφόμενου πλαισίου λαμβάνεται ίση με τη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα. Ο άξονας  $d$  ταυτίζεται με τον άξονα του μαγνητικού πεδίου του τυλίγματος διέγερσης.

Αφού εφαρμοσθεί ο μετασχηματισμός, οι εξισώσεις του Park για τα τυλίγματα  $d, q$  του στάτη στο πλαίσιο αναφοράς του δρομέα είναι [34]:

$$v_{ds} = -r_s i_{ds} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{qs} \quad (2.14)$$

$$v_{qs} = -r_s i_{qs} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{ds} \quad (2.15)$$

- όπου  $v_{ds}, v_{qs}$  : οι τάσεις των τυλιγμάτων  $d, q$  του στάτη αντίστοιχα.  
 $i_{ds}, i_{qs}$  : τα ρεύματα των τυλιγμάτων  $d, q$  του στάτη αντίστοιχα.  
 $\psi_{ds}, \psi_{qs}$  : οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο των τυλιγμάτων  $d, q$  του στάτη αντίστοιχα.  
 $\omega_b$  : η βασική ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα (σε ηλεκτρικά rad/s) του συστήματος.  
 $r_s$  : η ωμική αντίσταση του στάτη.

Οι εξισώσεις του Park για τα τυλίγματα του δρομέα είναι [34]:

$$v_{fd} = r_{fd} i_{fd} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{fd}}{dt} \quad (2.16)$$

$$v_{kd} = 0 = r_{kd} i_{kd} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{kd}}{dt} \quad (2.17)$$

$$v_{kq1} = 0 = r_{kq1} i_{kq1} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{kq1}}{dt} \quad (2.18)$$

$$v_{kq2} = 0 = r_{kq2} i_{kq2} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{kq2}}{dt} \quad (2.19)$$

- όπου  $v_{fd}, v_{kd}, v_{kq1}, v_{kq2}$  : οι τάσεις του τυλίγματος διέγερσης και των τυλιγμάτων απόσβεσης αντίστοιχα.  
 $i_{fd}, i_{kd}, i_{kq1}, i_{kq2}$  : τα ρεύματα του τυλίγματος διέγερσης και των τυλιγμάτων απόσβεσης αντίστοιχα.  
 $\psi_{fd}, \psi_{kd}, \psi_{kq1}, \psi_{kq2}$  : οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο του τυλίγματος διέγερσης και των τυλιγμάτων απόσβεσης αντίστοιχα.  
 $r_{fd}, r_{kd}, r_{kq1}, r_{kq2}$  : οι ωμικές αντιστάσεις του τυλίγματος διέγερσης και των τυλιγμάτων απόσβεσης αντίστοιχα.

Οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις [34]:

$$\psi_{ds} = -X_{ls} i_{ds} + X_{md} (-i_{ds} + i_{kd} + i_{fd}) \quad (2.20)$$

$$\psi_{qs} = -X_{ls} i_{qs} + X_{mq} (-i_{qs} + i_{kq1} + i_{kq2}) \quad (2.21)$$

$$\psi_{fd} = X_{lf} i_{fd} + X_{md} (-i_{ds} + i_{fd} + i_{kd}) \quad (2.22)$$

$$\psi_{kd} = X_{lkd}i_{kd} + X_{md}(-i_{ds} + i_{kd} + i_{fd}) \quad (2.23)$$

$$\psi_{kq1} = X_{lkq1}i_{kq1} + X_{mq}(-i_{qs} + i_{kq1} + i_{kq2}) \quad (2.24)$$

$$\psi_{kq2} = X_{lkq2}i_{kq2} + X_{mq}(-i_{qs} + i_{kq1} + i_{kq2}) \quad (2.25)$$

όπου  $X_{ls}, X_{lfd}, X_{lkd}, X_{lkq1}, X_{lkq2}$  : οι αυτεπαγωγές του στάτη, του τυλίγματος διέγερσης και των τυλιγμάτων απόσβεσης αντίστοιχα.  
 $X_{md}, X_{mq}$  : οι αμοιβαίες επαγωγικές αντιδράσεις στον άξονα d και q αντίστοιχα.

### 2.5.3 Ανά Μονάδα Σύστημα

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή συναρτηίσει των πεπλεγμένων ροών ανά δευτερόλεπτο και των ρευμάτων δίνεται σε φυσικές τιμές από τη σχέση:

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{p}{2}\right) \left(\frac{1}{\omega_b}\right) (\psi_{ds}i_{qs} - \psi_{qs}i_{ds}) \quad (2.26)$$

όπου p ο αριθμός των πόλων της μηχανής.

Η βασική ισχύς μπορεί να εκφραστεί ως :

$$S_B = 3 V_{B(abc)} I_{B(abc)} \quad (2.27)$$

ή ισοδύναμα :

$$S_B = \frac{3}{2} V_{B(qd0)} I_{B(qd0)} \quad (2.28)$$

Θεωρώντας ως βασική ροπή

$$T_B = \frac{p S_B}{2 \omega_b} \quad (2.29)$$

η ηλεκτρομαγνητική ροπή σε α.μ. τιμές ισούται με :

$$T_e = \psi_{ds}i_{qs} - \psi_{qs}i_{ds} \quad (2.30)$$

Η ενεργός και η άεργος ισχύς δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$P = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q) \quad (2.31)$$

$$Q = \frac{3}{2} (v_q i_d - v_d i_q) \quad (2.32)$$



Σε α.μ. τιμές τα παραπάνω μεγέθη ισούνται με:

$$P = v_d i_d + v_q i_q \quad (2.33)$$

$$Q = v_q i_d - v_d i_q \quad (2.34)$$

Η εξίσωση της κίνησης του μηχανικού μέρους της μηχανής γράφεται :

$$T_m - T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} = J \left( \frac{2}{p} \right) \frac{d\omega_e}{dt} \quad (2.35)$$

όπου  $\omega_m$  : η μηχανική γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα

$\omega_e$  : η αντίστοιχη ηλεκτρική ταχύτητα (σε rad/s)

$J$  : η ροπή αδρανείας (σε  $Kg \cdot m^2$ ) του στρεφόμενου μηχανικού μέρους της διάταξης.

Η ανηγμένη σταθερά αδρανείας σε sec ορίζεται ως :

$$H = \left( \frac{1}{2} \right) \left( \frac{2}{p} \right)^2 \frac{J\omega_b^2}{S_B} = \left( \frac{1}{2} \right) \left( \frac{2}{p} \right) \frac{J\omega_b}{T_B} \quad (2.36)$$

Συνεπώς, λύνοντας ως προς  $J$  έχουμε :

$$J = \frac{H \cdot S_b}{\frac{1}{2} \left( \frac{2}{p} \right)^2 \omega_b^2} = \frac{2H}{\left( \frac{2}{p} \right) \omega_b} \left[ \frac{S_b}{\left( \frac{2}{p} \right) \omega_b} \right] = \frac{2H}{\left( \frac{2}{p} \right) \omega_b} T_b \quad (2.37)$$

και η εξίσωση κίνησης γράφεται :

$$T_m - T_e = \frac{2H}{\left( \frac{2}{p} \right) \omega_b} T_b \left( \frac{2}{p} \right) \frac{d\omega_e}{dt} \Rightarrow \frac{T_m - T_e}{T_b} = 2H \frac{d \left( \frac{\omega_e}{\omega_b} \right)}{dt} \quad (2.38)$$

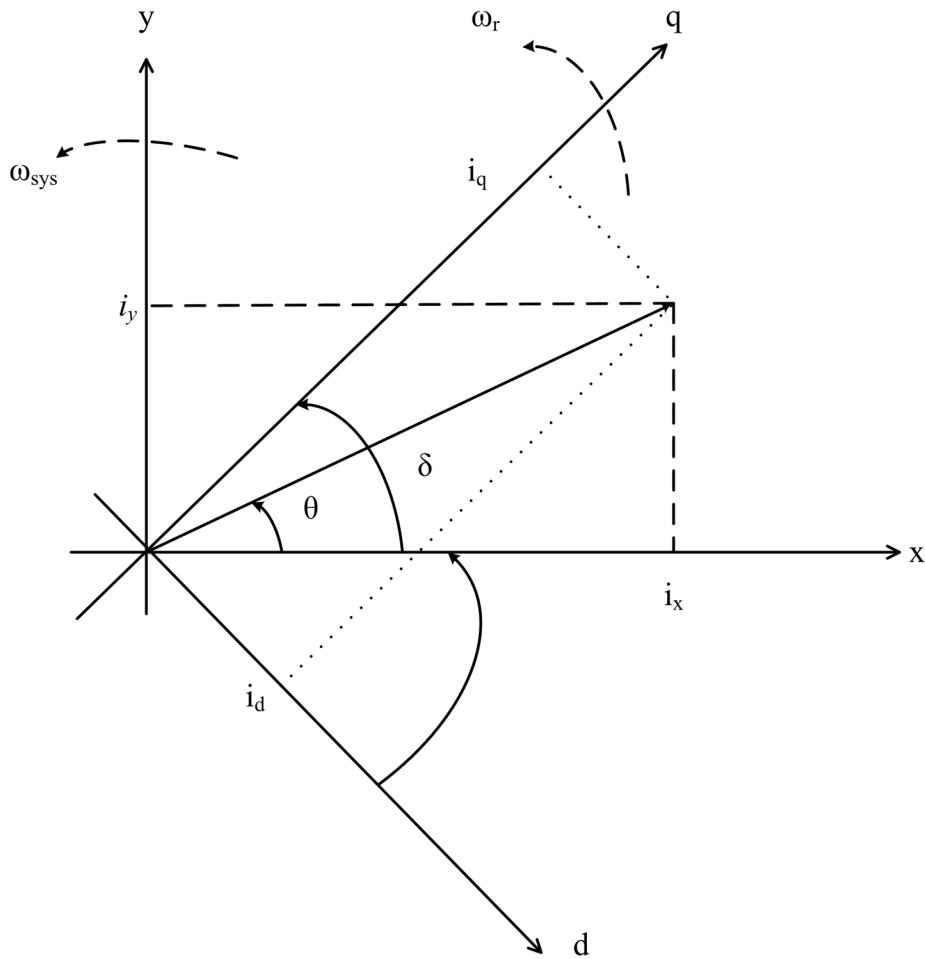
Επομένως η εξίσωση κίνησης στο ανά μονάδα σύστημα είναι:

$$T_m - T_e = 2H \frac{d(\omega_e)}{dt} \quad (2.39)$$

#### 2.5.4 Σύγχρονο Πλαίσιο Αναφοράς

Σε ένα σύστημα με πολλές μηχανές είναι αναγκαίο να οριστεί ένα κοινό ορθογώνιο πλαίσιο αναφοράς, το οποίο θα περιστρέφεται με τη γωνιακή ταχύτητα του συστήματος  $\omega_{sys}$ . Το κοινό αυτό πλαίσιο αναφοράς αναφέρεται σαν σύγχρονο xy πλαίσιο αναφοράς.

Στο 2.8 φαίνονται το σύγχρονο xy πλαίσιο αναφοράς του συστήματος, καθώς επίσης και το dq πλαίσιο αναφοράς του δρομέα μίας σύγχρονης γεννήτριας, του οποίου ο άξονας x



Σχήμα 2.8: Ορθογώνια πλαίσια αναφοράς συστήματος και σύγχρονης μηχανής

θεωρείται ότι αποτελεί τον άξονα αναφοράς όλων των γωνιών, ενώ ο άξονας  $y$  προπορεύεται κατά  $90^\circ$  [17].

Η δυναμική απόκριση της γωνίας  $\delta$  μίας σύγχρονης μηχανής περιγράφεται από τη διαφορική σχέση 2.40.

$$\dot{\delta} = \omega_r - \omega_{sys} \quad (2.40)$$

Στο σύγχρονο  $xy$  πλαίσιο αναφοράς, κάθε εναλλασσόμενο μέγεθος παριστάνεται σαν μιγαδικός αριθμός, όπως για παράδειγμα, το ρεύμα στάτη  $\hat{I}_s$  :

$$\hat{I}_s = i_x + j i_y \quad (2.41)$$

ή η τερματική τάση  $\hat{V}_t$  της σύγχρονης γεννήτριας:

$$\hat{V}_t = v_x + j v_y \quad (2.42)$$

Ο μετασχηματισμός του ρεύματος στάτη  $\hat{I}_s$  από το dq πλαίσιο της σύγχρονης γεννήτριας στο σύγχρονο xy πλαίσιο αναφοράς, παριστάνεται από την ακόλουθη μητρική σχέση [17]:

$$\begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \sin \delta & \cos \delta \\ -\cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix}}_{T(\delta)} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

όπου ο πίνακας  $T$  ονομάζεται πίνακας μετασχηματισμού. Αντίστοιχη μητρική σχέση ισχύει και για τις προβολές ( $u_x, u_y, u_d$  και  $u_q$ ) της τάσης του στάτη.

Η ανά μονάδα φαινόμενη ισχύς  $S_G$ , που παράγεται από τη σύγχρονη μηχανή είναι:

$$S_G = P_G + j Q_G = \hat{V}_t \hat{I}_s^* \quad (2.44)$$

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη του στάτη με την παράστασή τους στο σύγχρονο xy πλαίσιο αναφοράς του συστήματος, προκύπτει:

$$S_G = (v_x + j v_y)(i_x + j i_y)^* = (v_x i_x + v_y i_y) + j (v_y i_x - v_x i_y) \quad (2.45)$$

δηλαδή ισοδύναμα:

$$P_G = v_x i_x + v_y i_y \quad (2.46)$$

$$Q_G = v_y i_x - v_x i_y \quad (2.47)$$

### 2.5.5 Εξισώσεις Σύγχρονης Μηχανής

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται οι διαφορικές και αλγεβρικές εξισώσεις που περιγράφουν το μοντέλο της σύγχρονης μηχανής, που χρησιμοποιήθηκε στα μοντέλα των Α/Γ που περιγράφονται στην παρούσα εργασία.

Αμελώντας τα μεταβατικά του στάτη, οι διαφορικές εξισώσεις 2.14 και 2.15 των τυλίγμάτων του στάτη μετατρέπονται στις παρακάτω αλγεβρικές (στο α.μ σύστημα):

$$v_d = -r_s i_d - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_q \quad (2.48)$$

$$v_q = -r_s i_q + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_d \quad (2.49)$$

Στο δρομέα παριστάνονται δύο τυλίγματα, το τύλιγμα διέγερσης και ένα τύλιγμα απόσβεσης στον q άξονα. Οι διαφορικές εξισώσεις που ισχύουν για τα τυλίγματα του δρομέα είναι:

$$v_{fd} = r_{fd}i_{fd} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{fd}}{dt} \quad (2.50)$$

$$v_{kq} = 0 = r_{kq}i_{kq} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{kq}}{dt} \quad (2.51)$$

Οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο δίνονται από τις σχέσεις:

$$\psi_d = -X_d i_d + X_{md} i_{fd} \quad (2.52)$$

$$\psi_q = -X_q i_q + X_{mq} i_{kq} \quad (2.53)$$

$$\psi_{fd} = X_{fd} i_{fd} - X_{md} i_d \quad (2.54)$$

$$\psi_{kq} = X_{kq} i_{kq} - X_{mq} i_q \quad (2.55)$$

Οι επαγωγικές αντιδράσεις  $X_d$ ,  $X_q$ , στον άξονα  $d$  και  $q$  αντίστοιχα, προκύπτουν από τις σχέσεις :

$$X_d = X_{ls} + X_{md} \quad (2.56)$$

$$X_q = X_{ls} + X_{mq} \quad (2.57)$$

Οι επαγωγικές αντιδράσεις  $X_{fd}$ ,  $X_{kq}$  του τυλίγματος διέγερσης και του τυλίγματος απόσβεσης αντίστοιχα, προκύπτουν από τις σχέσεις :

$$X_{fd} = X_{lfd} + X_{md} \quad (2.58)$$

$$X_{kq} = X_{lkq} + X_{mq} \quad (2.59)$$

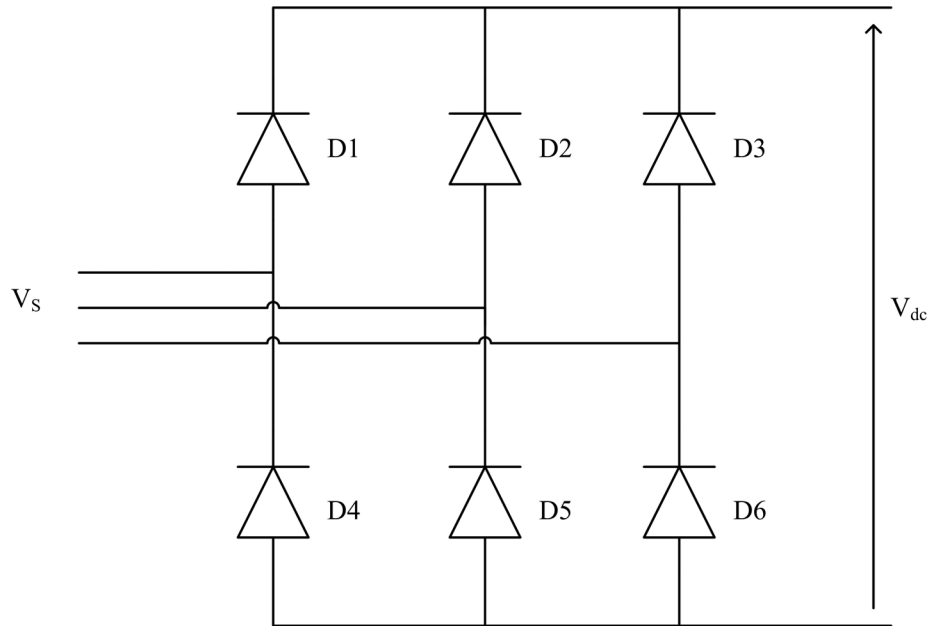
## 2.6 Ανορθωτής Διόδων

Εξαιτίας της δυνατότητας που έχει η σύγχρονη γεννήτρια να παράγει από μόνη της το πεδίο μέσω του τυλίγματος διέγερσης, στην πλευρά της γεννήτριας απαιτείται ένας απλός ανορθωτής διόδων. Η διάταξη ενός τριφασικού ανορθωτή φαίνεται στο σχήμα 2.9.

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου της ανόρθωσης σε φυσικές τιμές δίνεται από τη σχέση 2.60 [36].

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_S \quad (2.60)$$

όπου  $V_S$  : η πολική τάση στα άκρα της γεννήτριας (V)



Σχήμα 2.9: Τοπολογία τριφασικού ανόρθωτή διόδων

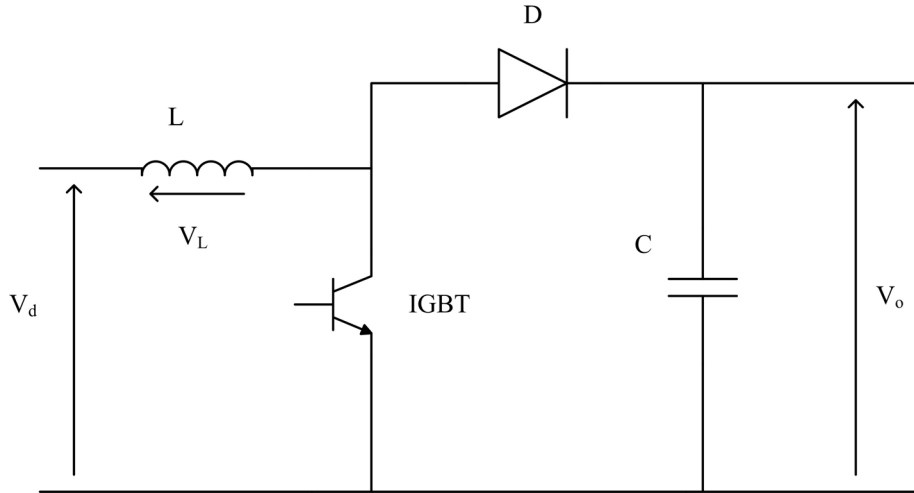
Όπως παρατηρούμε η τάση εξόδου της ανόρθωσης είναι ανάλογη της τάσης στα άκρα της γεννήτριας. Επομένως σε α.μ. τιμές οι δύο αυτές τάσεις ταυτίζονται, κάνοντας κατάλληλη επιλογή τιμών βάσεως.

## 2.7 Μετατροπέας Ανύψωσης Τάσης

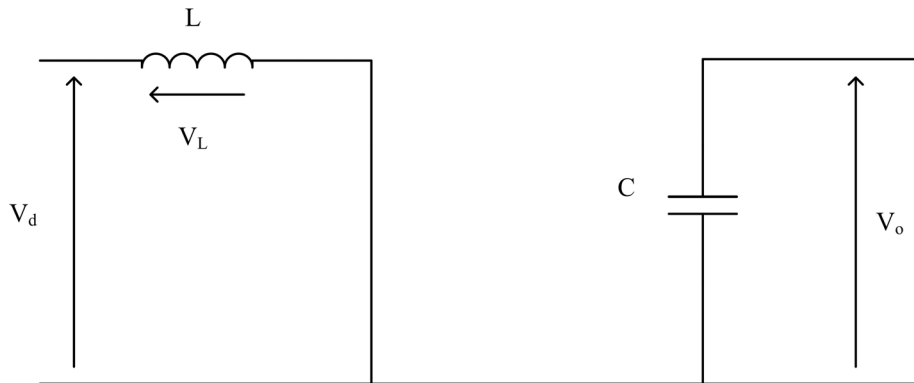
Η τοπολογία ενός μετατροπέα ανύψωσης τάσης (Boost Converter) φαίνεται στο σχήμα 2.10.

Στην είσοδο εφαρμόζεται η συνεχής τάση  $v_d$  και στην έξοδο η συνεχής τάση  $v_o$ , η οποία είναι μεγαλύτερη από τη  $v_d$ . Η λειτουργία του μετατροπέα ανύψωσης περιλαμβάνει δύο φάσεις [37]:

- Στην πρώτη φάση όπου ο ημιαγωγικός διακόπτης άγει, στα άκρα του πηνίου  $L$  εφαρμόζεται η τάση εισόδου  $v_d$ . Τότε το ρεύμα εισόδου αυξάνεται γραμμικά  $v_d = v_L = L \frac{di_L}{dt}$  και αποθηκεύεται ενέργεια στο πηνίο. Η διόδος  $D$  πολώνεται ανάστροφα και έτσι αποτρέπει την βραχυκύκλωση των άκρων του πυκνωτή εξόδου ο οποίος αρχίζει να εκφορτίζεται τροφοδοτώντας το φορτίο με την απαραίτητη ενέργεια. Λόγω της εκφόρτισης του πυκνωτή η τάση εξόδου αρχίζει να μειώνεται. Το ισοδύναμο κύκλωμα κατά τη φάση αυτή φαίνεται στο σχήμα 2.11.
- Στη δεύτερη φάση όπου ο ημιαγωγικός διακόπτης δεν άγει μεταφέρεται ενέργεια από την πηγή και το μαγνητικό πεδίο του πηνίου προς το φορτίο. Σε αυτήν την



Σχήμα 2.10: Τοπολογία DC/DC μετατροπέα ανύψωσης



Σχήμα 2.11: Ισοδύναμο κύκλωμα μετατροπέα κατά την αγωγή του ημιαγωγικού διακόπτη

περίπτωση το ρεύμα μειώνεται γραμμικά ενώ ο πυκνωτής φορτίζεται. Η τάση εισόδου είναι  $v_d = v_L + v_o = L \frac{di_L}{dt} + v_C$ . Το ισοδύναμο κύκλωμα κατά τη φάση αυτή φαίνεται στο σχήμα 2.12.

Η ενέργεια που αποθηκεύεται στην αυτεπαγωγή κατά τη φάση 1 είναι:

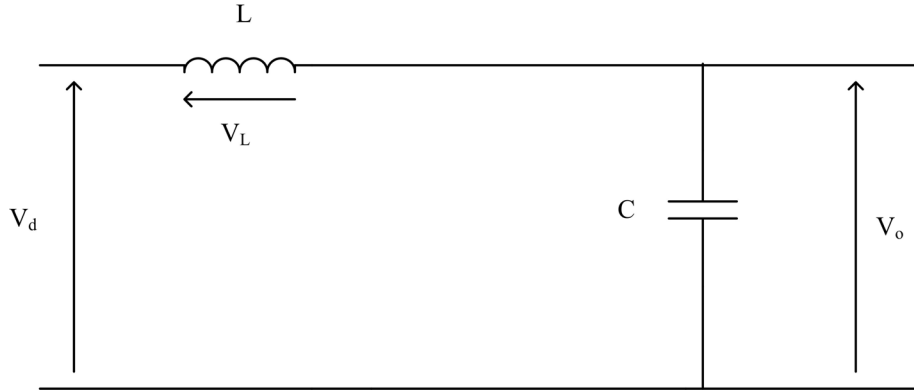
$$W_1 = V \cdot \bar{I}_S \cdot t_{ON} \quad (2.61)$$

Η ενέργεια που απελευθερώνεται από την αυτεπαγωγή κατά τη φάση 2 είναι:

$$W_2 = -(V - \bar{V}_0) \cdot \bar{I}_S \cdot t_{OFF} \quad (2.62)$$

όπου  $V$  : η τάση εισόδου

$\bar{V}_0$  : η μέση τιμή της τάσης εξόδου



Σχήμα 2.12: Ισοδύναμο κύκλωμα μετατροπέα κατά την αποκοπή του ημιαγωγικού διακόπτη

- $\bar{I}_S$  : η μέση τιμή του ρεύματος εισόδου
- $t_{OFF}$  : ο χρόνος κατά τον οποίο ο διακόπτης δεν άγει
- $t_{ON}$  : ο χρόνος κατά τον οποίο ο διακόπτης άγει

Για μετατροπέα που δεν παρουσιάζει απώλειες έχουμε [37]:

$$W_1 = W_2 \rightarrow V \cdot \bar{I}_S \cdot t_{ON} = -(V - \bar{V}_0) \cdot \bar{I}_S \cdot t_{OFF} \rightarrow \bar{V}_0 = \frac{V}{1-D}$$

όπου  $D = \frac{t_{ON}}{t_{ON}+t_{OFF}}$  : ο λόγος ανύψωσης ( Duty cycle )

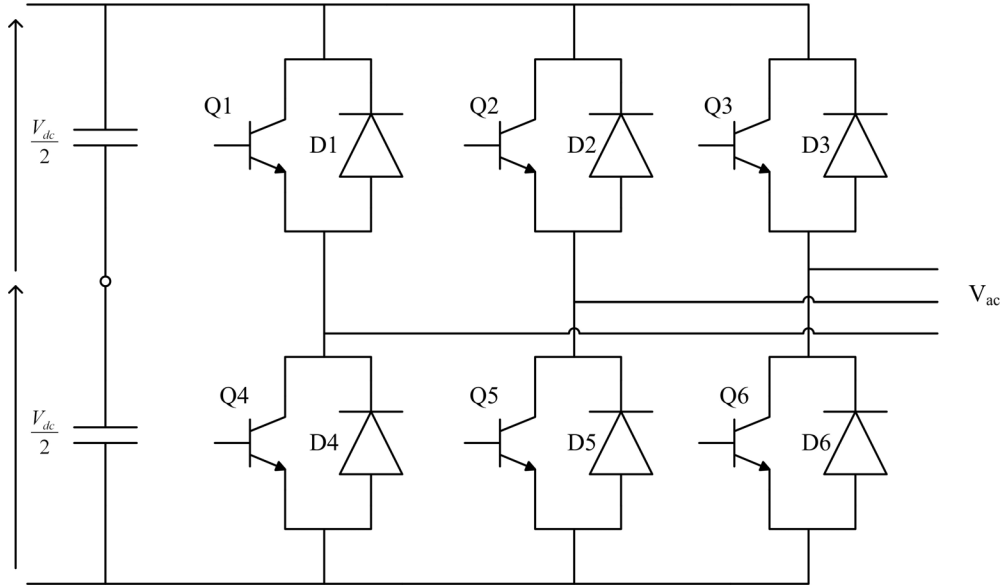
## 2.8 Αντιστροφέας PWM

Για την μετατροπή της συνεχούς τάσης του πυκνωτή που βρίσκεται μετά τον ανορθωτή διόδων ή μετά τον μετατροπέα ανύψωσης (όταν αυτός χρησιμοποιείται) σε εναλλασσόμενη, χρησιμοποιείται αντιστροφέας τα διακοπτικά στοιχεία (π.χ. IGBT) του οποίου μπορούν να λειτουργήσουν σε πολύ υψηλές συχνότητες (της τάξης των 10-20 kHz), κατασκευάζοντας την επιθυμητή εναλλασσόμενη τάση μέσω μεθόδων διαμόρφωσης εύρους παλμών (Pulse Width Modulation, PWM). Η τοπολογία ενός αντιστροφέα φαίνεται στο σχήμα 2.13.

Υποθέτοντας ότι ο αντιστροφέας χρησιμοποιεί την τεχνική SPWM και ότι η DC τάση εισόδου στα άκρα του είναι σταθερή, η AC τάση εξόδου είναι ανάλογη της DC τάσης εισόδου και συνδέονται σε φυσικές τιμές με την σχέση 2.63 [36]:

$$V_{ac} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \cdot m \cdot V_{dc} \quad (2.63)$$

όπου  $m$  ο συντελεστής διαμόρφωσης (modulation index,  $0 \leq m \leq 1$ )



Σχήμα 2.13: Τοπολογία τριφασικού αντιστροφέα

Για την μοντελοποίηση του αντιστροφέα χρησιμοποιείται ένα d-q πλαίσιο αναφοράς το οποίο στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα ( $\omega=314$  rad/sec). Επιπρόσθετα θεωρούμε ότι ο q άξονας βρίσκεται επί του διανύσματος της τερματικής τάσης  $V_{grid}$ . Επομένως οι σχέσεις που ισχύουν για την ενεργό και την άεργο ισχύ στον αντιστροφέα είναι:

$$P_{inv-grid} = V_{qs} \cdot i_{q,inv-grid} \quad (2.64)$$

$$Q_{inv-grid} = V_{qs} \cdot i_{d,inv-grid} \quad (2.65)$$

όπου

$$V_{qs} = V_{grid} \quad (2.66)$$

$$V_{ds} = 0 \quad (2.67)$$

Συνήθως ο αντιστροφέας λειτουργεί υπό μοναδιαίο συντελεστή ισχύος με αποτέλεσμα:

$$Q_{inv-grid} = 0 \rightarrow i_{d,inv-grid} = 0$$



---

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

---

### ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ Α/Γ

#### 3.1 Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας

Θεωρώντας μόνιμη κατάσταση λειτουργίας της γεννήτριας ( $\frac{d\psi_{fd}}{dt} = 0$ ,  $\frac{d\psi_{kq}}{dt} = 0$ ,  $i_{kq} = 0$ ) και αντικαθιστώντας τις σχέσεις 2.52 και 2.53 στις 2.48 και 2.49 έχουμε :

$$v_d = -r_s i_d - \frac{\omega_r}{\omega_b} (-X_q i_q + X_{mq} i_{kq}) = -r_s i_d + \frac{\omega_r}{\omega_b} X_q i_q \quad (3.1)$$

$$v_q = -r_s i_q + \frac{\omega_r}{\omega_b} (-X_d i_d + X_{md} i_{fd}) = -r_s i_q + \frac{\omega_r}{\omega_b} (-X_d i_d + E_f) \quad (3.2)$$

όπου  $E_f = \frac{X_{md}}{R_{fd}} v_{fd}$  : η Η.Ε.Δ διεγέρσεως ανάλογη της  $v_{fd}$ .

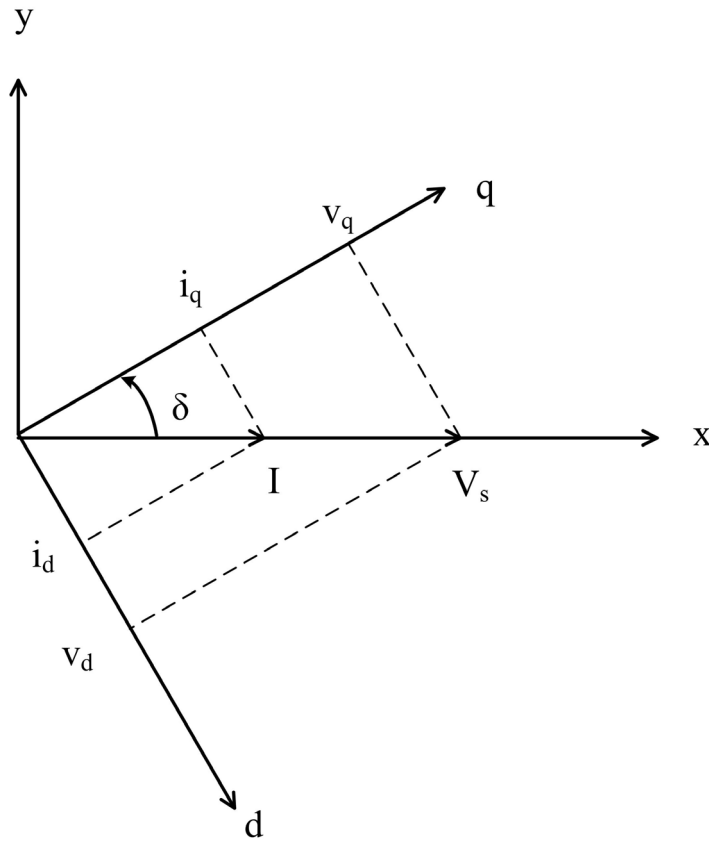
Η σύνδεση του τριφασικού ανορθωτή στην έξοδο της γεννήτριας εισάγει περιορισμούς στον τρόπο λειτουργίας της διάταξης. Πιο συγκεκριμένα, ο ανορθωτής επιβάλλει στη γεννήτρια να λειτουργεί υπό μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, δηλαδή οι θεμελιώδεις συνιστώσες των φασικών τάσεων και εντάσεων είναι συμφασικές, και η άεργος ισχύς εξόδου της μηχανής είναι μηδενική. Έτσι έχουμε στο α.μ σύστημα:

$$P = v_d i_d + v_q i_q \quad (3.3)$$

$$Q = 0 = v_q i_d - v_d i_q \quad (3.4)$$

απ' όπου προκύπτει ότι:

$$v_d i_q = v_q i_d \quad (3.5)$$



Σχήμα 3.1: Διανυσματικό διάγραμμα γεννήτριας

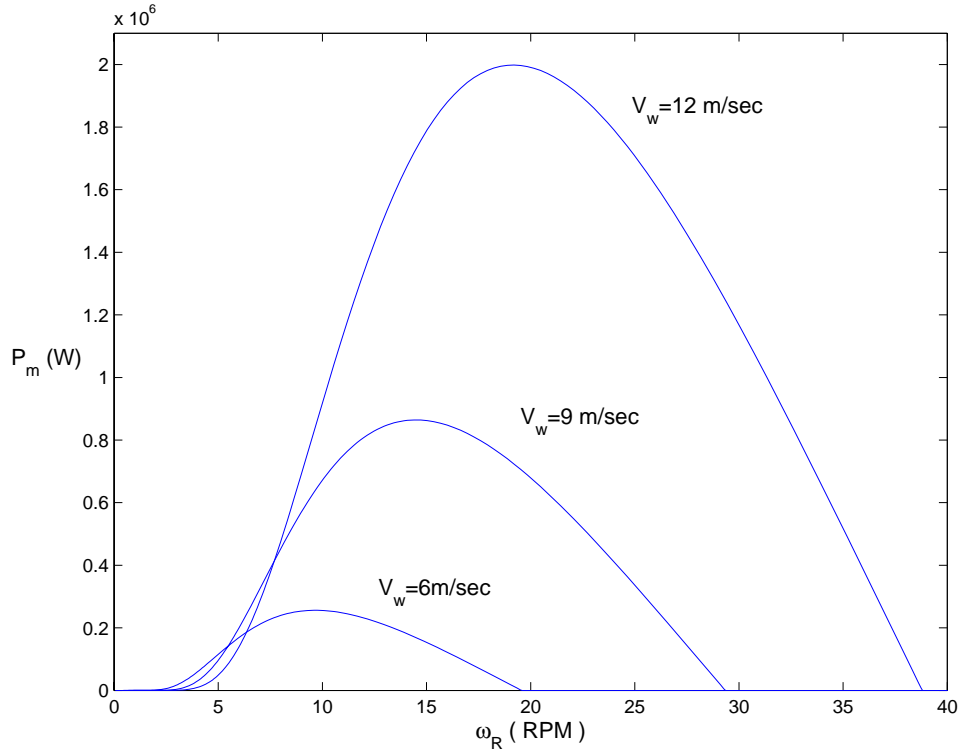
Τέλος αν θεωρήσουμε ότι η τερματική τάση  $V_s$  βρίσκεται επί του άξονα  $x$  ενός σύγχρονου πλαισίου αναφοράς  $xy$ , μπορούμε να ορίσουμε την γωνία  $\delta$ , ως τη γωνία μεταξύ του διανύσματος της τάσης  $V_s$  και του άξονα  $q$  του πλαισίου αναφοράς του δρομέα, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1.

$$\delta = \tan^{-1} \frac{i_d}{i_q} = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left( \frac{i_q}{i_d} \right) \quad (3.6)$$

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονίσουμε ότι η άεργος ισχύς ( $Q$ ) της μηχανής δεν ταυτίζεται με την άεργο ισχύ που ανταλλάσσεται με το δίκτυο. Η άεργος ισχύς που χρησιμοποιείται στην επίλυση ροών φορτίου καθορίζεται από τον έλεγχο του αντιστροφέα PWM, και είναι πλήρως αποζευγμένη από την γεννήτρια [11].

### 3.2 Στρατηγική Ελέγχου των Στροφών

Από τις διάφορες στρατηγικές που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία για τον έλεγχο των στροφών της Α/Γ, όπως για παράδειγμα ο έλεγχος με μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου, επιλέχθηκε ο έλεγχος με μέτρηση των στροφών του δρομέα. Το πλεονέκτημα της λογικής αυτής είναι η αποφυγή της μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου, που χαρακτηρίζεται από σημαντικά προβλήματα στην υλοποίησή της. Αντίθετα, η παρακολούθηση της μεταβολής των στροφών της μηχανής μπορεί να γίνει με ακρίβεια και αξιοπιστία.

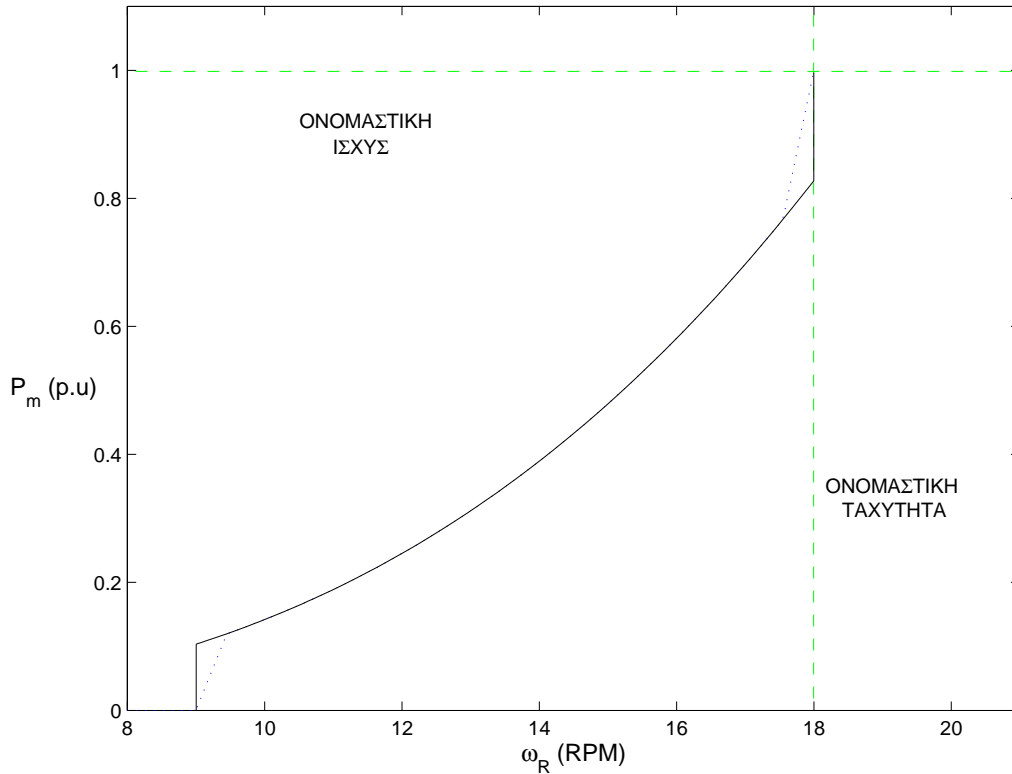


Σχήμα 3.2: Καμπύλες μηχανικής ισχύος  $P_m$  - ταχύτητας δρομέα  $\omega_R$ , για διάφορες ταχύτητες του ανέμου

Οι καμπύλες της μηχανικής ισχύος συναρτήσει των στροφών του δρομέα της Α/Γ για διάφορες ταχύτητες του ανέμου φαίνονται στο σχήμα 3.2.

Όταν η ανεμογεννήτρια για κάθε ταχύτητα ανέμου περιστρέφεται με κατάλληλες στροφές, ώστε να λειτουργεί υπό μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή, τότε επιτυγχάνεται και η μέγιστη παραγωγή μηχανικής ισχύος. Επομένως, στόχος του συστήματος ελέγχου των στροφών θα πρέπει αρχικά να είναι η λειτουργία υπό το βέλτιστο  $C_{p,opt}$ . Η κεντρική ιδέα του ελέγχου συνίσταται στο ότι πρέπει να ακολουθείται συνεχώς η θεωρούμενη ως βέλτιστη χαρακτηριστική στροφών - ισχύος, η οποία προσδιορίζεται από τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων.

Πιο συγκεκριμένα σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, η ταχύτητα περιστροφής διατηρείται



Σχήμα 3.3: Χαρακτηριστική ελέγχου στροφών

στο ελάχιστό της (9 Σ.Α.Λ). Στη συνέχεια η ταχύτητα αυξάνεται ανάλογα με τον άνεμο έτσι ώστε το  $C_p$  να παραμένει σταθερό και ίσο με το βέλτιστο. Όταν η ταχύτητα περιστροφής φτάσει την ονομαστική της τιμή (18 Σ.Α.Λ), κρατιέται σταθερή μέχρι η ταχύτητα του ανέμου να φτάσει και αυτή την ονομαστική της τιμή (12 m/sec). Αυτή η στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος (MPT- Maximum Power Tracking strategy) αποτυπώνεται στη συνεχή καμπύλη του σχήματος 3.3. Ο έλεγχος όμως με αυτή τη χαρακτηριστική παρουσιάζει το πρόβλημα ότι η επιθυμητή ισχύς δεν ορίζεται μονοσήμαντα στην ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή της ταχύτητας. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε η διακεκομμένη καμπύλη του σχήματος 3.3.

Οι καμπύλες στα σχήματα 3.2 και 3.3 σχεδιάστηκαν σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά της Α/Γ που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν την εργασία και που φαίνονται στον πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Πίνακας χαρακτηριστικών εξεταζόμενης ανεμογεννήτριας

Ονομαστική Ισχύς	2 MW
Διάμετρος Δρομέα	75 m
Ονομαστική ταχύτητα ανέμου	12 m/sec
Ταχύτητα Περιστροφής	9-21 Σ.Α.Λ.
Συνολική ροπή αδράνειας	3.64 sec
Ταχύτητα ανέμου εισόδου (cut – in)	3.5 m/sec

Οι παράμετροι της σύγχρονης γεννήτριας, που χρησιμοποιήθηκε στα μοντέλα των Α/Γ που περιγράφονται στην παρούσα εργασία δίνονται στον πίνακα 3.2 [11].

Πίνακας 3.2: Πίνακας χαρακτηριστικών σύγχρονης γεννήτριας

Χαρακτηριστικά Γεννήτριας	Τιμή
Ονομαστική Ισχύς	2 MW
Αριθμός Πόλων	80
Ταχύτητα	9-18 RPM
$X_{md}$	1.21 pu
$X_{mq}$	0.606 pu
$X_{ls}$	0.121 pu
$X_{fd}$	1.33 pu
$X_{kq}$	0.7 pu
$R_s$	0.06 pu
$R_{fd}$	0.0086 pu
$R_{kq}$	0.05 pu
H (συνολική)	3.64 sec

Η ονομαστική ταχύτητα της γεννήτριας σε ηλεκτρικά rad/sec ισούται με :

$$\omega_b = 2\pi \frac{n_{rated} p}{60 \cdot 2} = 24\pi \frac{rad}{sec} \quad (3.7)$$

όπου  $n_{rated}$  : η ονομαστική ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της Α/Γ (18 RPM)

### 3.3 Μέγιστη Παραγόμενη Ισχύς και Όρια Ρεύματος Γεννήτριας

Για δεδομένη τιμή της διέγερσης  $E_f$  υπάρχει ένα ανώτατο όριο της ισχύος που μπορεί να παράγει η εξεταζόμενη σύγχρονη γεννήτρια. Για την εύρεση του ορίου αυτού απαλείφουμε

τα ρεύματα  $i_d$  και  $i_q$  από τις εξισώσεις 3.1 και 3.2 με την βοήθεια των εξισώσεων 3.3 και 3.5. Πιο συγκεκριμένα έχουμε :

$$Q = 0 \rightarrow v_d i_q = v_q i_d \rightarrow \begin{cases} i_d = \frac{v_d}{v_q} i_q \\ i_q = \frac{v_q}{v_d} i_d \end{cases} \quad (3.8)$$

Με τη βοήθεια των παραπάνω δύο σχέσεων έχουμε :

$$P = v_d i_d + v_q i_q \rightarrow P = v_d i_d + \frac{v_d^2}{v_d} i_d \rightarrow v_d P = i_d (v_d^2 + v_q^2) \rightarrow i_d = \frac{v_d P}{(v_d^2 + v_q^2)} \quad (3.9)$$

$$P = v_d i_d + v_q i_q \rightarrow P = \frac{v_d^2}{v_q} i_q + v_q i_q \rightarrow v_q P = i_q (v_d^2 + v_q^2) \rightarrow i_q = \frac{v_q P}{(v_d^2 + v_q^2)} \quad (3.10)$$

Έτσι οι εξισώσεις 3.1 και 3.2 γίνονται :

$$v_d + r_s v_d \frac{P}{v_d^2 + v_q^2} - \frac{\omega_r}{\omega_b} X_q v_q \frac{P}{v_d^2 + v_q^2} = 0 = f_1 \quad (3.11)$$

$$v_q + r_s v_q \frac{P}{v_d^2 + v_q^2} + \frac{\omega_r}{\omega_b} X_d v_d \frac{P}{v_d^2 + v_q^2} - \frac{\omega_r}{\omega_b} E_f = 0 = f_2 \quad (3.12)$$

Επειδή η μέγιστη ισχύς αντιστοιχεί σε λειτουργία ανομαστικών στροφών (βλ. σχήμα 3.3), κάνοντας την απλοποίηση ότι  $\omega_r = \omega_b$  για μεγάλες τιμές της ισχύος, οι εξισώσεις 3.11 και 3.12 γίνονται:

$$v_d + r_s v_d \frac{P}{v_d^2 + v_q^2} - X_q v_q \frac{P}{v_d^2 + v_q^2} = 0 = f_1 \quad (3.13)$$

$$v_q + r_s v_q \frac{P}{v_d^2 + v_q^2} + X_d v_d \frac{P}{v_d^2 + v_q^2} - E_f = 0 = f_2 \quad (3.14)$$

Το πρόβλημα της εύρεσης της μέγιστης παραγόμενης ισχύος ανάγεται σε πρόβλημα βελτιστοποίησης με αναγκαίες συνθήκες βελτίστου 1ης τάξης ή συνθήκες Kuhn-Tucker [38]. Ας θεωρήσουμε το γενικό πρόβλημα βελτιστοποίησης [39]:

$$\max_{P,x} \quad P \quad (3.15)$$

με ιστοτικούς περιορισμούς:

$$f(x, P) = 0 \quad (3.16)$$

Αρχικά, ορίζεται η συνάρτηση Lagrange τέτοια ώστε:

$$L = P + w^T f(x, P) \quad (3.17)$$

όπου  $w$ : το διάνυσμα των συντελεστών Lagrange.

Μηδενίζοντας τις παραγώγους της συνάρτησης Lagrange ως προς  $w$ ,  $P$  και  $x$  έχουμε τις ακόλουθες αναγκαίες συνθήκες βελτίστου 1ης τάξης:

$$\nabla_w L = 0 \Leftrightarrow f(x, P) = 0 \quad (3.18)$$

$$\nabla_P L = 0 \Leftrightarrow 1 + \nabla_P f^T w = 0 \quad (3.19)$$

$$\nabla_x L = 0 \Leftrightarrow f_x^T w = 0 \quad (3.20)$$

όπου  $f_x$ : η Ιακωβιανή μήτρα του  $f$  ως προς  $x$ .

Η πρώτη αναγκαία συνθήκη βελτίστου (3.18) ταυτίζεται με τους ισοτικούς περιορισμούς του προβλήματος (3.16). Από την (3.19) προκύπτει ότι οι συντελεστές Lagrange,  $w$ , δεν μπορούν να είναι όλοι μηδενικοί. Το γεγονός αυτό συνδυαζόμενο με την σχέση (3.20) οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ιακωβιανή μήτρα  $f_x$  είναι μη αντιστρέψιμη με αποτέλεσμα:

$$\det f_x = 0 \quad (3.21)$$

Επανερχόμενοι στο πρόβλημα της εύρεσης της μέγιστης παραγόμενης ισχύος της γεννήτριας, οι ισοτικοί περιορισμοί του προβλήματος είναι οι σχέσεις 3.13 και 3.14. Η τρίτη εξίσωση που απαιτείται προκύπτει, με βάση την παραπάνω θεωρία, μηδενίζοντας την ορίζουσα της ιακωβιανής μήτρας. Έτσι έχουμε :

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial v_d} & \frac{\partial f_1}{\partial v_q} \\ \frac{\partial f_2}{\partial v_d} & \frac{\partial f_2}{\partial v_q} \end{bmatrix} = (v_d^2 + v_q^2)^2 - P^2 r_s^2 - P^2 X_d X_q + 2P v_d v_q (X_q - X_d)(v_d^2 + v_q^2) = 0 \quad (3.22)$$

Το  $3 \times 3$  σύστημα των εξισώσεων 3.13, 3.14 και 3.22 είναι μη γραμμικό και μπορεί, για δεδομένα χαρακτηριστικά γεννήτριας, να επιλυθεί αριθμητικά, δίνοντας για δεδομένη τιμή διέγερσης,  $E_f$ , την μέγιστη ισχύ  $P_{max}$  και τις τάσεις  $v_d$  και  $v_q$ .

Εάν θέλουμε να υπολογίσουμε την ελάχιστη τιμή της διέγερσης,  $E_f^{\min}$ , η οποία επαρκεί για να παραχθεί ονομαστική ισχύς  $P_{nom} = 1$  α.μ. μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις ίδιες εξισώσεις, διότι για  $E_f = E_f^{\min}$  έχουμε  $P_{max} = P = P_{nom}$ . Έτσι, βρέθηκε ότι η ελάχιστη τιμή της διέγερσης για την οποία η γεννήτρια μπορεί να παράγει ενεργό ισχύ  $P=1$  α.μ είναι :

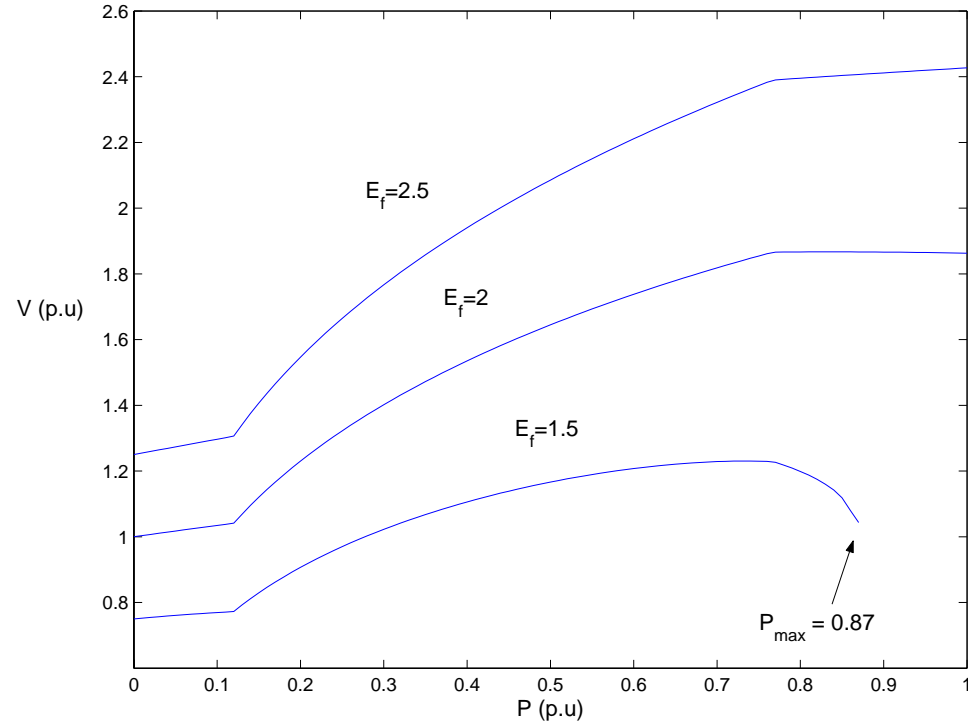
$$E_f = 1.605 \text{ α.μ}$$

για τάση

$$V = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} = \sqrt{0.5299^2 + 1.0467^2} = 1.1732 \text{ α.μ.} \quad (3.23)$$

Σε αυτό το σημείο να επισημάνουμε ότι για την επίλυση του μη γραμμικού συστήματος των εξισώσεων χρησιμοποιήσαμε την συνάρτηση fsolve της MATLAB.

Ο περιορισμός αυτός της παραγόμενης ενεργού ισχύος φαίνεται και στα σχήματα 3.4 και 3.5.

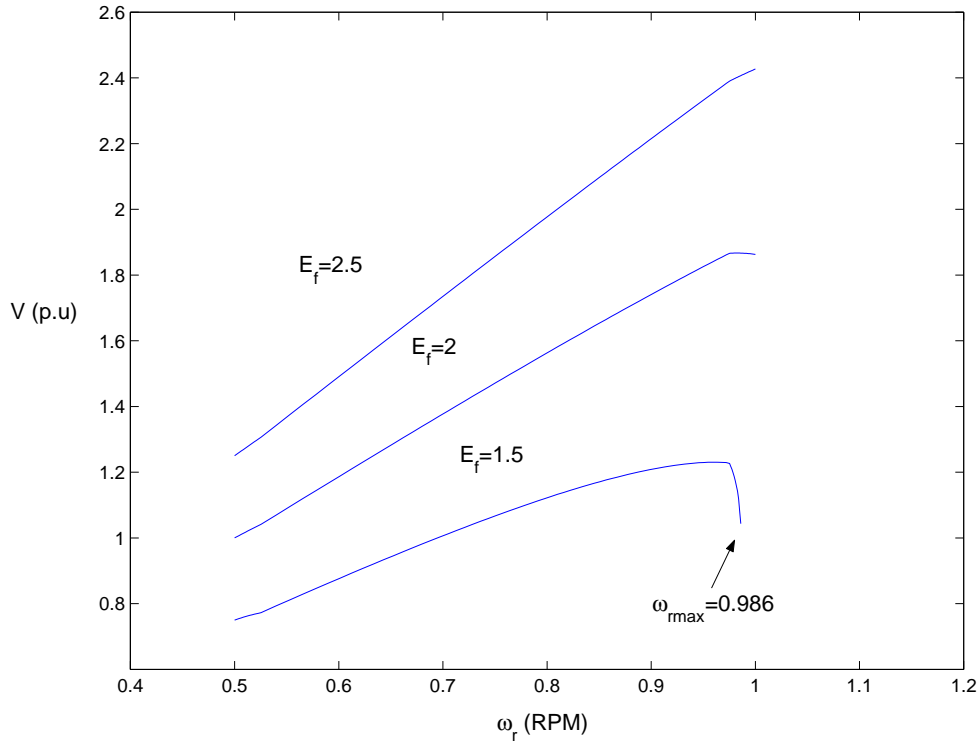


Σχήμα 3.4: Καμπύλη τερματικής τάσης - ενεργού ισχύος για διάφορες τιμές της διέγερσης

Πιο συγκεκριμένα, στο σχήμα 3.4 έχει σχεδιαστεί για τρεις τιμές της διέγερσης η τερματική τάση της γεννήτριας,  $V$ , σε συνάρτηση της ενεργού ισχύος,  $P$ . Οι καμπύλες αυτές προέκυψαν από την επίλυση του συστήματος των δύο εξισώσεων 3.11 και 3.12, με αγνώστους τις τάσεις  $v_d$  και  $v_q$ . Η τιμή της διέγερσης,  $E_f$ , καθώς και της ενεργού ισχύος είναι γνωστές, ενώ τιμή της ταχύτητας,  $\omega_r$ , προκύπτει για κάθε  $P$  από την καμπύλη 3.3.

Από το σχήμα 3.4 κατ'αρχάς παρατηρούμε ότι οι καμπύλες έχουν δύο γραμμικά και ένα μη γραμμικό τμήμα. Αυτό οφείλεται στην μορφή της καμπύλης ελέγχου των στροφών (σχήμα 3.3) που επιλέχθηκε (βλ. παράγραφο 3.2) και η οποία αποτελείται επίσης από ένα μη γραμμικό και δύο γραμμικά τμήματα. Επίσης, παρατηρούμε ότι για  $E_f = 1.5$  α.μ και για ισχύ μεγαλύτερη της τιμής  $P = 0.87$  (η οποία είναι η μέγιστη παραγόμενη ενεργός ισχύς για τη συγκεκριμένη διέγερση) δεν υπάρχει λύση του συστήματος των δύο εξισώσεων 3.11 και





Σχήμα 3.5: Καμπύλη τερματικής τάσης - στροφών για διάφορες τιμές της διέγερσης

3.12. Αντίστοιχα, το ίδιο φαίνεται και στο σχήμα 3.5 για στροφές μεγαλύτερες της τιμής  $\omega_{rmax} = 0.986$ .

Ο περιορισμός της παραγόμενης ενεργού ισχύος μεταφράζεται και στον περιορισμό της τιμής των ρευμάτων  $i_d$  και  $i_q$ . Πιο συγκεκριμένα αντικαθιστώντας τις εξισώσεις 3.1 και 3.2 στη σχέση 3.5 προκύπτει :

$$-r_s i_d i_q + \frac{\omega_r}{\omega_b} X_q i_q^2 = -r_s i_q i_d - \frac{\omega_r}{\omega_b} X_d i_d^2 + \frac{\omega_r}{\omega_b} E_f i_d \quad (3.24)$$

συνεπώς

$$X_q i_q^2 + X_d i_d^2 - E_f i_d = 0 \quad (3.25)$$

Η εξίσωση 3.25 προκύπτει από την παραδοχή μηδενικής άεργου ισχύος και ορίζει το γεωμετρικό τόπο των q και d συνιστωσών της έντασης της γεννήτριας. Εάν προστεθεί και στα δύο μέλη της ο όρος  $\frac{(E_f)^2}{4X_d}$  έχουμε :

$$X_q i_q^2 + X_d i_d^2 - E_f i_d + \frac{(E_f)^2}{4X_d} = \frac{(E_f)^2}{4X_d} \quad (3.26)$$

ή ισοδύναμα

$$X_q i_q^2 + X_d \left[ i_d^2 - 2 \left( \frac{E_f}{2X_d} \right) i_d + \left( \frac{E_f}{2X_d} \right)^2 \right] = \frac{(E_f)^2}{4X_d} \quad (3.27)$$

$$X_q i_q^2 + X_d \left( i_d - \frac{E_f}{2X_d} \right)^2 = \frac{(E_f)^2}{4X_d} \quad (3.28)$$

και τελικά είναι

$$\frac{i_q^2}{\frac{(E_f)^2}{4X_d X_q}} + \frac{\left( i_d - \frac{E_f}{2X_d} \right)^2}{\frac{(E_f)^2}{4X_d^2}} = 1 \quad (3.29)$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι μια έλλειψη στο επίπεδο των  $i_d - i_q$ , και παρουσιάζεται στο σχήμα 3.6 .

Επομένως, οι εντάσεις μπορούν να λάβουν τις μέγιστες τιμές

$$i_{q,\max} = \frac{E_f}{2\sqrt{X_d X_q}} \quad (3.30)$$

όταν

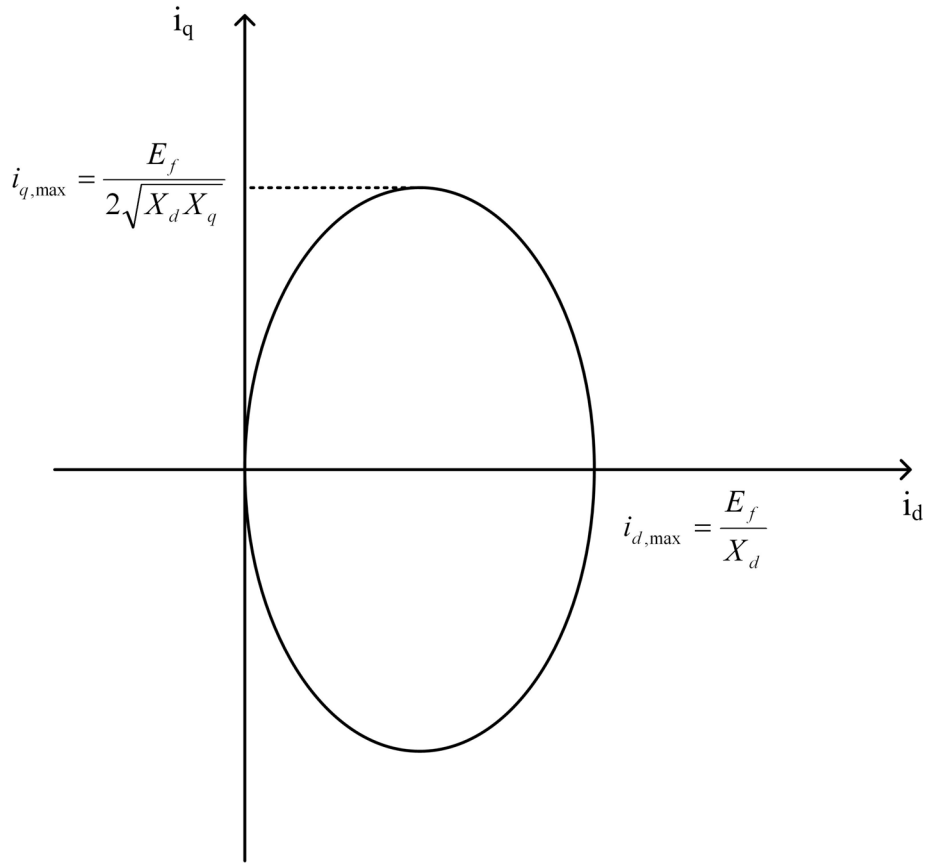
$$i_d = \frac{E_f}{2X_d} \quad (3.31)$$

και

$$i_{d,\max} = \frac{E_f}{X_d} \quad (3.32)$$

όταν

$$i_q = 0 \quad (3.33)$$



Σχήμα 3.6: Γεωμετρικός τόπος των ρευμάτων της γεννήτριας, με την προϋπόθεση παραγωγής μηδενικής άεργου ισχύος.

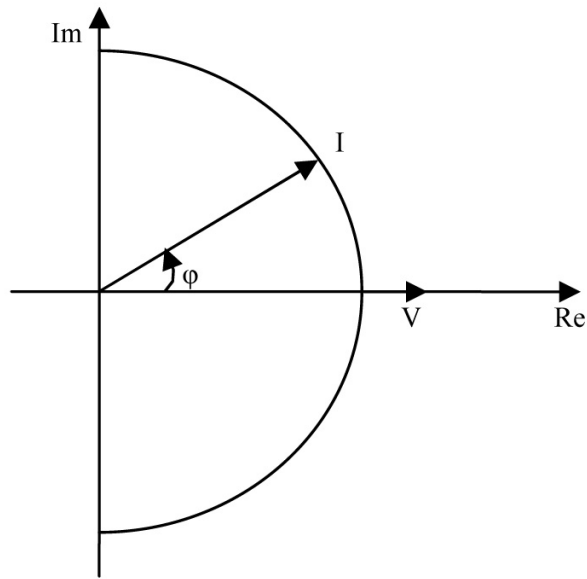
### 3.4 Διαστασιολόγηση και Όρια PWM Αντιστροφέα

Η διαστασιολόγηση και ο καθορισμός των ορίων του αντιστροφέα είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα στη μοντελοποίηση του συστήματος. Συνήθως το όριο της ισχύος του είναι μεγαλύτερο από την ονομαστική ενεργό ισχύ της ανεμογεννήτριας, καθώς απαιτείται σε ορισμένες περιπτώσεις να ανταλλάσσει άεργο ισχύ με το δίκτυο ακόμα και όταν η ενεργός ισχύς έχει τη μέγιστη της τιμή [40].

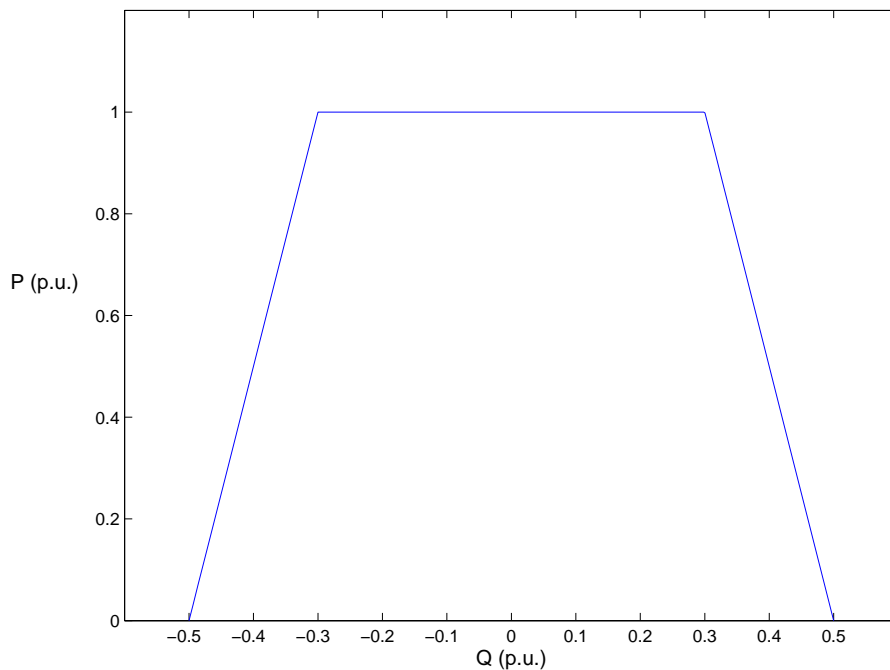
Η σχέση 3.34 δείχνει ότι όταν η ενεργός ισχύς είναι μικρότερη της ονομαστικής το όριο της άεργου ισχύος που μπορεί να ανταλλαχθεί αυξάνεται.

$$VA^2 = P^2 + Q^2 \quad (3.34)$$

Η τυπική περιοχή λειτουργίας ενός αντιστροφέα φαίνεται στο σχήμα 3.8. [41]



Σχήμα 3.7: Τάση και ρεύμα αντιστροφέα στο μιγαδικό επίπεδο



Σχήμα 3.8: Τυπική περιοχή λειτουργίας αντιστροφέα

Τα όρια του αντιστροφέα οφείλονται στα μέγιστα ρεύματα τα οποία τα ηλεκτρονικά του μπορούν να υποστούν, πριν φτάσουν τα θερμικά όριά τους. Τυπικές τιμές του μέγιστου ρεύματος του αντιστροφέα είναι  $I_{\max} = 1.2$  (α.μ). Όταν εμφανίζεται πτώση τάσης στα

άκρα του αντιστροφέα, και για δεδομένα VA, αυτό μεταφράζεται αυτόματα σε αύξηση του ρεύματος που τον διαρρέει. Επομένως τα μέγιστα όρια αέργου ισχύος που μπορεί να παρέχει ο αντιστροφέας δεν εξαρτώνται μόνο από την ενεργό ισχύ αλλά και από το μέτρο της τάσης στα άκρα του. Η μέγιστη αέργος ισχύς συναρτηθεί της μέγιστης τιμής του ρεύματος και της γωνίας μεταξύ της τάσης και του ρεύματος του αντιστροφέα είναι [40]:

$$Q_{\max} = \sqrt{V^2 \cdot I_{\max}^2 - V^2 \cdot I_{\max}^2 \cdot \cos^2 \varphi} = V \cdot I_{\max} \cdot \sin \varphi \quad (3.35)$$

Η σχέση 3.35 υποδεικνύει ότι όσο μικρότερο είναι το μέτρο της τάσης στα άκρα του αντιστροφέα τόσο μικρότερο είναι το όριο της αέργου ισχύος. Πρέπει επίσης να τονισθεί ότι τα όρια του ρεύματος περιορίζουν και την ενεργό ισχύ που μπορεί να παρέχει ο αντιστροφέας. Έτσι η μέγιστη ενεργός ισχύς δίνεται από τη σχέση 3.36.

$$P_{\max} = V \cdot I_{\max} \cdot \cos \varphi \quad (3.36)$$

Ο πρωτεύων σκοπός του αντιστροφέα σε περίπτωση πτώσης τάσης είναι να επιβάλλει την έγχυση της παραγόμενης ενεργού ισχύος και σε δεύτερη φάση να υποστηρίξει την τάση. Υπάρχουν τρεις πιθανές περιπτώσεις [40]:

1.  $P_{gen} < VI_{\max}$

Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει τιμή της γωνίας  $\varphi$  έτσι ώστε:

$$\cos \varphi = \frac{P_{gen}}{VI_{\max}} \quad (3.37)$$

επομένως με  $P_{gen} < P_{\max}$  προκύπτει ότι:

$$Q_{\max} = \sqrt{V^2 \cdot I_{\max}^2 - P_{gen}^2} \quad (3.38)$$

2.  $P_{gen} = VI_{\max}$

Σε αυτή την περίπτωση είναι δυνατή η έγχυση της παραγχθείσας ενεργού ισχύος με τον περιορισμό  $Q_{\max} = 0$

3.  $P_{gen} > VI_{\max}$

Από την εξίσωση 3.37 φαίνεται ότι δεν υπάρχει τιμή της γωνίας  $\varphi$  έτσι ώστε να έχουμε την επιθυμητή έγχυση ενεργού ισχύος. Αυτό συμβαίνει στις περιπτώσεις που το μέτρο της τάσης έχει πολύ μικρή τιμή. Σε αυτή την περίπτωση η ενεργός ισχύς περιορίζεται στην τιμή  $P_{\max} = V \cdot I_{\max}$  και  $Q_{\max} = 0$

Στο  $d - q$  πλαίσιο, αφού η προτεραιότητα του αντιστροφέα είναι ο έλεγχος της ενεργού ισχύος, η τιμή του ρεύματος  $i_{d,inv-grid}$  προκύπτει από τη διαφορά του μέγιστου ρεύματος  $I_{\max}$  και του ρεύματος  $i_{q,inv-grid}$ .

$$i_{d,inv-grid} = \sqrt{I_{\max}^2 - i_{q,inv-grid}^2} \quad (3.39)$$

### 3.4.1 Έυρεση Μέγιστου Ρεύματος Αντιστροφέα

Θεωρούμε ένα αιολικό πάρκο με ονομαστική ενεργό ισχύ  $P_{nom}$ . Αν υποθέσουμε ότι θα πρέπει να έχει την δυνατότητα να λειτουργεί με συντελεστή ισχύος (0.95 επαγωγικό- 0.95 χωρητικό) τότε η άεργος ισχύς που θα μπορεί να ανταλλάσσει με το δίκτυο είναι:

$$Q_{nom} = P_{nom} \cdot \tan(\cos^{-1} PF) = P_{nom} \cdot \tan(\cos^{-1} 0.95) = 0.3287 \cdot P_{nom} \quad (\text{MVar})$$

Η ονομαστική φαινόμενη ισχύς του πάρκου είναι:

$$S_{nom} = \sqrt{P_{nom}^2 + Q_{nom}^2} = 1.05263 \cdot P_{nom}$$

Στο α.μ σύστημα ισχύει ότι:  $|S| = |V| \cdot |I|$ . Επιλέγουμε βασική ισχύ την ονομαστική ενεργό ισχύ του πάρκου, δηλαδή  $P_{nom}$ . Αν θεωρήσουμε επίσης ότι το αιολικό πάρκο θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί υπό ονομαστική ισχύ και για τάση 0.9 α.μ. τότε το μέγιστο ρεύμα που πρέπει να παρέχει ο αντιστροφέας είναι:

$$|S_{max}| = |V_{min}| \cdot |I_{max}| \rightarrow |I_{max}| = \frac{1.05263 \cdot P_{nom}}{0.9 \cdot P_{nom}} = 1.17 \quad (\text{α.μ.}).$$

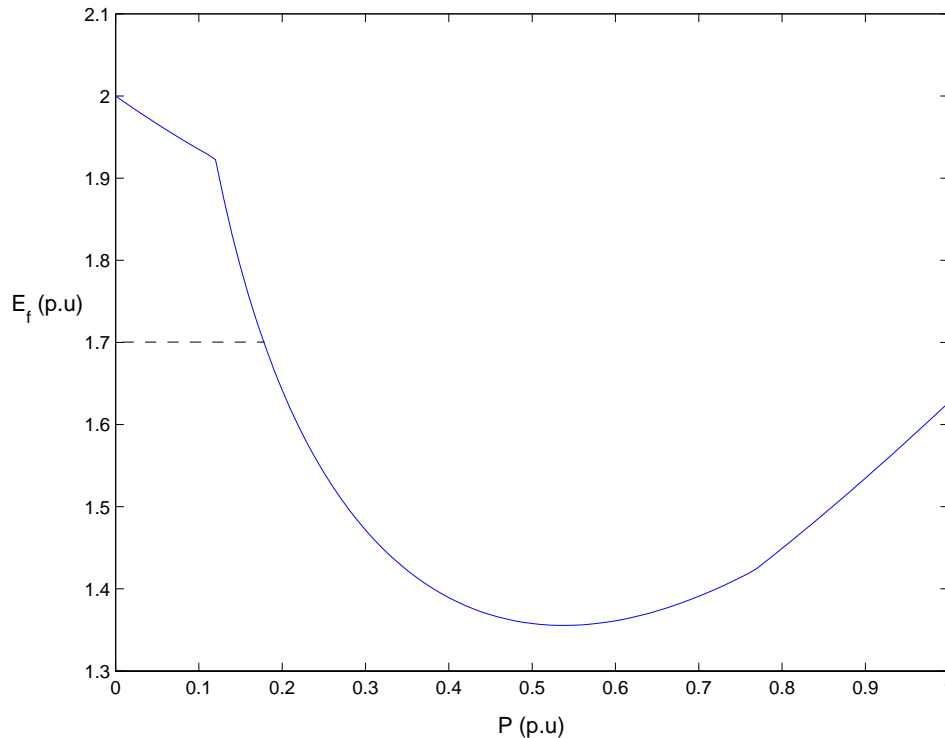
Έτσι με τις παραπάνω προϋποθέσεις συμπεραίνουμε ότι το μέγιστο ρεύμα του αντιστροφέα είναι 1.17 (α.μ.).

## 3.5 Μέθοδοι Ελέγχου Ανεμογεννήτριας

Στην συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζεται η λογική ελέγχου των μοντέλων των Α/Γ που αναπτύχθηκαν στην παρούσα εργασία. Πιο συγκεκριμένα λόγω των περιορισμών που υπεισέρχονταν έχοντας σταθερή διέγερση, εξετάσαμε την περίπτωση μεταβλητής διέγερσης.

Για ονομαστική τάση στα άκρα της γεννήτριας ( $V=1$  α.μ.) η τιμή της διέγερσης  $E_f$  ως συνάρτηση της ενεργού ισχύος φαίνεται στο σχήμα 3.9.

Παρατηρώντας το σχήμα 3.9 συμπεραίνουμε ότι δεν υπάρχει μονότονη σχέση μεταξύ της τάσης διέγερσης και της ενεργού ισχύος. Πιο συγκεκριμένα για μικρές τιμές της ισχύος ( $P \leq 0.53$  α.μ.) η κλίση της καμπύλης είναι αρνητική με αποτέλεσμα αύξηση της ισχύος να οδηγεί σε μείωση της τάσης διέγερσης. Αντίθετα για μεγάλες τιμές της ισχύος ( $P > 0.53$  α.μ.) η κλίση της καμπύλης είναι θετική με αποτέλεσμα αύξηση της ισχύος να οδηγεί σε αύξηση της τάσης διέγερσης.



Σχήμα 3.9: Καμπύλη τάσης διέγερσης -ενεργού ισχύς για ονομαστική τάση ακροδεκτών της γεννήτριας

### 3.5.1 Ρύθμιση Τάσης Γεννήτριας με A.P.T.

Σε αυτή τη μέθοδο ελέγχου, το σύστημα διέγερσης της γεννήτριας χρησιμοποιείται για να ελέγχει την τάση στα άκρα της μέσω ενός αυτόματου ρυθμιστή τάσης (Automatic Voltage Regulator, AVR), όπως συνηθίζεται στις κλασσικές σύγχρονες γεννήτριες που είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο. Όμως, λόγω του ανορθωτή διόδων η τάση του πυκνωτή  $V_c$  (βλ. σχήμα 2.1) είναι ανάλογη της τάσης  $V_s$  των ακροδεκτών της γεννήτριας ενώ στο α.μ. σύστημα οι τιμές τους ταυτίζονται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, το σύστημα διέγερσης να ελέγχει τελικά την DC τάση του πυκνωτή και να την κρατάει στην ονομαστική της τιμή (1 α.μ.).

Όσον αφορά στον αντιστροφέα PWM, που είναι από την πλευρά του δικτύου, αυτός εγγχεί ενεργό ισχύ στο δίκτυο, ακολουθώντας την στρατηγική Μέγιστης Απολαβής Ισχύος (βλ. σχήμα 3.3), με μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής.

Τέλος, μοντελοποιείται και το σύστημα ελέγχου της γωνίας βήματος των πτερυγίων της Α/Γ για τον περιορισμό της ισχύος εξόδου στην ονομαστική της τιμή, για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής.

### 3.5.2 Ρύθμιση Ισχύος Μέσω της Διέγερσης

Σε αυτή τη μέθοδο ελέγχου, το σύστημα διέγερσης της γεννήτριας χρησιμοποιείται για να υλοποιεί την στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος (MPT strategy). Πιο συγκεκριμένα έχοντας δεδομένη τη ταχύτητα του δρομέα, υπολογίζουμε την βέλτιστη ενεργό ισχύ που πρέπει να παράγει η γεννήτρια. Στη συνέχεια με βάση την καμπύλη 3.9 υπολογίζεται ποιά πρέπει να είναι η κατάλληλη διέγερση για τη δεδομένη ενεργό ισχύ.

Ο PWM αντιστροφέας σε αυτή την περίπτωση μοντελοποιείται έτσι ώστε να κρατάει σταθερή την τάση εισόδου του ελέγχοντας την ενεργό ισχύ που μεταφέρεται από την DC πλευρά προς το δίκτυο.

Και σε αυτήν την περίπτωση το μοντέλο της Α/Γ διαθέτει σύστημα ελέγχου της γωνίας του βήματος των πτερυγίων της, για τον περιορισμό της ισχύος εξόδου στην ονομαστική της τιμή, για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής.

### 3.5.3 Λειτουργία DC/DC Μετατροπέα Ανύψωσης σε Περίπτωση Σταθερής Διέγερσης

Το μοντέλο αυτό αποτελεί παραλλαγή του μοντέλου που περιγράφηκε στην παράγραφο 3.5.1. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι τώρα η τιμή της διέγερσης περιορίζεται στην τιμή  $E_f^{max} = 1.7$  α.μ.

Σε αυτήν την περίπτωση (όταν είναι περιορισμένη η διέγερση) με τη μείωση της ισχύος η τάση  $V_s$  στους ακροδέκτες της γεννήτριας μειώνεται. Γι αυτό το λόγο χρησιμοποιείται ένας DC/DC μετατροπέας ανύψωσης ο οποίος κρατάει την τιμή της τάσης  $V_c$  του πυκνωτή σταθερή μεταβάλλοντας τον λόγο διαμόρφωσης,  $m$ . Επειδή, όπως έχουμε προαναφέρει, η τάση ακροδεκτών της γεννήτριας είναι ίση με την τάση στη έξοδο του ανορθωτή διόδων στο α.μ. σύστημα, η σχέση που ισχύει είναι :

$$V_c = mV_s \quad (3.40)$$

όπου  $m$  : ο λόγος διαμόρφωσης,  $1 < m < 2$ .

Όσον αφορά στον αντιστροφέα PWM, που είναι από την πλευρά του δικτύου, αυτός εγγχεί ενεργό ισχύ στο δίκτυο, ακολουθώντας την στρατηγική Μέγιστης Απολαβής Ισχύος (βλ. σχήμα 3.3).



---

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

---

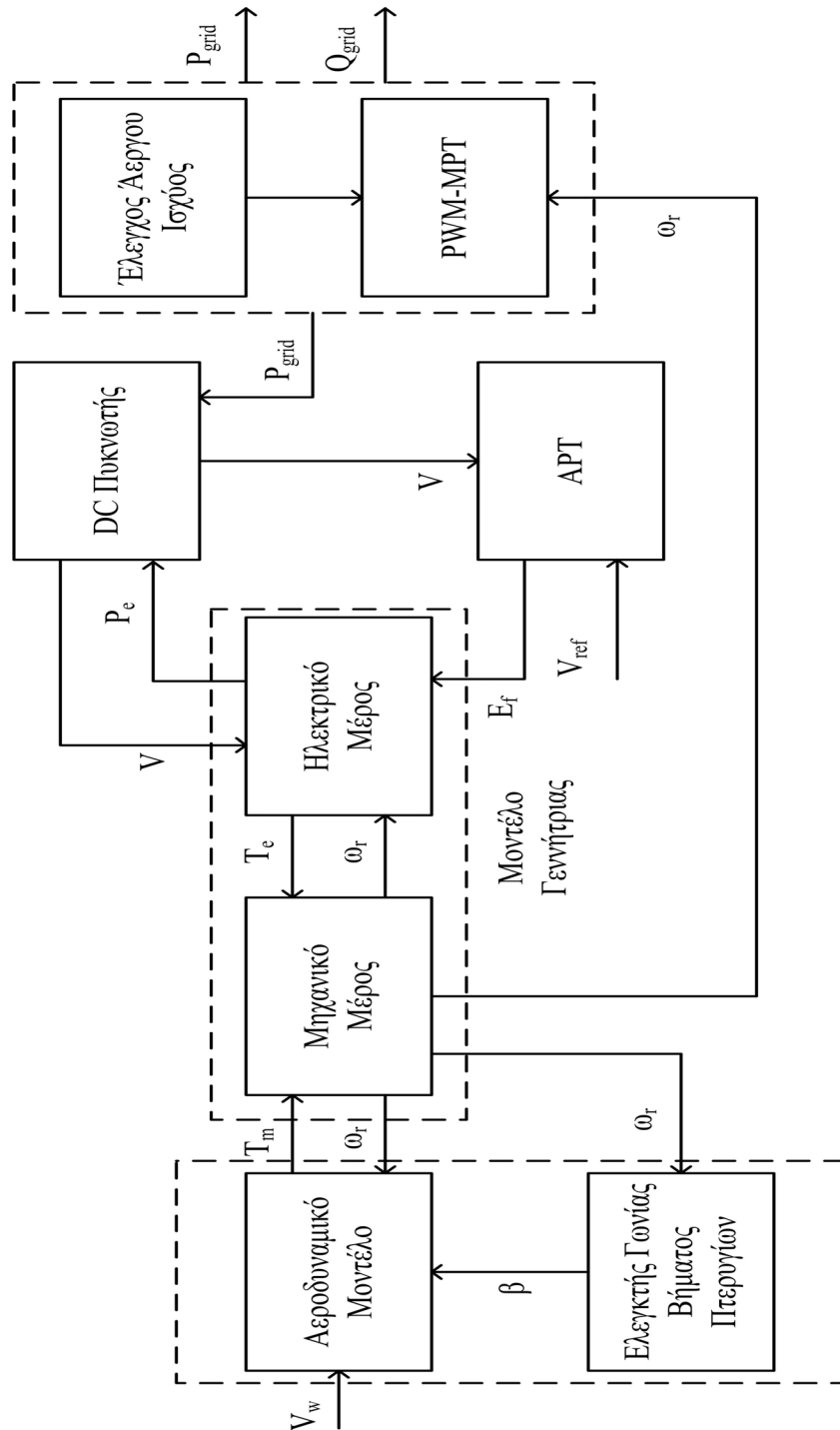
# ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ Α/Γ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ SIMULINK

### 4.1 Γενικά

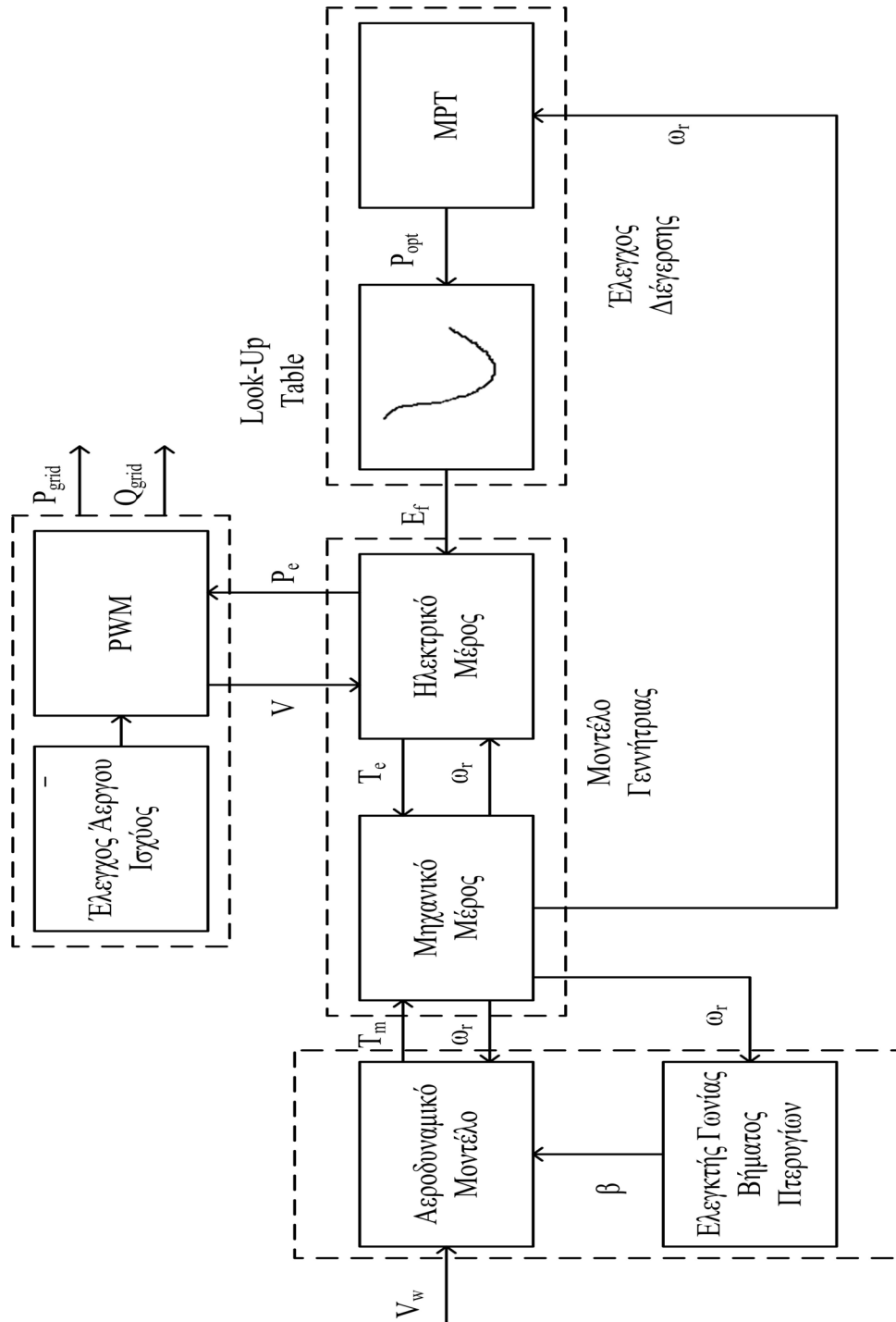
Όπως αναφέραμε στην παράγραφο 3.5, στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν δύο στρατηγικές ελέγχου των μοντέλων της Α/Γ. Πιο συγκεκριμένα στον πρώτο τρόπο ελέγχου, το σύστημα διέγερσης της γεννήτριας χρησιμοποιείται για να ελέγχει την τάση στα άκρα της μέσω ενός αυτόματου ρυθμιστή τάσης (AVR), ενώ ο PWM αντιστροφέας υλοποιεί την στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος (MPT strategy). Στο δεύτερο τρόπο ελέγχου, το σύστημα διέγερσης της γεννήτριας υλοποιεί την στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος ενώ ο PWM αντιστροφέας χρησιμοποιείται για να κρατάει σταθερή την τάση εισόδου του ελέγχοντας την ενεργό ισχύ που μεταφέρεται από την DC πλευρά προς το δίκτυο. Επίσης, εξετάστηκε μια παραλλαγή της πρώτης στρατηγικής ελέγχου, κατά την οποία η διέγερση της γεννήτριας δεν μπορεί να αυξηθεί πάνω από ένα όριο. Στην περίπτωση αυτή, χρησιμοποιείται ένας DC/DC μετατροπέας ανύψωσης για τον έλεγχο της τάσης εισόδου του PWM αντιστροφέα.

Η βασική δομή των προαναφερθέντων μοντέλων φαίνεται σε μορφή διαγραμμάτων βαθμίδων στα σχήματα 4.1, 4.2 και 4.3.

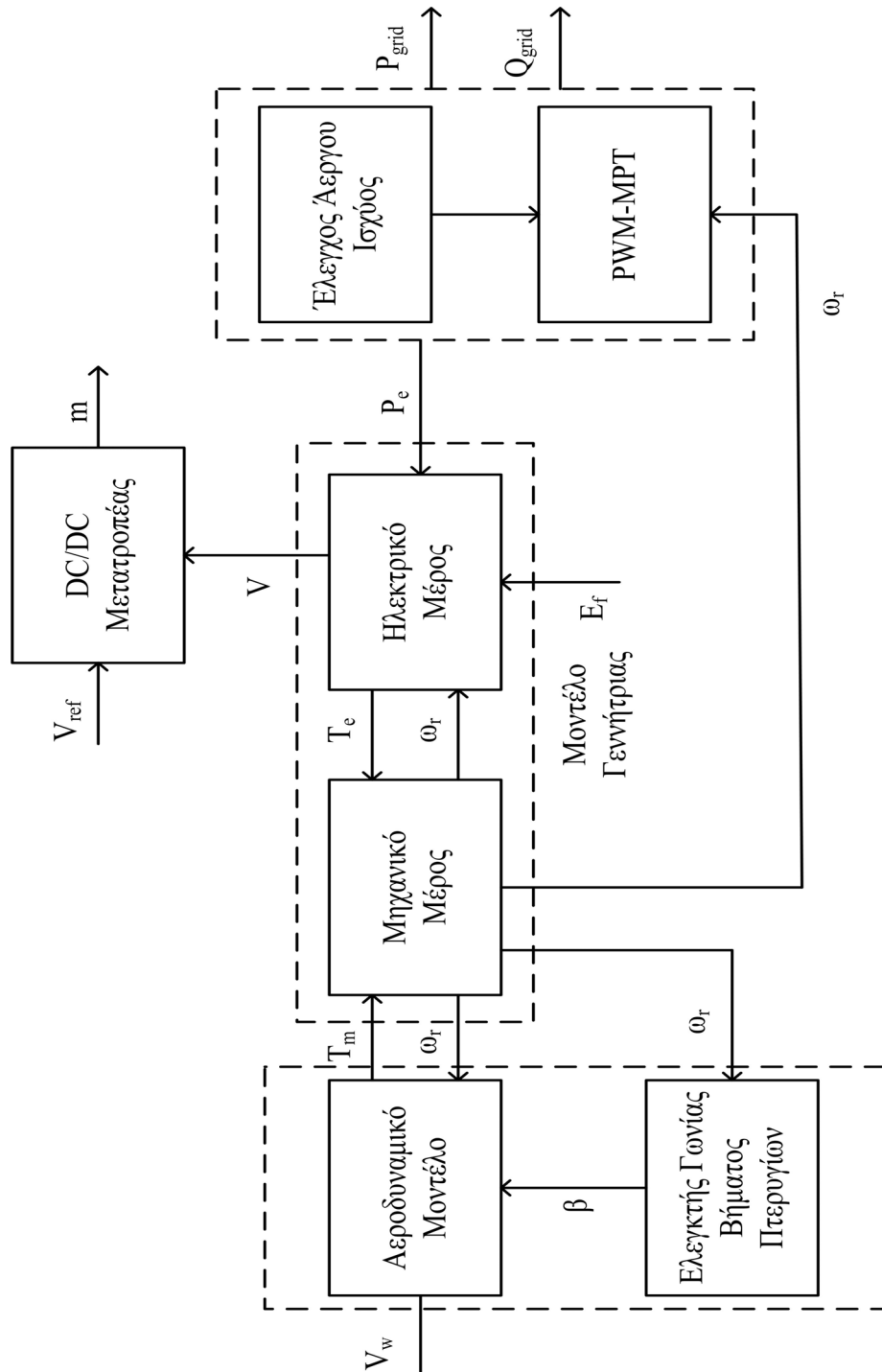
Στη συνέχεια, αφού περιγραφούν η υλοποίηση του αεροδυναμικού μοντέλου του ανεμοκινήτηρα (συμπεριλαμβανομένου και του ελεγκτή γωνίας βήματος) και του μοντέλου της γεννήτριας, θα περιγραφεί λεπτομερέστερα η υλοποίηση των επιμέρους υποσυστημάτων των προαναφερθέντων μεθόδων ελέγχου.



Σχήμα 4.1: Μπλοκ διάγραμμα μοντέλου Α/Γ με Α.Ρ.Τ.



Σχήμα 4.2: Μπλοκ διάγραμμα μοντέλου Α/Γ με ρύθμιση ισχύος μέσω της διέγερσης



Σχήμα 4.3: Μπλοκ διάγραμμα Α/Γ με σταθερή διέγερση και λειτουργία DC/DC μετατροπέα ανύψωσης

## 4.2 Αεροδυναμικό Μοντέλο Ανεμοκινητήρα και Μοντέλο Γεννήτριας

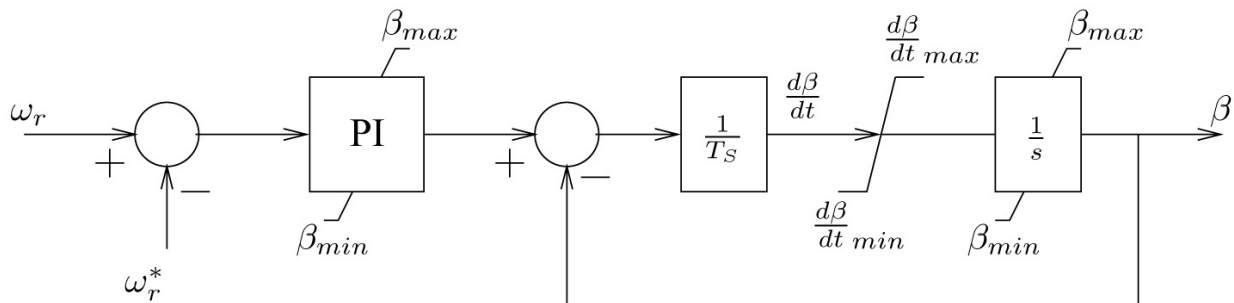
### 4.2.1 Αεροδυναμικό Μοντέλο και Ελεγκτής Γωνίας Βήματος

Το αεροδυναμικό μοντέλο του δρομέα έχει ως είσοδο την ταχύτητα του ανέμου  $V_w$  και την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της Α/Γ,  $\omega_r$ . Έξοδος του είναι η αεροδυναμική μηχανική ροπή,  $T_m$ . Η βασική σχέση που περιγράφει το αεροδυναμικό μοντέλο είναι η σχέση 4.1.

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A V_w^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (4.1)$$

Στο αεροδυναμικό μοντέλο περιλαμβάνεται και το σύστημα ελέγχου της γωνίας βήματος των πτερυγίων της Α/Γ (pitch control). Για τη μοντελοποίηση του χρησιμοποιείται ένας αναλογικός - ολοκληρωτικός ρυθμιστής (PI), ο οποίος κρατά την ταχύτητα του δρομέα στην ονομαστική της τιμή. Λαμβάνεται υπόψη ο περιορισμένος ρυθμός με τον οποίο μπορεί να μεταβάλλεται η γωνία βήματος ( $5 \text{ deg/sec}$ ) καθώς και η χρονική σταθερά του σερβομηχανισμού ( $T_s = 0.5 \text{ sec}$ ).

Ο ρυθμιστής γωνίας βήματος φαίνεται στο σχήμα 4.4 [18, 19].



Σχήμα 4.4: Ελεγκτής γωνίας βήματος πτερυγίων (pitch controller)

Η επιλογή των παραμέτρων  $K_p$  και  $K_i$  γίνεται μέσω προσομοιώσεων, με στόχο την αποτελεσματικότερη λειτουργία του συστήματος στο κάθε μοντέλο Α/Γ και παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 5.

### 4.2.2 Μοντέλο Γεννήτριας

Το μοντέλο της γεννήτριας αποτελείται από το μηχανικό και το ηλεκτρικό μέρος. Το μηχανικό μέρος μοντελοποιείται με τη γνωστή διαφορική της κίνησης.

$$T_m - T_e = 2H \frac{d(\omega_r)}{dt} \quad (4.2)$$

Το ηλεκτρικό μέρος έχει ως εισόδους την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα  $\omega_r$ , την θερματική τάση  $V_s$  και την Η.Ε.Δ. διέγερσης  $E_f$ . Οι διαφορικές εξισώσεις που το περιγράφουν είναι:

$$v_{fd} = r_{fd} i_{fd} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{fd}}{dt} \quad (4.3)$$

$$v_{kq} = 0 = r_{kq} i_{kq} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{kq}}{dt} \quad (4.4)$$

Οι αλγεβρικές εξισώσεις είναι:

$$V_s \sin \delta + r_s i_d + \frac{\omega_r}{\omega_b} (-X_q i_q + X_{mq} i_{kq}) = 0 \quad (4.5)$$

$$V_s \cos \delta + r_s i_q - \frac{\omega_r}{\omega_b} (-X_d i_d + X_{md} i_{fd}) = 0 \quad (4.6)$$

$$\delta - \tan^{-1} \frac{i_d}{i_q} = 0 \quad (4.7)$$

$$\psi_{fd} - X_{fd} i_{fd} + X_{md} i_d = 0 \quad (4.8)$$

$$\psi_{kq} - X_{kq} i_{kq} + X_{mq} i_q = 0 \quad (4.9)$$

Αλγεβρικές μεταβλητές είναι τα ρεύματα  $i_d, i_q, i_{fd}, i_{kq}$  και η γωνία  $\delta$ . Σε αυτό το σημείο να υπενθυμίσουμε ότι η γωνία  $\delta$  ορίζεται ως η γωνία μεταξύ του διανύσματος της τάσης  $V_s$  και του άξονα  $q$  του πλαισίου αναφοράς του δρομέα, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1. Σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας η τιμή της είναι σταθερή καθώς ταυτίζεται με τη γωνία  $\delta$  μιας σύγχρονης γεννήτριας που τροφοδοτεί ένα ωμικό φορτίο. Μεταβλητές κατάστασης του μοντέλου της γεννήτριας είναι:

- η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα,  $\omega_r$ .
- οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο  $\psi_{fd}$  και  $\psi_{kq}$ .

Η τάση ακροδεκτών της γεννήτριας,  $V_s$ , καθώς και η Η.Ε.Δ. διέγερσης,  $E_f$ , είναι γνωστά μεγέθη καθώς είναι εισοδοί στο μοντέλο της γεννήτριας. Έξοδοι του μοντέλου της γεννήτριας είναι η ηλεκτρομαγνητική ισχύς  $P_e$  και η ηλεκτρομαγνητική ροπή  $T_e$  που δίνονται από τις σχέσεις:

$$P_e = v_d i_d + v_q i_q \quad (4.10)$$

$$T_e = \psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds} \quad (4.11)$$

### 4.3 Μοντέλο Α/Γ με Α.Ρ.Τ. Γεννήτριας

Στη συνέχεια περιγράφονται με λεπτομέρεια τα υποσυστήματα που αποτελούν το μοντέλο αυτό της Α/Γ, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο αυτά συνδέονται.

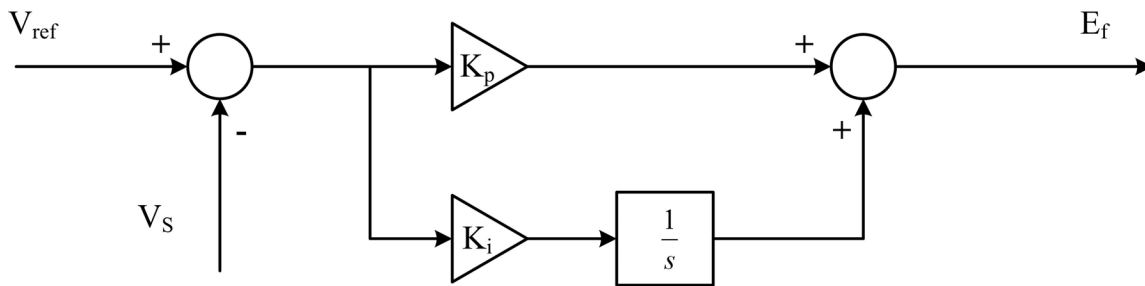
#### 4.3.1 Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσης

Η υλοποίηση του Α.Ρ.Τ. για τον έλεγχο της τάσης ακροδεκτών της γεννήτριας  $V_s$  άρα και της τάσης  $V_c$  του πυκνωτή έγινε με έναν αναλογικό-ολοκληρωτικό ελεγκτή (PI) τα κέρδη του οποίου επιλέχθηκαν:

$$K_p = 100$$

$$K_i = 10$$

Το μπλοκ διάγραμμα του Α.Ρ.Τ. φαίνεται στο σχήμα 4.5, όπου  $V_{ref}$  είναι η επιθυμητή τιμή της DC τάσης του πυκνωτή με τιμή  $V_{ref} = 1$  α.μ.



Σχήμα 4.5: Μπλοκ διάγραμμα Α.Ρ.Τ.

Όπως προαναφέραμε, η τάση ακροδεκτών της γεννήτριας  $V_s$  άρα και η DC τάση του πυκνωτή αποτελεί είσοδο του συστήματος. Για τη μοντελοποίηση του PI ελεγκτή του Α.Ρ.Τ. περιλαμβάνεται στο συνολικό μοντέλο η δυναμική του πυκνωτή παρά το γεγονός ότι είναι πολύ γρήγορη για την κλίμακα του χρόνου που μελετάμε. Η διαφορική του πυκνωτή είναι:

$$C \frac{dV_c}{dt} = \frac{P_e - P_{grid}}{V_c} \quad (4.12)$$

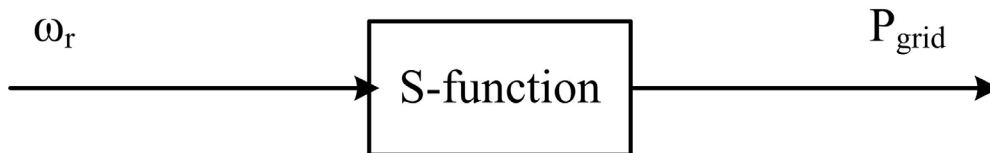
όπου  $C = 0.01sec$  στο α.μ. σύστημα ή  $53 mF$  για την γεννήτρια 2 MW με 1000 V DC τάση.

Η ύπαρξη αφενός της διαφορικής του πυκνωτή και αφετέρου του PI ελεγκτή του Α.Ρ.Τ. εισάγουν στο συνολικό μοντέλο της Α/Γ δύο επιπλέον μεταβλητές κατάστασης που είναι:

- η τάση του πυκνωτή,  $V_c$
- η μεταβλητή  $E_{fx}$ , που είναι η έξοδος του ολοκληρωτή του PI ελεγκτή του Α.Ρ.Τ.

### 4.3.2 Έλεγχος του PWM Αντιστροφέα

Όσον αφορά στον αντιστροφέα PWM, που είναι από την πλευρά του δικτύου, αυτός εγγχεί ενεργό ισχύ στο δίκτυο, ακολουθώντας την στρατηγική Μέγιστης Απολαβής Ισχύος (βλ. σχήμα 3.3). Για την μοντελοποίηση του ελέγχου αυτού χρησιμοποιείται το μπλοκ διάγραμμα του σχήματος 4.6, όπου η S-function προσομοιώνει την καμπύλη Μέγιστης Απολαβής Ισχύος.

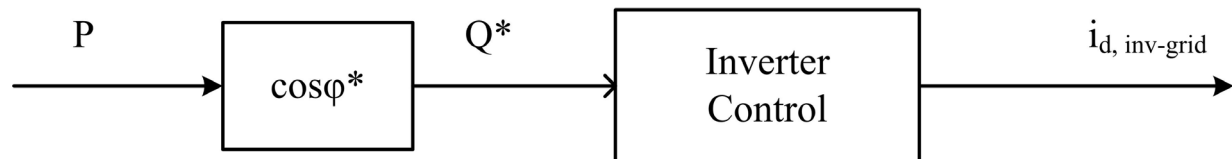


Σχήμα 4.6: Μπλοκ διάγραμμα μοντελοποίησης της στρατηγικής Μέγιστης Απολαβής Ισχύος

Επίσης ο PWM αντιστροφέας ελέγχει την ανταλλαγή αέργου ισχύος με το δίκτυο με δύο τρόπους:

- είτε κρατώντας τον συντελεστή ισχύος από την πλευρά του δικτύου στην επιθυμητή τιμή (συνήθως μοναδιαίος)
- είτε ελέγχοντας την τάση στον ζυγό σύνδεσης της ανεμογεννήτριας μεταβάλλοντας την αέργο ισχύ που παρέχει στο δίκτυο.

Η μοντελοποίηση των ρυθμιστών για τις δύο παραπάνω περιπτώσεις φαίνονται στα σχήματα 4.7 και 4.8.

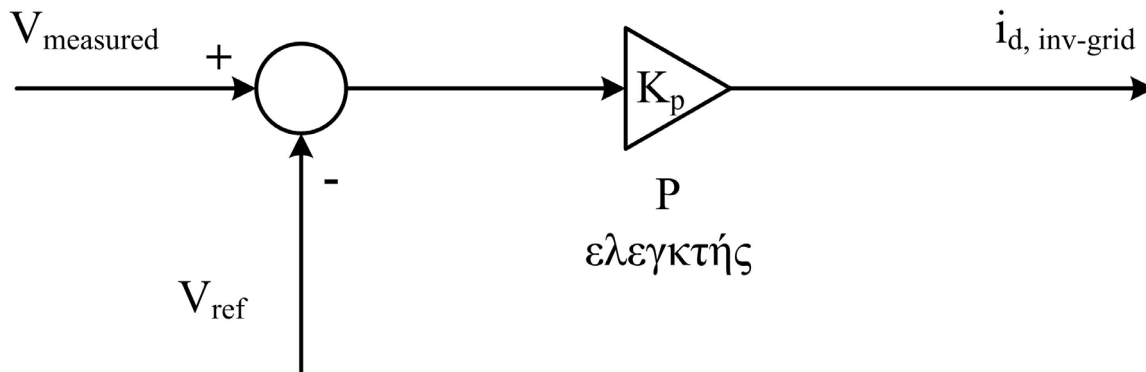


Σχήμα 4.7: Ελεγκτής συντελεστή ισχύος

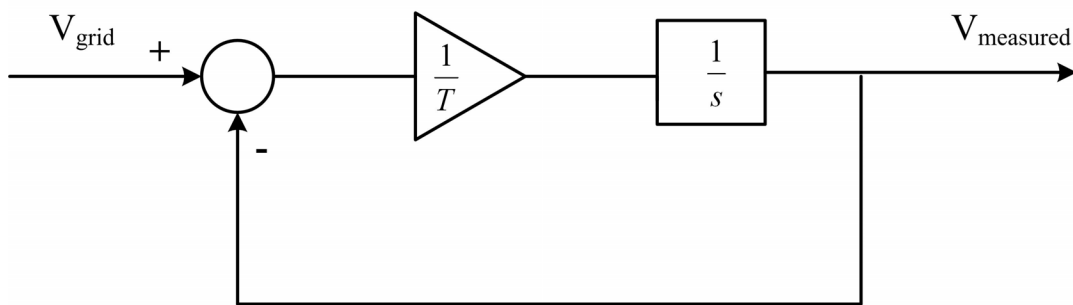
Το σήμα της μετρούμενης τιμής της τάσης προκύπτει ως έξοδος ενός μπλοκ καθυστέρησης ( $T=0.1 \text{ sec}$ ) που έχει ως είσοδο το μέτρο της τάσης του δικτύου, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.9.

Όσον αφορά στη δεύτερη περίπτωση ελέγχου (δηλαδή τον έλεγχο της τάσης), πρέπει να επισημάνουμε ότι χρησιμοποιήσαμε αναλογικό ελεγκτή (P) και όχι αναλογικό-ολοκληρωτικό (PI) διότι στην περίπτωση που δύο ή περισσότερα αιολικά πάρκα ελέγχουν την τάση του ίδιου ζυγού και αποτελούνται από Α/Γ που διαθέτουν PI ελεγκτή θα ελέγχεται ταυτόχρονα





Σχήμα 4.8: Ελεγκτής τερματικής τάσης



Σχήμα 4.9: Μπλοκ διάγραμμα της καθυστέρησης της μετρούμενης τάσης

το ίδιο μέγεθος (τάση δικτύου) από περισσότερους από έναν PI ελεγκτές κάτι που μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα αστάθειας.

### 4.3.3 Αρχικοποίηση Μοντέλου

Σε ένα μοντέλο, τα μεγέθη που πρέπει να αρχικοποιηθούν είναι οι μεταβλητές κατάστασης του συστήματος, έτσι ώστε οι αρχικές τους τιμές να τοποθετηθούν ως αρχικές συνθήκες στους ολοκληρωτές του μοντέλου.

Στο συγκεκριμένο μοντέλο μεταβλητές κατάστασης είναι :

- η ταχύτητα του δρομέα,  $\omega_r$ .
- οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο του τυλίγματος διέγερσης και του τυλίγματος απόσβεσης,  $\psi_{fd}$  και  $\psi_{kq}$ .
- η τάση του πυκνωτή,  $V_c$ .
- η μεταβλητή  $E_{fx}$ , που είναι η έξοδος του ολοκληρωτή του PI ελεγκτή του Α.Ρ.Τ.

Για την απλοποίηση της αρχικοποίησης χρησιμοποιήσαμε τη μεταβλητή  $\delta$  που φαίνεται στο σχήμα 3.1.

Αν θεωρήσουμε ότι η τερματική τάση  $V_s$  βρίσκεται επί του άξονα  $x$  ενός σύγχρονου πλαισίου αναφοράς  $xy$  και έχει ονομαστική τιμή  $V_s = 1$ , τότε ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$V_s = v_x \quad (4.13)$$

$$v_y = 0 \quad (4.14)$$

$$Q = v_y i_x - v_x i_y = 0 \rightarrow v_x i_y = 0 \rightarrow i_y = 0 \quad (4.15)$$

$$P = v_x i_x + v_y i_y = v_x i_x \rightarrow i_x = \frac{P}{v_x} = \frac{P}{V_s} \quad (4.16)$$

Επίσης ισχύει ότι:

$$v_d = v_x \sin \delta \quad (4.17)$$

$$v_q = v_x \cos \delta \quad (4.18)$$

$$i_d = i_x \sin \delta \quad (4.19)$$

$$i_q = i_x \cos \delta \quad (4.20)$$

Έτσι ξεκινώντας από τη σχέση 3.1 έχουμε:

$$v_d = -r_s i_d + \frac{\omega_r}{\omega_b} X_q i_q \rightarrow v_x \sin \delta = -r_s i_x \sin \delta + \frac{\omega_r}{\omega_b} X_q i_x \cos \delta \rightarrow \tan \delta = \frac{\omega_r}{\omega_b} \frac{X_q i_x}{v_x + r_s i_x} \rightarrow$$

$$\delta = \tan^{-1} \left( \frac{\omega_r}{\omega_b} \frac{X_q \frac{P}{V_s}}{V_s + r_s \frac{P}{V_s}} \right) \quad (4.21)$$

Επίσης από τη σχέση 3.2 έχουμε :

$$v_q = -r_s i_q + \frac{\omega_r}{\omega_b} (-X_d i_d + E_f) \rightarrow E_f = \frac{\omega_b}{\omega_r} (v_q + r_s i_q) + X_d i_d \quad (4.22)$$

Γνωρίζοντας τώρα τη γωνία  $\delta$  η μεθοδολογία της αρχικοποίησης είναι η εξής :

1. Αμελώντας τις απώλειες του στάτη της σύγχρονης γεννήτριας και με δεδομένη ενεργό ισχύ  $P$ , υπολογίζουμε την ταχύτητα του δρομέα  $\omega_r$ , από την καμπύλη 3.3.

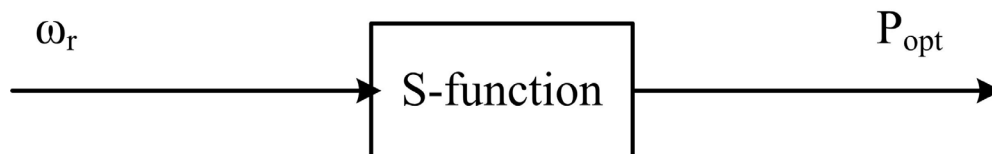
2. Υπολογίζουμε τη γωνία  $\delta$  από τη σχέση 4.21 καθώς και τις τάσεις και τα ρεύματα της γεννήτριας,  $v_d, v_q, i_d$  και  $i_q$  από τις σχέσεις 4.17 4.18 4.19 και 4.20.
3. Υπολογίζουμε την τάση διέγερσης από τη σχέση 4.22.
4. Υπολογίζουμε τις πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο από τις σχέσεις 2.52 2.53 2.54 και 2.55.

## 4.4 Μοντέλο Α/Γ με Ρύθμιση Ισχύος Μέσω της Διέγερσης

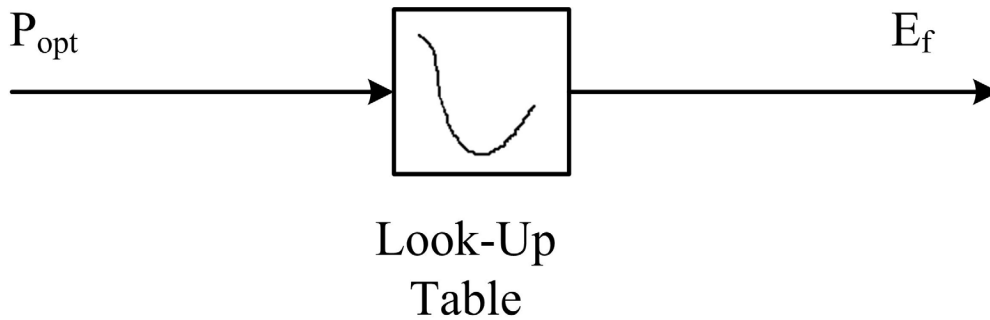
Στη συνέχεια αναλύεται η μοντελοποίηση των υποσυστημάτων του συγκεκριμένου μοντέλου Α/Γ. Το αεροδυναμικό μέρος καθώς και το μοντέλο της γεννήτριας είναι ίδια με αυτά των παραγράφων 4.2.1 και 4.2.2 και δεν επαναλαμβάνονται.

### 4.4.1 Έλεγχος Διέγερσης - Μέγιστη Απολαβή Ισχύος

Η διαφορά σε αυτό το μοντέλο της Α/Γ, είναι ότι το σύστημα διέγερσης της γεννήτριας χρησιμοποιείται για να υλοποιεί την στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος (MPT strategy) και η τάση διέγερσης έρχεται ως είσοδος στο μοντέλο της γεννήτριας από έναν πίνακα αναφοράς (Look-up Table). Πιο συγκεκριμένα έχοντας δεδομένη την ταχύτητα του δρομέα, υπολογίζουμε την βέλτιστη ενεργό ισχύ που πρέπει να παράγει η γεννήτρια. Στη συνέχεια με βάση την καμπύλη 3.9 υπολογίζεται ποιά πρέπει να είναι η κατάλληλη διέγερση για την δεδομένη ενεργό ισχύ. Ο τρόπος αυτός ελέγχου φαίνεται στα μπλοκ διαγράμματα των σχημάτων 4.10 και 4.11.



Σχήμα 4.10: Μπλοκ διάγραμμα μοντελοποίησης της στρατηγικής Μέγιστης Απολαβής Ισχύος



Σχήμα 4.11: Μπλοκ διάγραμμα εύρεσης βέλτιστης τιμής διέγερσης

#### 4.4.2 Έλεγχος του PWM Αντιστροφέα

Ο PWM αντιστροφέας σε αυτή την περίπτωση κρατάει σταθερή την τάση εισόδου του ελέγχοντας την ενεργό ισχύ που μεταφέρεται από την DC πλευρά προς το δίκτυο. Επειδή λειτουργεί σε πολύ υψηλές συχνότητες (10-20 kHz), η δυναμική του πυκνωτή μπορεί να θεωρηθεί ακαριαία [20]. Έτσι ο PWM αντιστροφέας μοντελοποιείται με τις δύο απλούστατες σχέσεις :

$$V_c = 1$$

$$P_{grid} = P_e$$

Η τάση  $V_c = V_s = 1$  είναι και σε αυτήν την περίπτωση είσοδος του μοντέλου της γεννήτριας.

Επίσης ο PWM αντιστροφέας ελέγχει την ανταλλαγή αέργου ισχύος με το δίκτυο όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 4.3.2.

#### 4.4.3 Αρχικοποίηση Μοντέλου

Η αρχικοποίηση σε αυτήν την περίπτωση είναι η ίδια με αυτήν του προηγούμενου μοντέλου που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.3.3. Η διαφορά είναι ότι μεταβλητές κατάστασης σε αυτό το μοντέλο είναι:

- η ταχύτητα του δρομέα,  $\omega_r$ .
- οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο του τυλίγματος διέγερσης και του τυλίγματος απόσβεσης,  $\psi_{fd}$  και  $\psi_{kq}$ .

## 4.5 Λειτουργία DC/DC Μετατροπέα Ανύψωσης σε Περίπτωση Σταθερής Διέγερσης

Το μοντέλο αυτό αποτελεί παραλλαγή του μοντέλου που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.3. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι τώρα η τιμή της διέγερσης περιορίζεται στην τιμή  $E_f^{max} = 1.7$  α.μ. Στη συνέχεια περιγράφουμε τη μοντελοποίηση των υποσυστημάτων του συγκεκριμένου μοντέλου. Η περιγραφή του αεροδυναμικού μέρους παραλείπεται καθώς ταυτίζεται με αυτή της παραγράφου 4.2.1.

### 4.5.1 Παραλλαγή Μοντέλου Γεννήτριας

Επειδή η τιμή της διέγερσης είναι σταθερή η υλοποίηση του μοντέλου της γεννήτριας είναι διαφορετική από αυτή της παραγράφου 4.2.2. Πιο συγκεκριμένα σε αυτή την περίπτωση το μοντέλο της γεννήτριας έχει ως εισόδους την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα  $\omega_r$ , την ηλεκτρομαγνητική ισχύ  $P_e$  και την τάση διέγερσης  $E_f$  ως δεδομένη σταθερά, ενώ η τερματική τάση  $V_s$  είναι πλέον έξοδος. Οι διαφορικές εξισώσεις που το περιγράφουν παραμένουν ίδιες με αυτές της παραγράφου 4.2.2 (4.3 και 4.4):

$$v_{fd} = r_{fd}i_{fd} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{fd}}{dt} \quad (4.23)$$

$$v_{kq} = 0 = r_{kq}i_{kq} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{kq}}{dt} \quad (4.24)$$

Οι αλγεβρικές εξισώσεις είναι:

$$v_d + r_s i_d + \frac{\omega_r}{\omega_b} (-X_q i_q + X_{mq} i_{kq}) = 0 \quad (4.25)$$

$$v_q + r_s i_q - \frac{\omega_r}{\omega_b} (-X_d i_d + X_{md} i_{fd}) = 0 \quad (4.26)$$

$$P_e - v_d i_d - v_q i_q = 0 \quad (4.27)$$

$$Q_e = 0 = v_q i_d - v_d i_q \quad (4.28)$$

$$\psi_{fd} - X_{fd} i_{fd} + X_{md} i_d = 0 \quad (4.29)$$

$$\psi_{kq} - X_{kq} i_{kq} + X_{mq} i_q = 0 \quad (4.30)$$

Οι αλγεβρικές μεταβλητές είναι οι τάσεις  $v_d, v_q$  και τα ρεύματα  $i_d, i_q, i_{fd}, i_{kq}$ . Μεταβλητές κατάστασης είναι:

- η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα  $\omega_r$ .
- οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο  $\psi_{fd}$  και  $\psi_{kq}$ .

Η ηλεκτρομαγνητική ισχύς,  $P_e$ , καθώς και η Η.Ε.Δ. διέγερσης,  $E_f$ , είναι γνωστά μεγέθη καθώς είναι είσοδοι στο μοντέλο της γεννήτριας. Έξοδοι του μοντέλου της γεννήτριας είναι η τερματική τάση  $V_s$  και η ηλεκτρομαγνητική ροπή  $T_e$  που δίνονται από αντίστοιχα τις σχέσεις:

$$V_s = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} \quad (4.31)$$

$$T_e = \psi_{ds}i_{qs} - \psi_{qs}i_{ds} \quad (4.32)$$

### 4.5.2 DC/DC Μετατροπέας Ανύψωσης

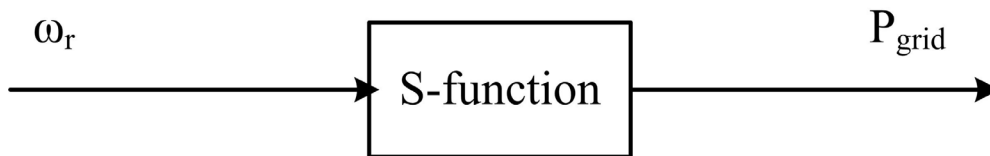
Ο DC/DC μετατροπέας ανύψωσης έχει ως έξοδο το λόγο διαμόρφωσης  $m$  και μοντελοποιείται με την αναλογική σχέση:

$$V_{c,ref} = mV_s \quad (4.33)$$

όπου  $V_{c,ref}$  η επιθυμητή τάση του πυκνωτή με τιμή  $V_{c,ref} = 1$  α.μ.

### 4.5.3 Έλεγχος του PWM Αντιστροφέα

Όσον αφορά στον αντιστροφέα PWM, που είναι από την πλευρά του δικτύου, αυτός εγγχεί ενεργό ισχύ στο δίκτυο, ακολουθώντας την στρατηγική Μέγιστης Απολαβής Ισχύος (βλ. σχήμα 3.3). Για την μοντελοποίηση του ελέγχου αυτού χρησιμοποιείται το μπλοκ διάγραμμα του σχήματος 4.12, όπου η S-function προσομοιώνει την καμπύλη Μέγιστης Απολαβής Ισχύος.



Σχήμα 4.12: Μπλοκ διάγραμμα μοντελοποίησης της στρατηγικής Μέγιστης Απολαβής Ισχύος

Επίσης ο PWM αντιστροφέας ελέγχει την ανταλλαγή αέργου ισχύος με το δίκτυο όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 4.3.2.

#### 4.5.4 Αρχικοποίηση Μοντέλου

Η αρχικοποίηση σε αυτήν την περίπτωση είναι διαφορετική από αυτή που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.3.3 και αυτό γιατί στην συγκεκριμένη περίπτωση η τάση στους ακροδέκτες της γεννήτριας δεν είναι πια δεδομένη.

Στο συγκεκριμένο μοντέλο για χαμηλή ενεργό ισχύ ( $P < 0.178$  α.μ) η διέγερση είναι σταθερή και περιορισμένη στην μέγιστη τιμή της  $E_f^{max} = 1.7$  α.μ. Μεταβλητές κατάστασης πλέον είναι :

- η ταχύτητα του δρομέα,  $\omega_r$ .
- οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο του τυλίγματος διέγερσης και του τυλίγματος απόσβεσης,  $\psi_{fd}$  και  $\psi_{kq}$ .

Επομένως η διαδικασία αρχικοποίησης περιλαμβάνει τα εξής βήματα :

1. Αμελώντας τις απώλειες του στάτη της σύγχρονης γεννήτριας και με δεδομένη ενεργό ισχύ  $P$ , υπολογίζουμε την ταχύτητα του δρομέα  $\omega_r$ , από την καμπύλη 3.3.
2. Υπολογίζουμε τις άγνωστες τιμές της τάσης και των ρευμάτων της γεννήτριας,  $v_d, v_q, i_d$  και  $i_q$  από το παρακάτω σύστημα εξισώσεων :

$$v_d = -r_s i_d + \frac{\omega_r}{\omega_b} X_q i_q \quad (4.34)$$

$$v_q = -r_s i_q + \frac{\omega_r}{\omega_b} (-X_d i_d + E_f) \quad (4.35)$$

$$P = v_d i_d + v_q i_q \quad (4.36)$$

$$Q = 0 = v_q i_d - v_d i_q \quad (4.37)$$

Σε αυτό το σημείο να τονίσουμε ότι επειδή το σύστημα είναι μη γραμμικό λύθηκε με τη βοήθεια της συνάρτησης fsolve της MATLAB.

3. Υπολογίζουμε τις πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο από τις σχέσεις 2.52 2.53 2.54 και 2.55.

---

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

---

### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

#### 5.1 Απόκριση Μοντέλου A/Γ με A.P.T Γεννήτριας

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις του μοντέλου της A/Γ που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.3. Πιο συγκεκριμένα εξετάζουμε την απόκριση του συστήματος σε μικρές μεταβολές του ανέμου και για δύο αρχικά σημεία λειτουργίας, για χαμηλό (30% του ονομαστικού) και μέσο (70% του ονομαστικού) φορτίο. Στην συνέχεια υπολογίζονται και σχολιάζονται οι ιδιοτιμές και τα ιδιοδιανύσματα για διάφορα σημεία λειτουργίας. Επίσης επιλέγουμε μέσω προσομοιώσεων τις παραμέτρους  $K_p$  και  $K_i$  του PI ελεγκτή του ρυθμιστή της γωνίας βήματος πτερυγίων (pitch control) και τέλος παρουσιάζεται η απόκριση του συγκεκριμένου μοντέλου της A/Γ σε χρονοσειρά ανέμου.

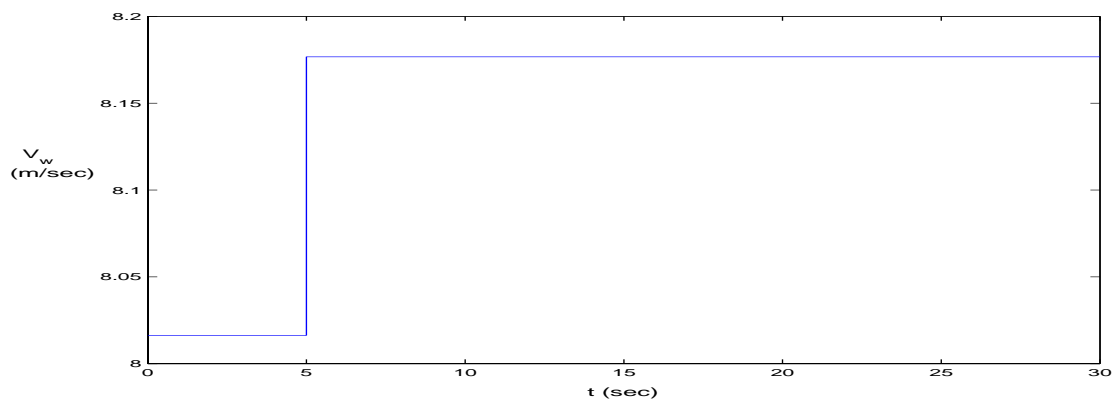
##### 5.1.1 Απόκριση Μοντέλου A/Γ για Χαμηλό Φορτίο (P=0.3 α.μ.)

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.3.3 αρχικοποιούμε το μοντέλο της A/Γ για ισχύ P=0.3 α.μ. Τα αποτελέσματα της αρχικοποίησης φαίνονται στον πίνακα 5.1. Στη συνέχεια επιβάλλουμε στον άνεμο βηματική αύξηση κατά 2% της αρχικής του τιμής που βρέθηκε από την αρχικοποίηση (σχήμα 5.1). Η απόκριση διαφόρων μεγεθών του μοντέλου φαίνεται στα σχήματα 5.2-5.5. Ειδικότερα στο σχήμα 5.2 φαίνεται η απόκριση της Η.Ε.Δ διέγερσης για την παραπάνω μεταβολή. Στο σχήμα 5.3 φαίνεται η απόκριση της ταχύτητας του δρομέα ενώ στο σχήμα 5.4 φαίνονται η ηλεκτρομαγνητική ισχύς και η ενεργός ισχύς που εγχέεται στο δίκτυο οι οποίες ταυτίζονται. Τέλος στο σχήμα 5.5 φαίνεται η απόκριση της γωνίας  $\delta$  του δρομέα της γεννήτριας.

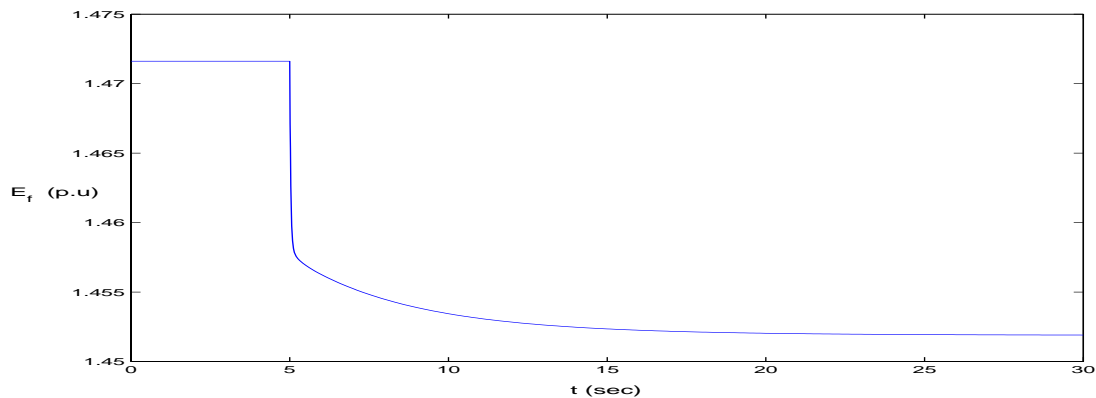


Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα αρχικοποίησης για χαμηλό φορτίο

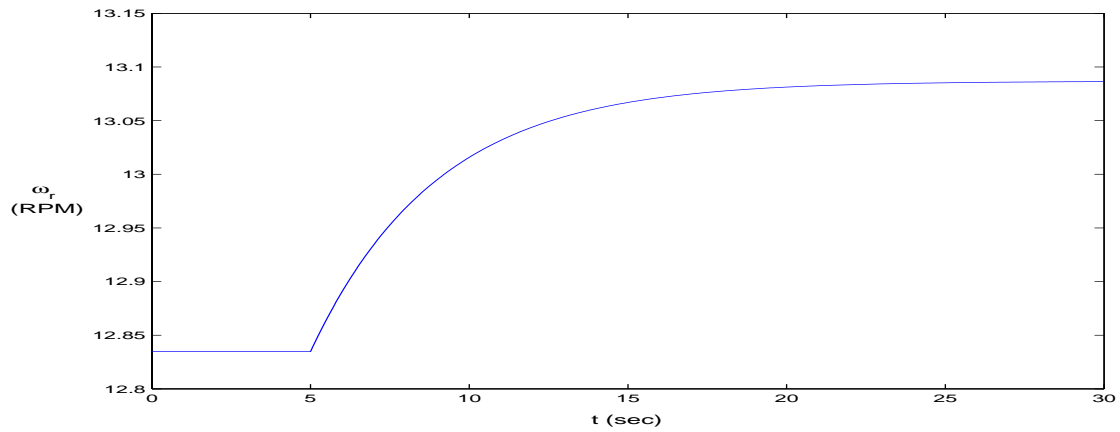
Μέγεθος	Αρχική Τιμή
$V_{w0}$ (m/sec)	8.0164
$\omega_{r0}$ (R.P.M.)	12.834
$E_{f0}$ (α.μ.)	1.4716
$\delta_0$ (rad)	0.1516
$v_{ds0}$ (α.μ.)	0.1510
$v_{qs0}$ (α.μ.)	0.9885
$i_{ds0}$ (α.μ.)	0.0453
$i_{qs0}$ (α.μ.)	0.2966
$\psi_{ds0}$ (α.μ.)	1.4113
$\psi_{qs0}$ (α.μ.)	-0.2156
$\psi_{fd0}$ (α.μ.)	1.5627
$\psi_{kq0}$ (α.μ.)	-0.1797



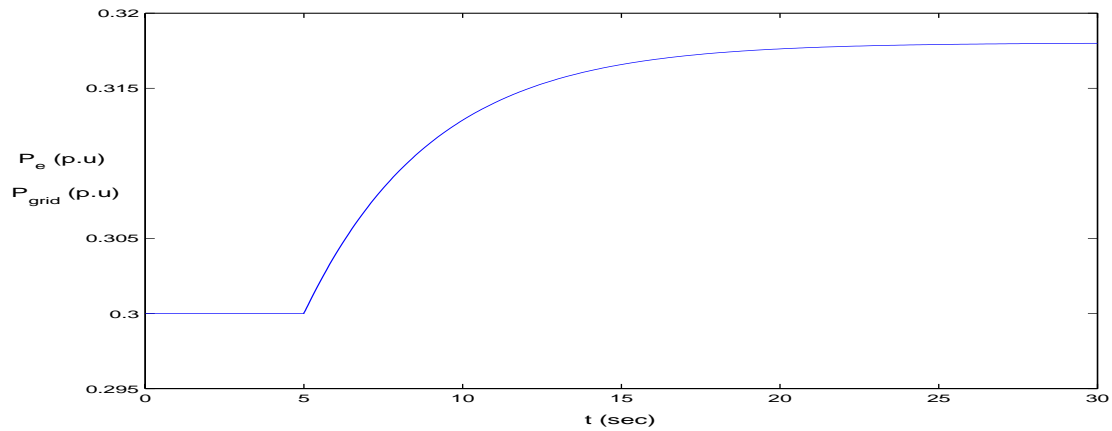
Σχήμα 5.1: Βηματική αύξηση του ανέμου



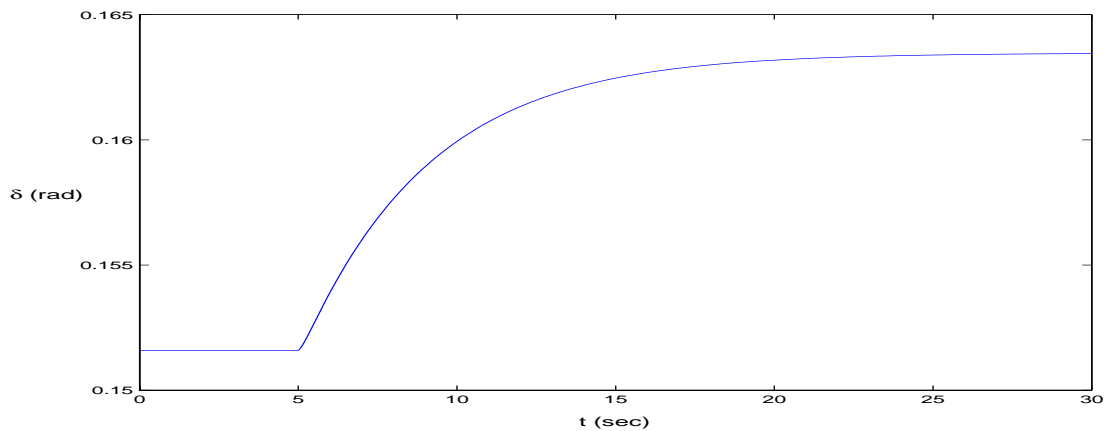
Σχήμα 5.2: Απόκριση της Η.Ε.Δ διέγερσης (χαμηλό φορτίο)



Σχήμα 5.3: Απόκριση της ταχύτητας του δρομέα (χαμηλό φορτίο)



Σχήμα 5.4: Απόκριση της ενεργού ισχύος (χαμηλό φορτίο)



Σχήμα 5.5: Απόκριση της γωνίας δρομέα  $\delta$  (χαμηλό φορτίο)

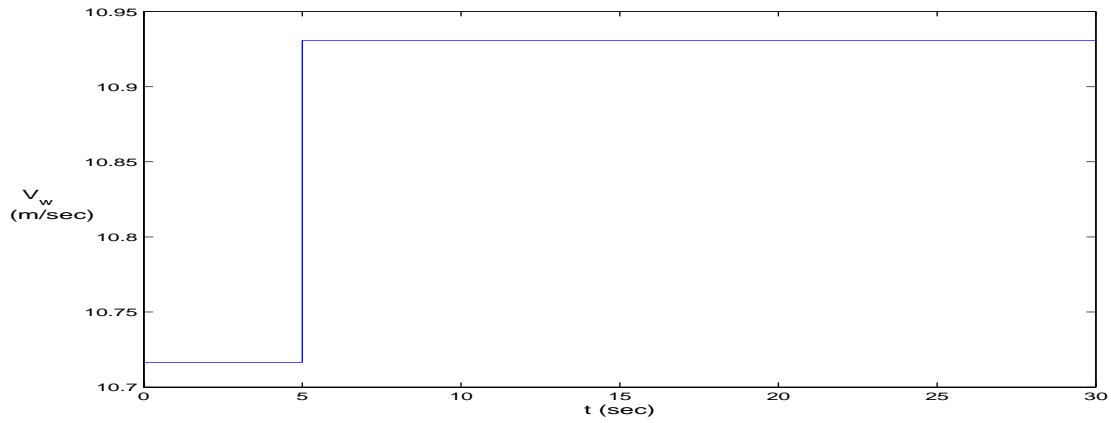
Από τα σχήματα 5.2-5.5 κατ' αρχάς συμπεραίνουμε ότι το σύστημα είναι ευσταθές και ισορροπεί σε μόνιμη κατάσταση μετά από περίπου 15 sec από την επιβολή της βηματικής αύξησης του ανέμου. Πιο συγκεκριμένα στο σχήμα 5.2 παρατηρούμε ότι η τιμή της Η.Ε.Δ. διέγερσης μειώνεται, όπως αναμέναμε, αφού βρισκόμαστε στο αριστερό κομμάτι της καμπύλης του σχήματος 3.9, όπου η κλίση της καμπύλης είναι αρνητική με αποτέλεσμα αύξηση της ισχύος να οδηγεί σε μείωση της Η.Ε.Δ διεγέρσεως. Στο σχήμα 5.3 επαληθεύεται η αύξηση της ταχύτητας της γεννήτριας, αφού έχουμε αύξηση της ισχύος. Επίσης στο σχήμα 5.4 παρατηρούμε ότι η απόκριση της ηλεκτρομαγνητικής ισχύος  $P_e$  και της ισχύος που εγχέεται στο δίκτυο,  $P_{grid}$ , ταυτίζονται απολύτως. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ισχύς του δικτύου ελέγχεται από τον αντιστροφέα PWM, ο οποίος λειτουργεί σε υψηλές συχνότητες, με αποτέλεσμα ο έλεγχος να είναι πολύ γρήγορος. Τέλος στο σχήμα 5.5 φαίνεται η αύξηση της γωνίας  $\delta$  του δρομέα της γεννήτριας.

### 5.1.2 Απόκριση Μοντέλου Α/Γ για Μέσο Φορτίο (P=0.7 α.μ.)

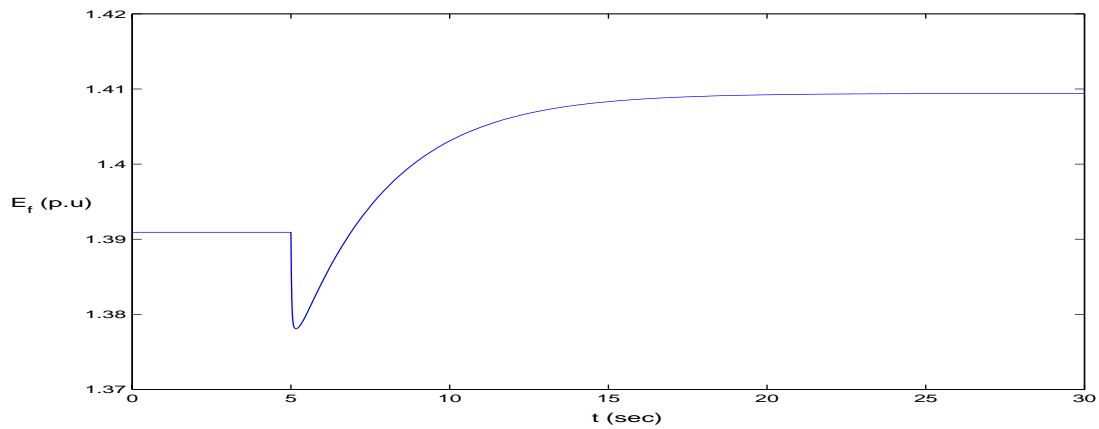
Στη συνέχεια αρχικοποιούμε το μοντέλο της Α/Γ για ισχύ P=0.7 α.μ. Τα αποτελέσματα της αρχικοποίησης φαίνονται στον πίνακα 5.2. Στη συνέχεια επιβάλλουμε πάλι στον άνεμο βηματική αύξηση κατά 2% της αρχικής του τιμής που βρέθηκε από την αρχικοποίηση, (σχήμα 5.6). Οι αποκρίσεις διαφόρων μεγεθών φαίνονται στα σχήματα 5.7-5.10. Ειδικότερα στο σχήμα 5.7 φαίνεται η απόκριση της Η.Ε.Δ διέγερσης για την παραπάνω μεταβολή. Στο σχήμα 5.8 φαίνεται η απόκριση της ταχύτητας του δρομέα ενώ στο σχήμα 5.9 φαίνονται η ηλεκτρομαγνητική ισχύς και η ενεργός ισχύς που εγχέεται στο δίκτυο οι οποίες ταυτίζονται. Τέλος στο σχήμα 5.10 φαίνεται η απόκριση της γωνίας  $\delta$  του δρομέα της γεννήτριας.

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα αρχικοποίησης για μέσο φορτίο

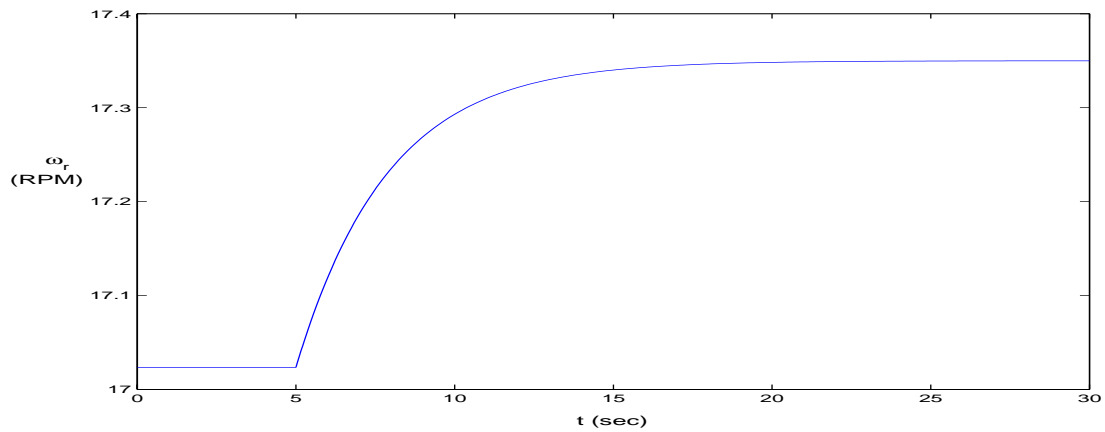
Μέγεθος	Αρχική Τιμή
$V_{w0}$ (m/sec)	10.7165
$\omega_{r0}$ (R.P.M.)	17.0226
$E_{f0}$ (α.μ.)	1.3909
$\delta_0$ (rad)	0.4327
$v_{ds0}$ (α.μ.)	0.4193
$v_{qs0}$ (α.μ.)	0.9078
$i_{ds0}$ (α.μ.)	0.2935
$i_{qs0}$ (α.μ.)	0.6355
$\psi_{ds0}$ (α.μ.)	1.0002
$\psi_{qs0}$ (α.μ.)	-0.4620
$\psi_{fd0}$ (α.μ.)	1.1737
$\psi_{kq0}$ (α.μ.)	-0.3851



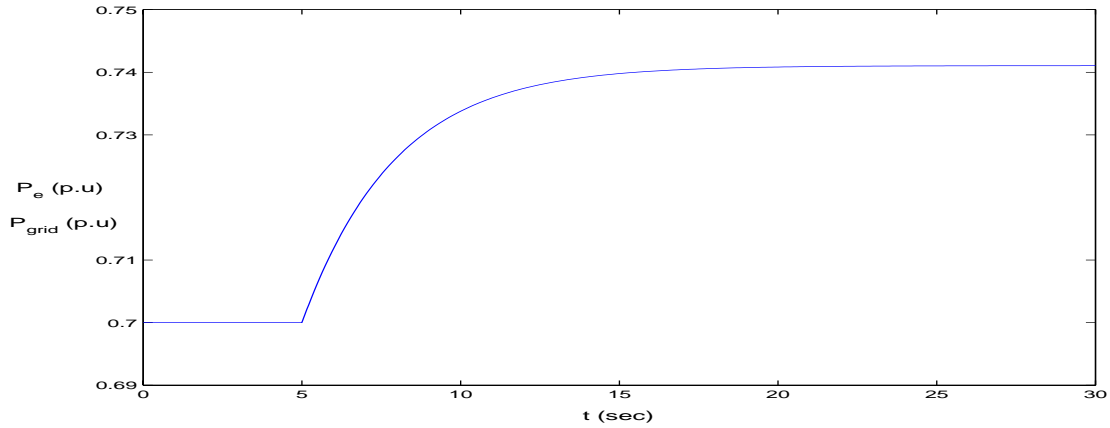
Σχήμα 5.6: Βηματική αύξηση του ανέμου



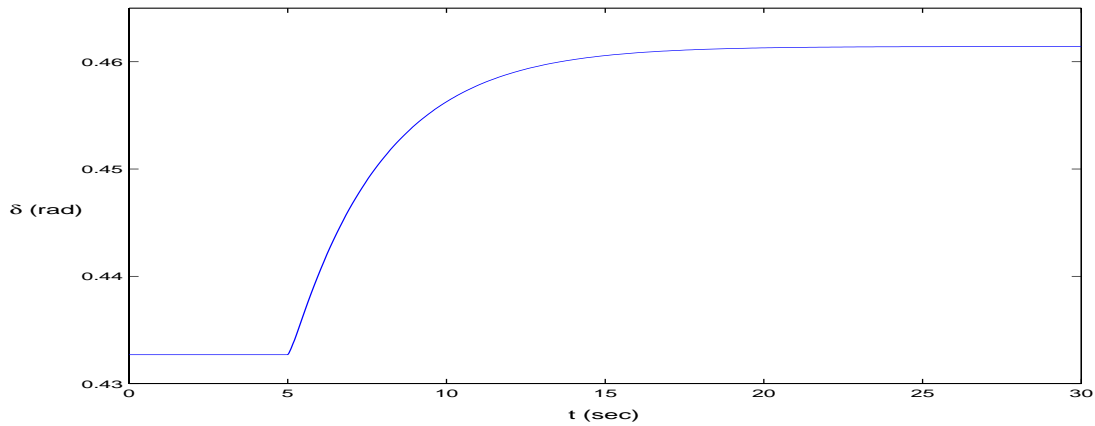
Σχήμα 5.7: Απόκριση της Η.Ε.Δ διέγερσης (μέσο φορτίο)



Σχήμα 5.8: Απόκριση της ταχύτητας του δρομέα (μέσο φορτίο)



Σχήμα 5.9: Απόκριση της ενεργού ισχύος (μέσο φορτίο)



Σχήμα 5.10: Απόκριση της γωνίας δρομέα  $\delta$  (μέσο φορτίο)

Από τις αποκρίσεις στα σχήματα 5.7-5.10 κατ' αρχάς συμπεραίνουμε ότι το σύστημα είναι και σε αυτήν την περίπτωση ευσταθές ενώ ισορροπεί σε μόνιμη κατάσταση μετά από περίπου 12 sec από την επιβολή της βηματικής αύξησης του ανέμου. Όσον αφορά στην απόκριση της Η.Ε.Δ. διέγερσης παρατηρούμε στο σχήμα 5.7 ότι αρχικά μεταβάλλεται προς την αντίθετη κατεύθυνση από την τελική της τιμή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μετά την αύξηση του ανέμου η τάση του πυκνωτή, άρα και της γεννήτριας αυξάνεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο Α.Ρ.Τ. να μειώσει κατ' αρχάς τη διέγερση. Αφού όμως αυτό μεταφράζεται σε μείωση της ισχύος (βλ. σχήμα 3.9) κάτι που είναι άτοπο αφού αυξήθηκε ο άνεμος, τελικά η τιμή της διέγερσης αυξάνεται όπως ήταν αναμενόμενο αφού βρισκόμαστε στο δεξί κομμάτι της καμπύλης του σχήματος 3.9. Στο σχήμα 5.8 επαληθεύεται η αύξηση της ταχύτητας της γεννήτριας, αφού έχουμε αύξηση της ισχύος. Επίσης στο σχήμα 5.9 παρατηρούμε ότι η απόκριση της ηλεκτρομαγνητικής ισχύος  $P_e$  και της ισχύος που εγχέεται στο δίκτυο,  $P_{grid}$ , ταυτίζονται απολύτως, όπως εξηγήσαμε και στην παράγραφο 5.1.1. Τέλος στο σχήμα 5.10

παρατηρούμε αύξηση της γωνίας  $\delta$  της σύγχρονης γεννήτριας.

### 5.1.3 Ευστάθεια Μικρών Διαταραχών

Για τον υπολογισμό των ιδιοτιμών του μοντέλου είναι απαραίτητη, όπως έχουμε προαναφέρει στην παράγραφο 1.6, η γραμμικοποίηση του συστήματος γύρω από ένα σημείο λειτουργίας. Η γραμμικοποίηση γίνεται με τη βοήθεια της εντολής `linmod` της MATLAB. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι ιδιοτιμές καθώς και οι συντελεστές συμμετοχής της κάθε μεταβλητής κατάστασης σε κάθε ιδιοτιμή με τη βοήθεια του αρχείου `modana` που παρατίθεται στο Παράρτημα Α.

Στους πίνακες 5.3, 5.4 και 5.5 και για τρία σημεία λειτουργίας, παρατίθενται οι ιδιοτιμές του Ιακωβιανού πίνακα  $A$ , καθώς και η μεταβλητή κατάστασης που έχει το μεγαλύτερο συντελεστή συμμετοχής.

Πίνακας 5.3: Ιδιοτιμές μοντέλου για ισχύ  $P=0.3$  α.μ.

Ιδιοτιμή	Μεταβλητή Κατάστασης
-1365	$V_c$
-36.7	$\psi_{fd}$
-5.461	$\psi_{kq}$
-0.1	$E_{fx}$
-0.25	$\omega_r$

Πίνακας 5.4: Ιδιοτιμές μοντέλου για ισχύ  $P=0.7$  α.μ.

Ιδιοτιμή	Μεταβλητή Κατάστασης
-894	$V_c$
-51.43	$\psi_{fd}$
-6.096	$\psi_{kq}$
-0.1	$E_{fx}$
-0.3438	$\omega_r$

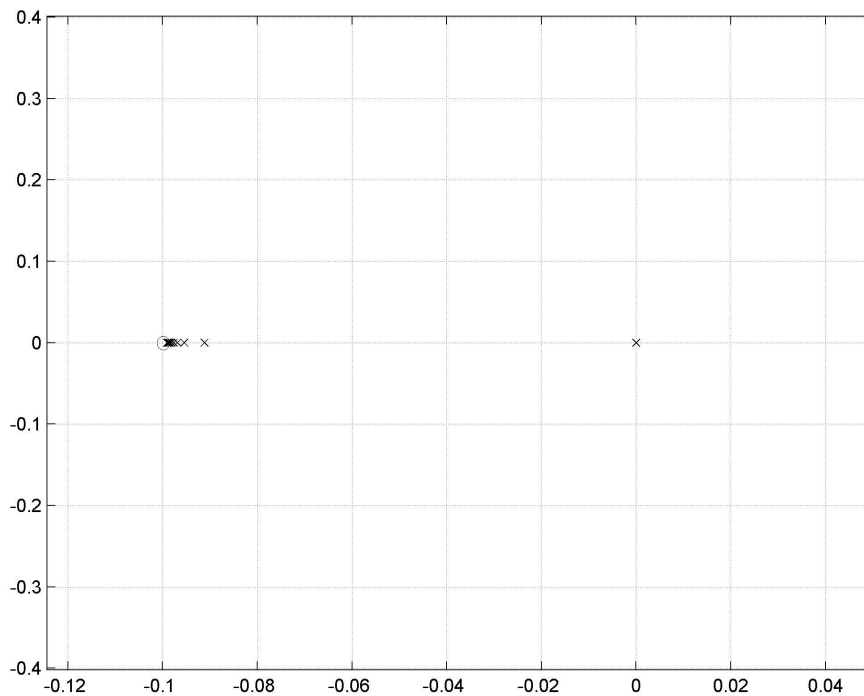
Πίνακας 5.5: Ιδιοτιμές μοντέλου για ισχύ  $P=1$  α.μ.

Ιδιοτιμή	Μεταβλητή Κατάστασης
-689.3	$V_c$
-57.26	$\psi_{fd}$
-6.894	$\psi_{kq}$
-0.1	$E_{fx}$
-1.389	$\omega_r$

Από την ανάλυση των ιδιοδιανυσμάτων και των συντελεστών συμμετοχής προκύπτει ότι οι ιδιοτιμές είναι σε μεγάλο βαθμό αποζευγμένες, αφού σε κάθε ιδιοτιμή αντιστοιχεί μία μόνο μεταβλητή κατάσταση.

Από τους πίνακες 5.3, 5.4 και 5.5 παρατηρούμε ότι και στις τρεις περιπτώσεις κυρίαρχη μεταβλητή καταστάσεως (δηλ. η μεταβλητή κατάστασης με την μικρότερη κατ'απόλυτη τιμή ιδιοτιμή) είναι η ταχύτητα του δρομέα. Για μικρές τιμές της ισχύος, η τιμή της ιδιοτιμής είναι μικρή, κάτι που μεταφράζεται σε μεγαλύτερες χρονικές σταθερές και επομένως σε πιο αργή απόκριση του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στον πίνακα 5.3 για  $P=0.3$  α.μ. η κυρίαρχη ιδιοτιμή είναι η  $-0.250$ , η οποία μεταφράζεται σε χρονική σταθερά του συστήματος, 16 sec. Αντίστοιχα για  $P=0.7$  α.μ. η κυρίαρχη ιδιοτιμή είναι η  $-0.3438$ , η οποία μεταφράζεται σε χρονική σταθερά του συστήματος, 11.6 sec. Αυτό φαίνεται καθαρά συγκρίνοντας τις αποκρίσεις των αντίστοιχων μεγεθών των παραγράφων 5.1.1 και 5.1.2. Έτσι παρατηρούμε ότι στην δεύτερη περίπτωση ( $P=0.7$  α.μ.) το σύστημα είναι πιο γρήγορο.

Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο που παρατηρούμε είναι ότι και στα τρία σημεία λειτουργίας η ιδιοτιμή που αντιστοιχεί στην μεταβλητή κατάστασης  $V_c$  έχει πολύ αρνητική τιμή, κάτι που ήταν αναμενόμενο γιατί η δυναμική του πυκνωτή είναι πολύ γρήγορη για την κλίμακα του χρόνου που μελετάμε.



Σχήμα 5.11: Γεωμετρικός τόπος της ιδιοτιμής  $E_{fx}$  αυξανόμενου του κέρδους  $K_p$

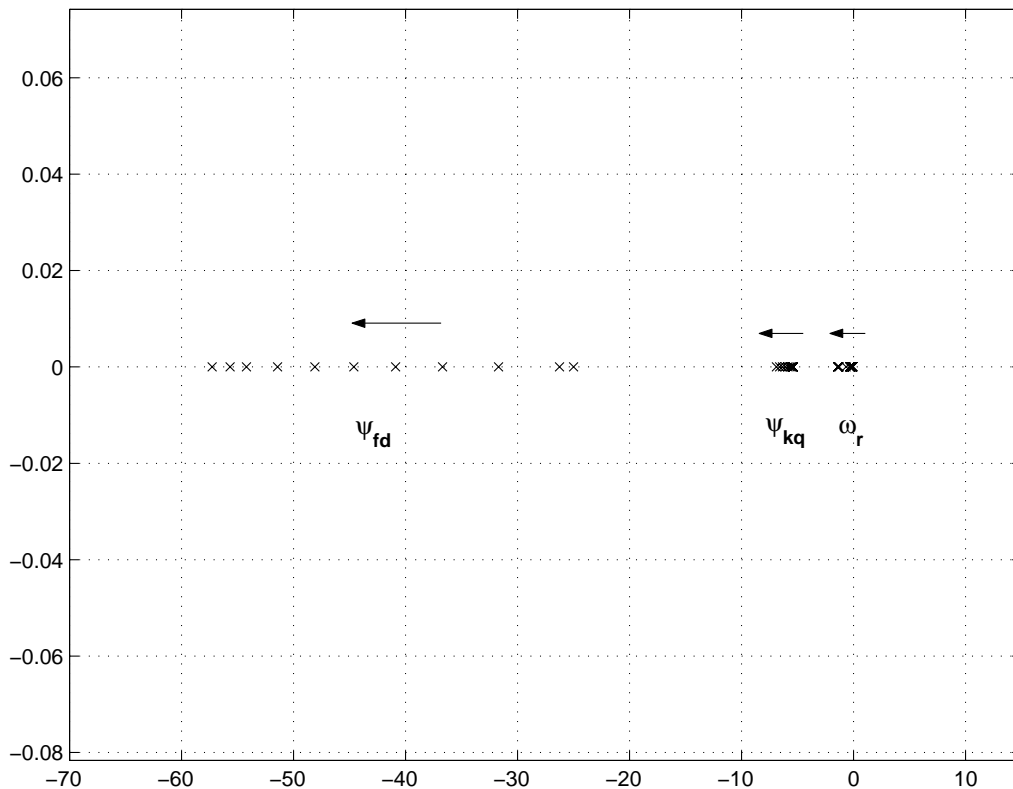
Τέλος πρέπει να επισημάνουμε ότι η ιδιοτιμή  $-0.1$  που αντιστοιχεί στον ολοκληρωτή του PI ελεγκτή του Α.Ρ.Τ.,  $E_{fx}$ , είναι σταθερή και στις τρεις περιπτώσεις. Η τιμή της οφείλεται στις τιμές των παραμέτρων  $K_p$  και  $K_i$  που επιλέχθηκαν ( $\frac{K_i}{K_p} = \frac{10}{100} = 0.1$ ).

Πιο συγκεκριμένα η συνάρτηση μεταφοράς του PI ελεγκτή του Α.Ρ.Τ. είναι:

$$K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{K_p s + K_i}{s} = \frac{100s + 10}{s} \quad (5.1)$$

Παρατηρούμε ότι η παραπάνω συνάρτηση μεταφοράς εισάγει ένα μηδενικό ίσο με  $-0.1$  και ένα πόλο ίσο με  $0$ . Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.11 αυξανόμενης της τιμής του  $K_p$  ο πόλος αυτός έλκεται από το μηδενικό και τελικά συμπύπτουν, με αποτέλεσμα να έχουμε απαλοιφή πόλου-μηδενικού, (zero-pole cancelation). Έτσι παρά το γεγονός ότι είναι η μικρότερη αριθμητικά ιδιοτιμή, δεν επηρεάζει την απόκριση τους συστήματος.

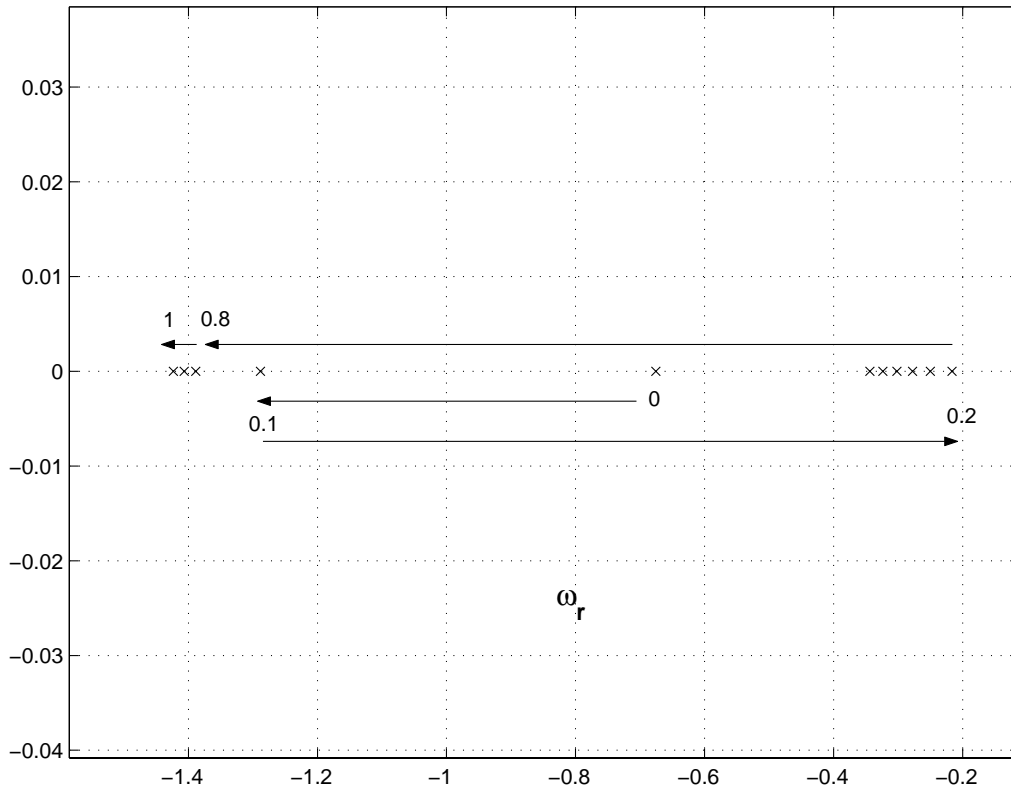
Στο σχήμα 5.12 παραθέτουμε το γεωμετρικό τόπο των ιδιοτιμών που αντιστοιχούν στην ταχύτητα του δρομέα και στις πεπλεγμένες ροές ανά sec των τυλιγμάτων διέγερσης και απόσβεσης για  $0 \leq P \leq 1$  με βήμα  $0.1$ , ενώ στο σχήμα 5.13 παραθέτουμε σε μεγέθυνση τις ιδιοτιμές που αντιστοιχούν στην ταχύτητα του δρομέα.



Σχήμα 5.12: Γεωμετρικός τόπος των ιδιοτιμών του συστήματος

Η τιμή των ιδιοτιμών εξαρτάται από το κομμάτι της χαρακτηριστικής ελέγχου στροφών (βλ. σχήμα 3.3) που γίνεται η γραμμικοποίηση. Πιο συγκεκριμένα για τιμές της ισχύος





Σχήμα 5.13: Γεωμετρικός τόπος της ιδιοτιμής που αντιστοιχεί στη μεταβλητή κατάσταση,  $\omega_r$

που βρίσκονται στο ενδιάμεσο, μη γραμμικό κομμάτι της χαρακτηριστικής, αυξανομένης της ισχύος οι ιδιοτιμές που αντιστοιχούν στις μεταβλητές κατάστασης  $\psi_{fd}$ ,  $\psi_{kq}$  και  $\omega_r$  μετακινούνται αριστερά στο μιγαδικό επίπεδο με αποτέλεσμα το σύστημα να γίνεται πιο γρήγορο. Αντιθέτως οι ιδιοτιμές που αντιστοιχούν σε τιμές της ισχύος που βρίσκονται σε ένα από τα δύο γραμμικά κομμάτια της χαρακτηριστικής έχουν μεγαλύτερη τιμή από τις άλλες. Τέλος σημειώνουμε ότι στο σχήμα 5.12 δεν απεικονίζεται η ιδιοτιμή της μεταβλητής κατάστασης  $V_c$  καθώς βρίσκεται πολύ αριστερά και κρίθηκε απαραίτητο να παραλειφθεί για λόγους ευκρίνειας του σχήματος.

Τέλος στους πίνακες 5.6 και 5.7 παρατίθενται τα δεξιά ιδιοδιανύσματα που αντιστοιχούν στις ιδιοτιμές, για δύο από τα παραπάνω σημεία λειτουργίας.

Για ισχύ  $P=0.3$  α.μ τα αποτελέσματα φαίνονται στους πίνακες 5.6:

Πίνακας 5.6: Δεξιά ιδιοδιανύσματα του συστήματος για χαμηλό φορτίο

Ιδιοτιμή=-1365		
Μεταβλητή Κατάστασης	Δεξί Ιδιοδιάνυσμα	
	Μέτρο	Γωνία (Μοίρες)
$V_c$	0.99	180
$\omega_r$	0.15	0
$\psi_{fd}$	0.04	180
$\psi_{kq}$	0.03	0
$E_{fx}$	0.01	180

Ιδιοτιμή=-36.7		
Μεταβλητή Κατάστασης	Δεξί Ιδιοδιάνυσμα	
	Μέτρο	Γωνία (Μοίρες)
$V_c$	0.55	0
$\omega_r$	0.09	180
$\psi_{fd}$	0.81	0
$\psi_{kq}$	0.04	180
$E_{fx}$	0.15	0

Ιδιοτιμή=-5.461		
Μεταβλητή Κατάστασης	Δεξί Ιδιοδιάνυσμα	
	Μέτρο	Γωνία (Μοίρες)
$V_c$	0.01	180
$\omega_r$	0.0	0
$\psi_{fd}$	0.12	180
$\psi_{kq}$	0.99	180
$E_{fx}$	0.02	180

Ιδιοτιμή=-0.25		
Μεταβλητή Κατάστασης	Δεξί Ιδιοδιάνυσμα	
	Μέτρο	Γωνία (Μοίρες)
$V_c$	0.0	0
$\omega_r$	1	180
$\psi_{fd}$	0.03	0
$\psi_{kq}$	0.01	0
$E_{fx}$	0.0	0

Ιδιοτιμή=-0.1		
Μεταβλητή Κατάστασης	Δεξί Ιδιοδιάνυσμα	
	Μέτρο	Γωνία (Μοίρες)
$V_c$	0.01	0
$\omega_r$	0.01	0
$\psi_{fd}$	0.01	0
$\psi_{kq}$	0	0
$E_{fx}$	1	0

Από τον πρώτο πίνακα παρατηρούμε ότι το ιδιοδιάνυσμα που αντιστοιχεί στην τάση του πυκνωτή έχει αντίθετη κατεύθυνση από το ιδιοδιάνυσμα που αντιστοιχεί στην ταχύτητα του δρομέα. Αυτό υποδεικνύει μια ανταλλαγή ισχύος μεταξύ του πυκνωτή και του δρομέα. Από το δεύτερο πίνακα φαίνεται ότι τα ιδιοδιανύσματα που αντιστοιχούν στο τύλιγμα διέγερσης και στην τάση του πυκνωτή έχουν ίδια φορά, κάτι που είναι αναμενόμενο αφού η αύξηση της διέγερσης εν γένει οδηγεί σε αύξηση της τάσης ακροδεκτών της γεννήτριας. Από τον τρίτο πίνακα παρατηρούμε μια μικρή επιρροή του τυλίγματος απόσβεσης στο τύλιγμα διέγερσης.

Για ισχύ  $P=0.7$  α.μ τα αποτελέσματα φαίνονται στους πίνακες 5.7:

Πίνακας 5.7: Δεξιά ιδιοδιανύσματα του συστήματος για μέσο φορτίο

Ιδιοτιμή=-894		
Μεταβλητή Κατάστασης	Δεξί Ιδιοδιάνυσμα	
	Μέτρο	Γωνία (Μοίρες)
$V_c$	0.99	180
$\omega_r$	0.12	0
$\psi_{fd}$	0.06	180
$\psi_{kq}$	0.03	0
$E_{fx}$	0.01	180

Ιδιοτιμή=-51.43		
Μεταβλητή Κατάστασης	Δεξί Ιδιοδιάνυσμα	
	Μέτρο	Γωνία (Μοίρες)
$V_c$	0.68	0
$\omega_r$	0.09	180
$\psi_{fd}$	0.71	0
$\psi_{kq}$	0.05	180
$E_{fx}$	0.13	0

Ιδιοτιμή=-6.096		
Μεταβλητή Κατάστασης	Δεξί Ιδιοδιάνυσμα	
	Μέτρο	Γωνία (Μοίρες)
$V_c$	0.04	180
$\omega_r$	0.01	0
$\psi_{fd}$	0.31	180
$\psi_{kq}$	0.95	180
$E_{fx}$	0.06	180

Ιδιοτιμή=-0.3438		
Μεταβλητή Κατάστασης	Δεξί Ιδιοδιάνυσμα	
	Μέτρο	Γωνία (Μοίρες)
$V_c$	0.0	0
$\omega_r$	1	180
$\psi_{fd}$	0.02	0
$\psi_{kq}$	0.01	0
$E_{fx}$	0.01	0

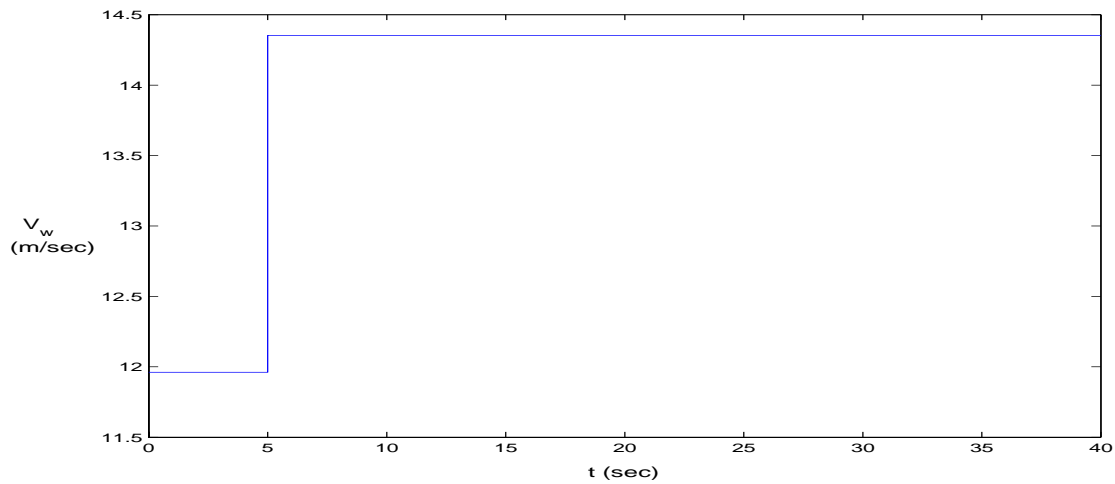
Ιδιοτιμή=-0.1		
Μεταβλητή Κατάστασης	Δεξί Ιδιοδιάνυσμα	
	Μέτρο	Γωνία (Μοίρες)
$V_c$	0.01	0
$\omega_r$	0.03	0
$\psi_{fd}$	0.01	0
$\psi_{kq}$	0	0
$E_{fx}$	1	0

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα παραπάνω ιδιοδιανύσματα είναι ίδια με αυτά των ιδιοδιανυσμάτων για ισχύ  $P=0.3$  α.μ.

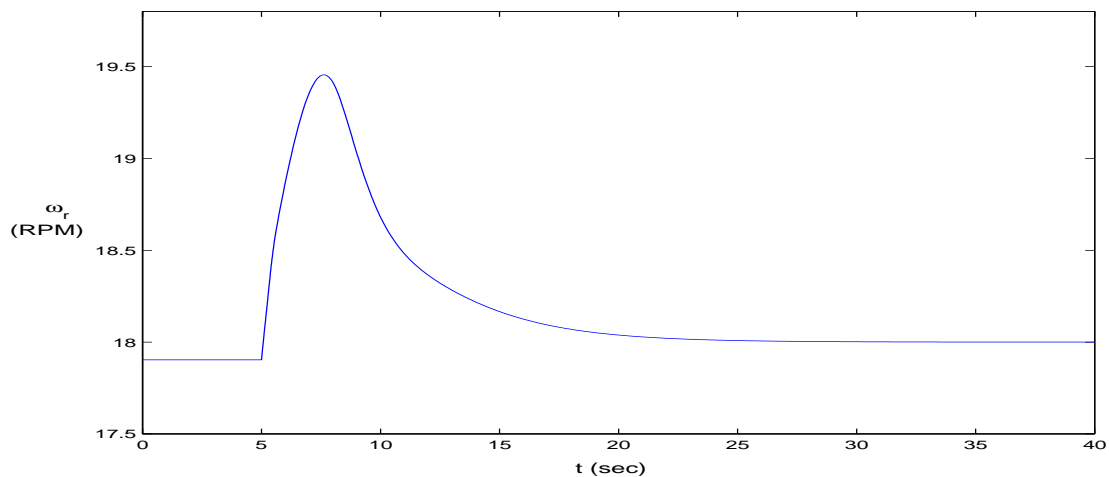
#### 5.1.4 Επιλογή Παραμέτρων Ελεγκτή Γωνίας Βήματος Πτερυγίων

Στη συγκεκριμένη παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του συγκεκριμένου μοντέλου της Α/Γ, για τιμές του ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής, με σκοπό να παρουσιασθεί η λειτουργία του συστήματος ελέγχου της γωνίας βήματος των πτερυγίων (pitch control). Πιο συγκεκριμένα, επιβάλλοντας μια βηματική αύξηση του ανέμου κατά 20% της αρχικής τιμής που βρέθηκε από την αρχικοποίηση για  $P=0.95$  (σχήμα

5.14), παρουσιάζονται στα σχήματα 5.15 και 5.16 οι αποκρίσεις της ταχύτητας του δρομέα της Α/Γ και της γωνίας βήματος.



Σχήμα 5.14: Βηματική αύξηση ανέμου

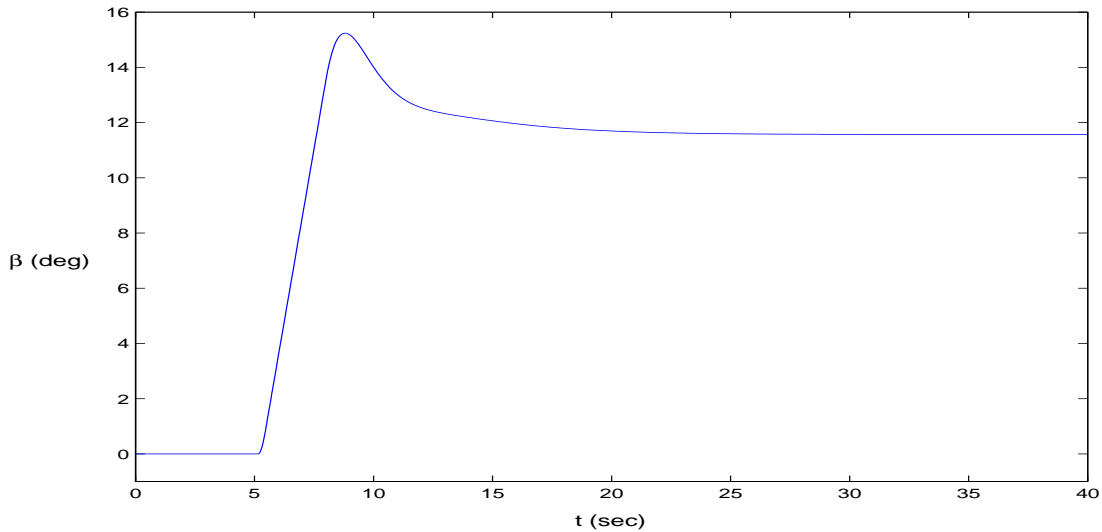


Σχήμα 5.15: Απόκριση της ταχύτητας του δρομέα για ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερη της ονομαστικής

Οι αποκρίσεις αυτές σχεδιάστηκαν με τις εξής παραμέτρους του PI ελεγκτή του ρυθμιστή γωνίας βήματος πτερυγίων:

$$K_p = 150$$

$$K_i = 30$$



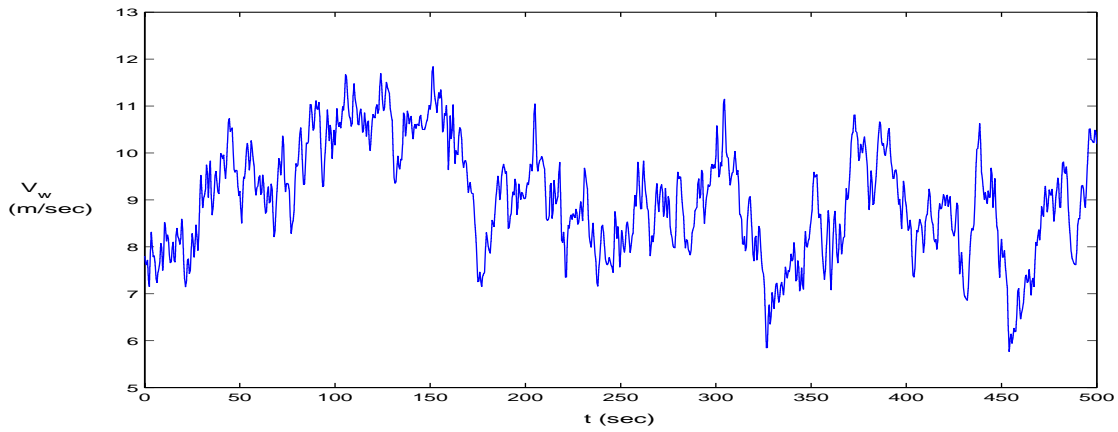
Σχήμα 5.16: Απόκριση της γωνίας βήματος πτερυγίων για ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερη της ονομαστικής

Οι παραπάνω παράμετροι επιλέχθηκαν μετά από αρκετές προσομοιώσεις και έχοντας ως στόχο αφενός την μικρότερη δυνατή υπερύψωση και αφετέρου τον ταχύτερο χρόνο αποκατάστασης στη γωνία βήματος και στην ταχύτητα του δρομέα.

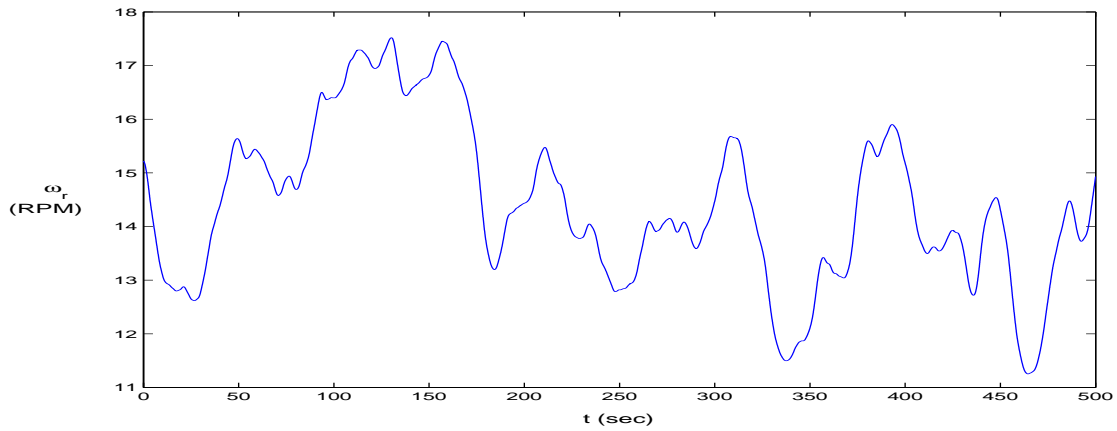
Παρατηρώντας τις αποκρίσεις στα σχήματα 5.15 και 5.16 συμπεραίνουμε κατ' αρχάς ότι το pitch control λειτουργεί αποτελεσματικά, αφού για τιμές του ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής τίθεται σε λειτουργία, με αποτέλεσμα η γωνία βήματος των πτερυγίων να αυξάνεται τόσο, ώστε η ταχύτητα του δρομέα της Α/Γ να έχει την ονομαστική της τιμή (18 Σ.Α.Λ.), όπως φαίνεται στο σχήμα 5.15. Επίσης στην απόκριση του σχήματος 5.16 είναι εμφανής και η δράση του περιοριστή του ρυθμού αύξησης της κλίσης των πτερυγίων όπου στη συγκεκριμένη περίπτωση τέθηκε ίσος με 5 deg/sec.

### 5.1.5 Απόκριση Μοντέλου Α/Γ σε Χρονοσειρά Ανέμου

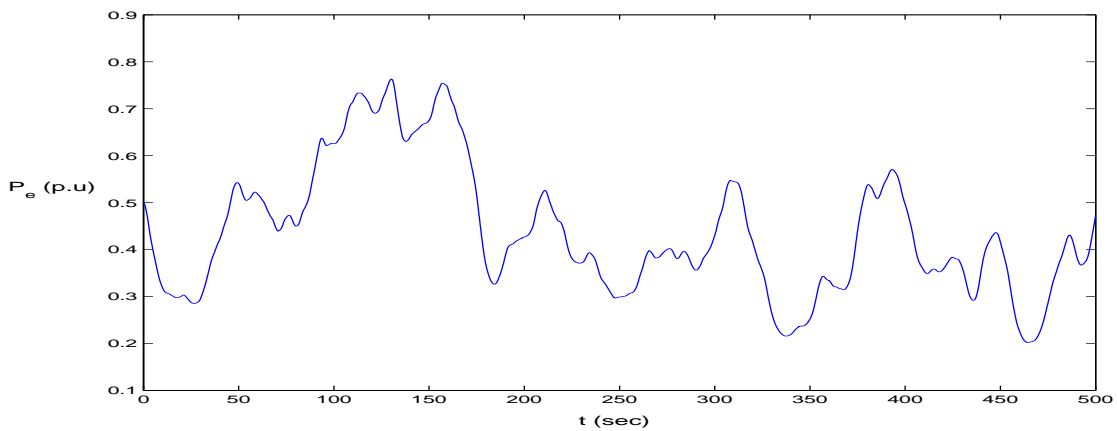
Στη συγκεκριμένη παράγραφο παρατίθεται η απόκριση του μοντέλου της Α/Γ έχοντας ως είσοδο μια χρονοσειρά ανέμου μέσης τιμής 9 m/sec. Πιο συγκεκριμένα, εκτός από την χρονοσειρά του ανέμου (σχήμα 5.17) παρουσιάζονται στα σχήματα 5.18 και 5.19 η ταχύτητα του δρομέα  $w_r$  και η ηλεκτρομαγνητική ισχύς  $P_e$ .



Σχήμα 5.17: Χρονοσειρά ανέμου μέσης τιμής 9 m/sec



Σχήμα 5.18: Απόκριση της ταχύτητας του δρομέα σε χρονοσειρά ανέμου



Σχήμα 5.19: Απόκριση της ηλεκτρομαγνητικής ισχύος σε χρονοσειρά ανέμου



Σχήμα 5.20: Βαθυπερατό φίλτρο για την εξομάλυνση της μεταβλητότητας του ανέμου

Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημάνουμε ότι η υψηλής συχνότητας μεταβλητότητα του ανέμου εξομαλύνεται από την επιφάνεια του δρομέα της Α/Γ. Αυτό το φαινόμενο είναι μάλιστα εντονότερο στις μεγάλης ισχύος Α/Γ, οι οποίες έχουν μεγάλη διάμετρο δρομέα. Για να προσομοιώσουμε αυτό το φαινόμενο χρησιμοποιούμε ένα βαθυπερατό φίλτρο με συνάρτηση μεταφοράς  $\frac{1}{1+T \cdot s}$ , όπου  $T=4$  [11].

Γι' αυτό το λόγο δεν παρατηρούμε στην ταχύτητα του δρομέα και στην ηλεκτρομαγνητική ισχύ την υψίσυχη μεταβλητότητα που παρατηρούμε στην χρονοσειρά του ανέμου.

## 5.2 Απόκριση Μοντέλου Α/Γ με Ρύθμιση Ισχύος Μέσω της Διέγερσης

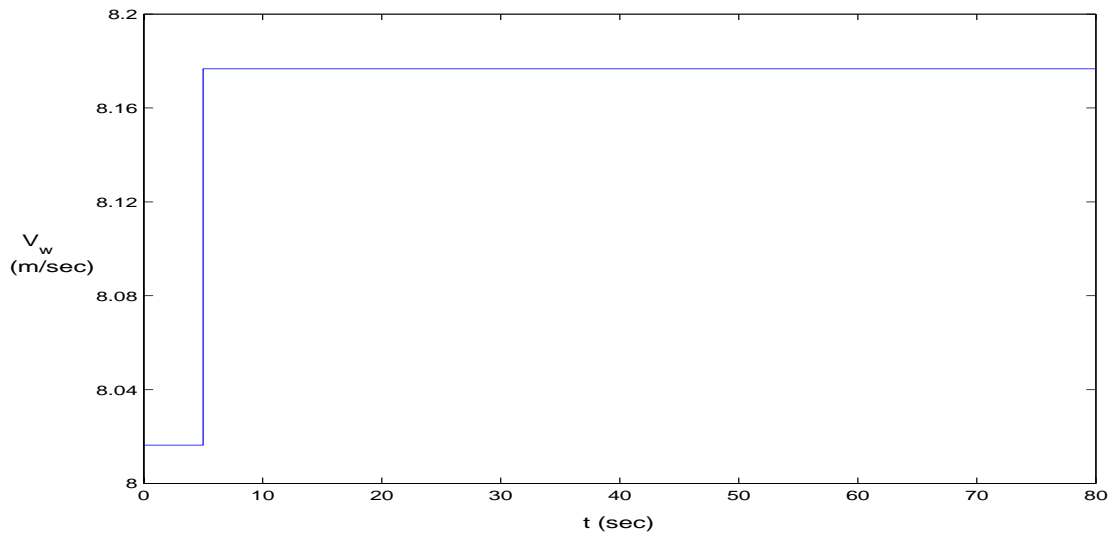
Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις του μοντέλου της Α/Γ που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.4. Όπως και στο προηγούμενο μοντέλο, εξετάζουμε και εδώ την απόκριση του συστήματος σε μικρές μεταβολές του ανέμου και για δύο αρχικά σημεία λειτουργίας, για χαμηλό (30% του ονομαστικού) και μέσο (70% του ονομαστικού) φορτίο. Στην συνέχεια υπολογίζονται και σχολιάζονται οι ιδιοτιμές και τα δεξιά ιδιοδιανύσματα για διάφορα σημεία λειτουργίας. Επίσης επιλέγουμε μέσω προσομοιώσεων τις παραμέτρους  $K_p$  και  $K_i$  του PI ελεγκτή του ρυθμιστή της γωνίας βήματος πτερυγίων (pitch control) και τέλος εξετάζεται η απόκριση του συγκεκριμένου μοντέλου της Α/Γ σε χρονοσειρά ανέμου.

### 5.2.1 Απόκριση Μοντέλου Α/Γ για Χαμηλό Φορτίο (P=0.3 α.μ.)

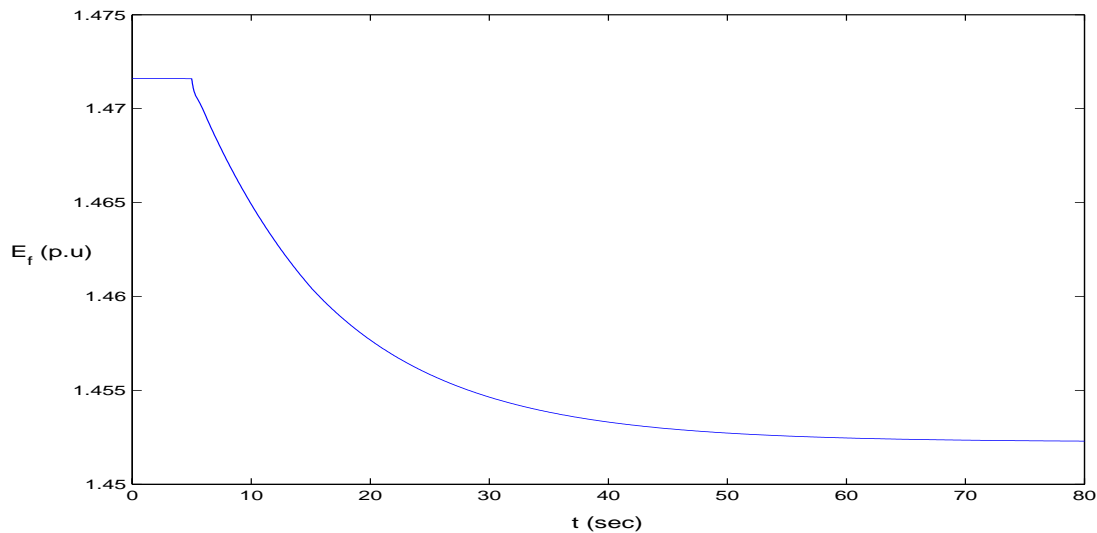
Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.3.3 αρχικοποιούμε το μοντέλο της Α/Γ για ισχύ  $P=0.3$  α.μ. Τα αποτελέσματα της αρχικοποίησης ταυτίζονται με αυτά του πίνακα 5.1 καθώς, όπως εξηγήσαμε στην παράγραφο 4.4.3, η αρχικοποίηση σε αυτήν την περίπτωση είναι η ίδια με αυτήν του προηγούμενου μοντέλου. Στη συνέχεια επιβάλλουμε στον άνεμο βηματική αύξηση κατά 2% της αρχικής του τιμής που βρέθηκε από την αρχικοποίηση (σχήμα 5.21). Η απόκριση διαφόρων μεγεθών του μοντέλου φαίνεται στα



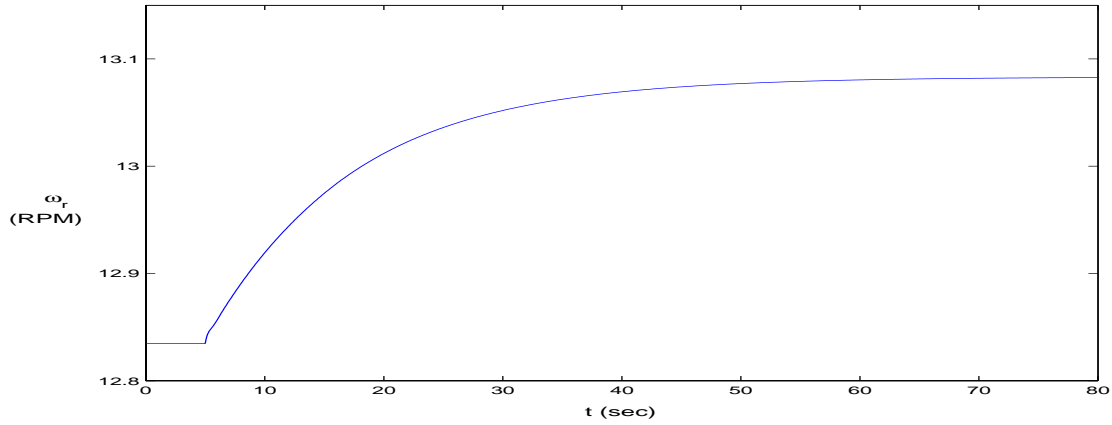
σχήματα 5.22-5.25. Ειδικότερα στο σχήμα 5.22 φαίνεται η απόκριση της Η.Ε.Δ διέγερσης για την παραπάνω μεταβολή. Στο σχήμα 5.23 φαίνεται η απόκριση της ταχύτητας του δρομέα ενώ στο σχήμα 5.24 φαίνονται η βέλτιστη ισχύς και η ενεργός ισχύς που εγχέεται στο δίκτυο. Τέλος, στο σχήμα 5.25 φαίνεται η απόκριση της γωνίας  $\delta$  του δρομέα της γεννήτριας.



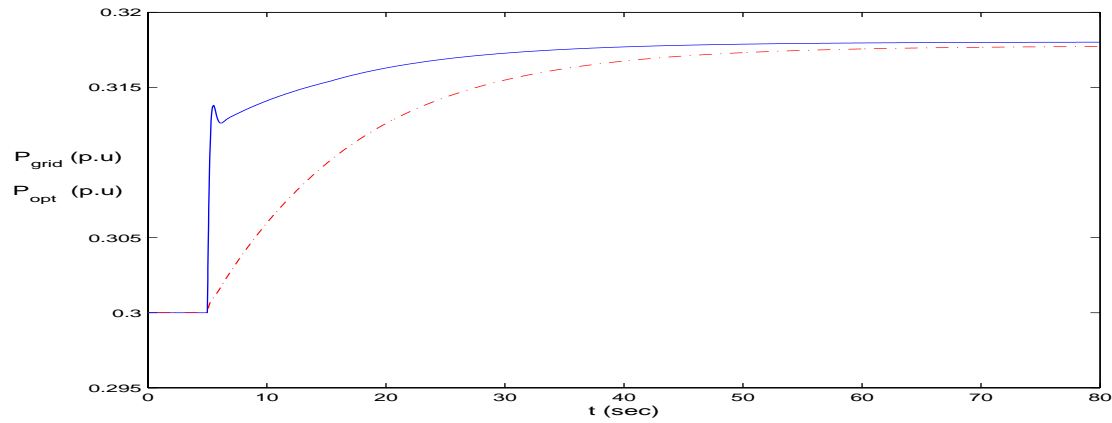
Σχήμα 5.21: Βηματική αύξηση του ανέμου



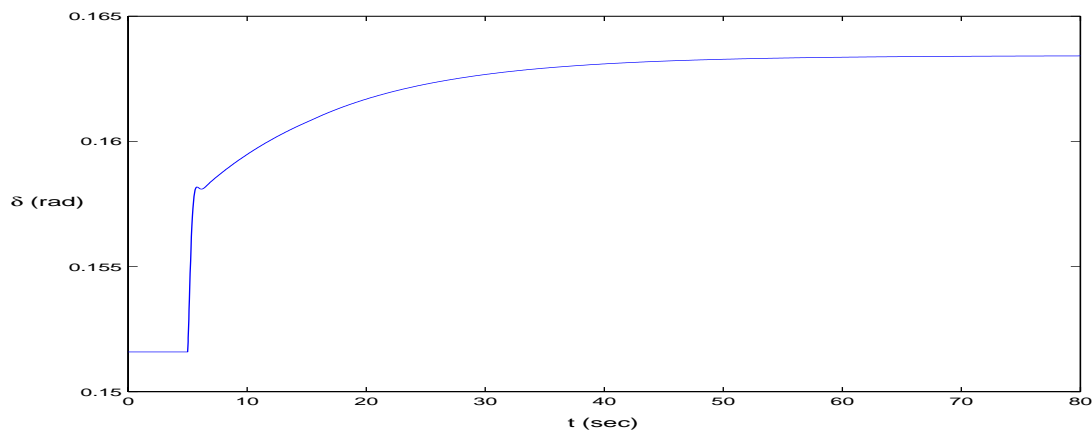
Σχήμα 5.22: Απόκριση της Η.Ε.Δ διέγερσης (χαμηλό φορτίο)



Σχήμα 5.23: Απόκριση της ταχύτητας του δρομέα (χαμηλό φορτίο)



Σχήμα 5.24: Απόκριση της βέλτιστης ισχύος (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) και της ισχύος του δικτύου (μπλε συνεχής γραμμή) (χαμηλό φορτίο)



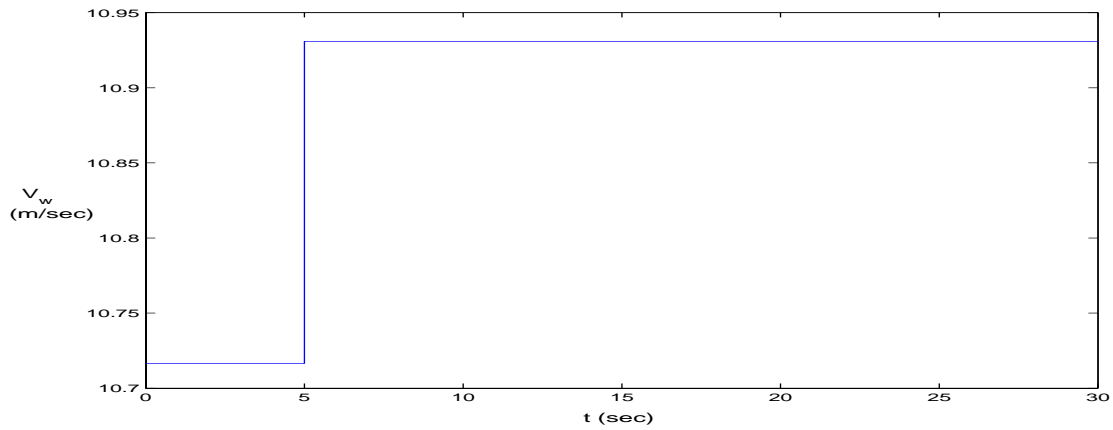
Σχήμα 5.25: Απόκριση της γωνίας δρομέα  $\delta$  (χαμηλό φορτίο)

Από τις αποκρίσεις στα σχήματα 5.22-5.25 κατ' αρχάς συμπεραίνουμε ότι το σύστημα είναι ευσταθές και ισορροπεί σε μόνιμη κατάσταση μετά από περίπου 50 sec από την επιβολή της βηματικής αύξησης του ανέμου. Μια πρώτη παρατήρηση είναι ότι για χαμηλό φορτίο το σύστημα είναι πιο αργό σε σχέση με το προηγούμενο μοντέλο (βλ. σχήματα παραγράφου 5.1.1). Στο σχήμα 5.22 παρατηρούμε ότι η τιμή της διέγερσης μειώνεται, όπως αναμέναμε, αφού βρισκόμαστε στο αριστερό κομμάτι της καμπύλης του σχήματος 3.9. Στο σχήμα 5.23 επαληθεύεται η αύξηση της ταχύτητας της γεννήτριας, αφού έχουμε αύξηση της ισχύος. Επίσης από το σχήμα 5.24 παρατηρούμε ότι η απόκριση της ισχύος που εγχέεται στο δίκτυο,  $P_{grid}$ , δεν ταυτίζεται απολύτως με την βέλτιστη ισχύ,  $P_{opt}$ , που προκύπτει από την ΜΡΤ καμπύλη (βλ. σχήμα 3.3). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε αυτό το μοντέλο η ηλεκτρομαγνητική ισχύς,  $P_e$ , καθορίζεται από το σύστημα διέγερσης η λειτουργία του οποίου είναι πιο αργή από τη λειτουργία του αντιστροφέα PWM.

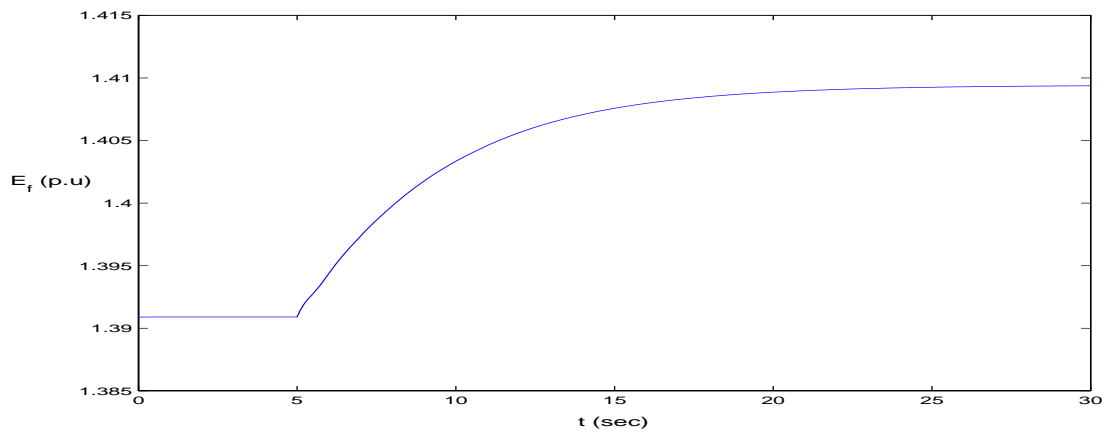
Η γρήγορη αυτή απόκριση της ενεργού ισχύος που εγχέεται στο δίκτυο,  $P_{grid}$ , άρα και της ηλεκτρομαγνητικής ισχύος  $P_e$  οφείλεται στο γεγονός ότι η μεταβατική Η.Ε.Δ. του τυλίγματος απόσβεσης εκδηλώνεται στην υπομεταβατική χρονική κλίμακα και κατά συνέπεια, για μια μικρή διαταραχή από το αρχικό σημείο λειτουργίας, προσεγγίζει πολύ γρήγορα ένα νέο σημείο ισορροπίας. Αντίθετα, η εξίσωση κίνησης του δρομέα εξελίσσεται σε μια πιο αργή χρονική κλίμακα. Η γρήγορη αυτή απόκριση της ισχύος που εγχέεται στο δίκτυο, έχει το πλεονέκτημα ότι προσεγγίζεται γρηγορότερα η βέλτιστη τιμή της ισχύος, παρά την καθυστέρηση της ταχύτητας να φτάσει στο νέο σημείο ισορροπίας. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται και στις μεγάλης ισχύος μηχανές επαγωγής [42]. Τέλος στο σχήμα 5.25 παρατηρούμε αύξηση της γωνίας  $\delta$  της σύγχρονης γεννήτριας, η απόκριση της οποίας είναι επίσης πολύ γρήγορη στα πρώτα δευτερόλεπτα.

### 5.2.2 Απόκριση Μοντέλου Α/Γ για Μέσο Φορτίο ( $P=0.7$ α.μ.)

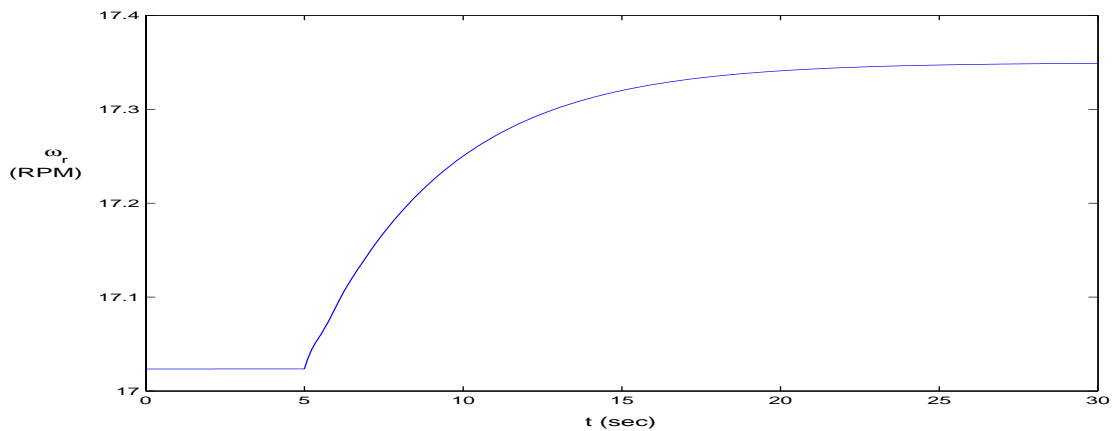
Στη συνέχεια αρχικοποιούμε το μοντέλο της Α/Γ για ισχύ  $P=0.7$  α.μ. Τα αποτελέσματα της αρχικοποίησης ταυτίζονται με αυτά του πίνακα 5.2 για τον ίδιο λόγο που εξηγήσαμε στην παράγραφο 4.4.3. Επιβάλλουμε πάλι στον άνεμο βηματική αύξηση κατά 2% της αρχικής του τιμής που βρέθηκε από την αρχικοποίηση (σχήμα 5.26). Η απόκριση διαφόρων μεγεθών του μοντέλου φαίνεται στα σχήματα 5.27-5.30. Ειδικότερα στο σχήμα 5.27 φαίνεται η απόκριση της Η.Ε.Δ διέγερσης για την παραπάνω μεταβολή. Στο σχήμα 5.28 φαίνεται η απόκριση της ταχύτητας του δρομέα ενώ στο σχήμα 5.29 φαίνονται η βέλτιστη ισχύς και η ενεργός ισχύς που εγχέεται στο δίκτυο. Τέλος στο σχήμα 5.30 φαίνεται η απόκριση της γωνίας  $\delta$  του δρομέα της γεννήτριας.



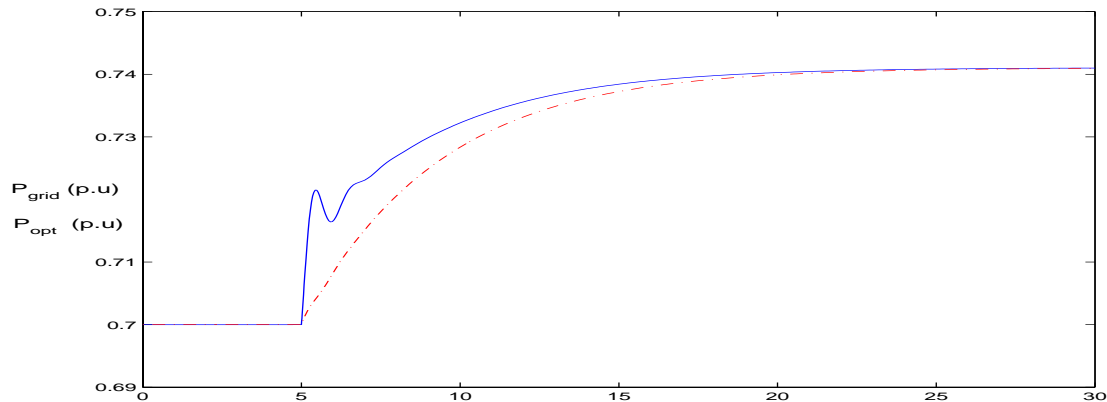
Σχήμα 5.26: Βηματική αύξηση του ανέμου



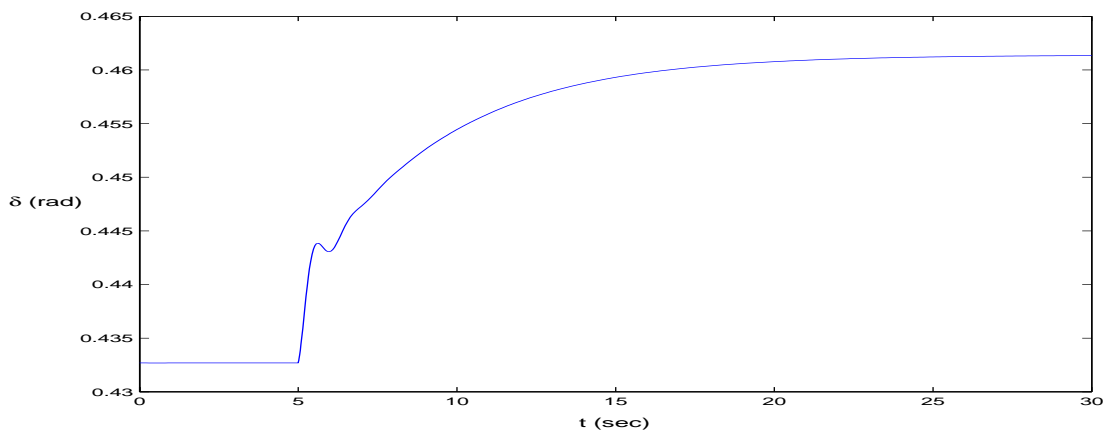
Σχήμα 5.27: Απόκριση της Η.Ε.Δ διέγερσης (μέσο φορτίο)



Σχήμα 5.28: Απόκριση της ταχύτητας του δρομέα (μέσο φορτίο)



Σχήμα 5.29: Απόκριση της βέλτιστης ισχύος (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) και της ισχύος του δικτύου (μπλε συνεχής γραμμή) (μέσο φορτίο)



Σχήμα 5.30: Απόκριση της γωνίας δρομέα  $\delta$  (μέσο φορτίο)

Από τις αποκρίσεις στα σχήματα 5.27-5.30 κατ' αρχάς συμπεραίνουμε ότι το σύστημα είναι και σε αυτήν την περίπτωση ευσταθές ενώ ισορροπεί σε μόνιμη κατάσταση μετά από περίπου 17 sec από την επιβολή της βηματικής αύξησης του ανέμου. Και σε αυτή την περίπτωση το σύστημα είναι πιο αργό σε σύγκριση με την απόκριση του προηγούμενου μοντέλου (βλ σχήματα παραγράφου 5.1.2). Ωστόσο, όπως φαίνεται από το σχήμα 5.27, τώρα η απόκριση της διέγερσης δεν μεταβάλλεται αρχικά προς την αντίθετη κατεύθυνση από την τελική της τιμή, όπως συνέβαινε στο προηγούμενο μοντέλο (βλ σχήμα 5.7). Στο σχήμα 5.28 παρατηρούμε αύξηση της ταχύτητας της γεννήτριας ενώ όπως φαίνεται στο σχήμα 5.29 η απόκριση της ισχύος που εγχέεται στο δίκτυο,  $P_{grid}$ , δεν ταυτίζεται απολύτως με την βέλτιστη ισχύ,  $P_{opt}$ , που προκύπτει από την MPT καμπύλη όπως εξηγήσαμε και στην παράγραφο 5.2.1. Ωστόσο η διαφορά τους είναι μικρότερη σε σύγκριση με τη διαφορά που είχαν στο χαμηλό φορτίο. Τέλος, στο σχήμα 5.30 φαίνεται η αύξηση της γωνίας  $\delta$  της γεννήτριας.

### 5.2.3 Ευστάθεια Μικρών Διαταραχών

Στην παρούσα παράγραφο και πιο συγκεκριμένα στους πίνακες 5.8, 5.9 και 5.10 παρατίθενται οι ιδιοτιμές και οι συντελεστές συμμετοχής της κάθε μεταβλητής κατάστασης σε κάθε ιδιοτιμή, για τρία σημεία λειτουργίας του συγκεκριμένου μοντέλου της Α/Γ.

Πίνακας 5.8: Ιδιοτιμές μοντέλου για ισχύ  $P=0.3$  α.μ.

Ιδιοτιμή	Απόσβεση	Μεταβλητή Κατάστασης	Συντελεστής Συμμετοχής
$-4.035 \pm 3.99j$	0.711	$\omega_r$	0.71
		$\psi_{fd}$	0.3
		$\psi_{kq}$	1.0
-0.07858	1.0	$\omega_r$	0.45
		$\psi_{fd}$	1.0

Πίνακας 5.9: Ιδιοτιμές μοντέλου για ισχύ  $P=0.7$  α.μ.

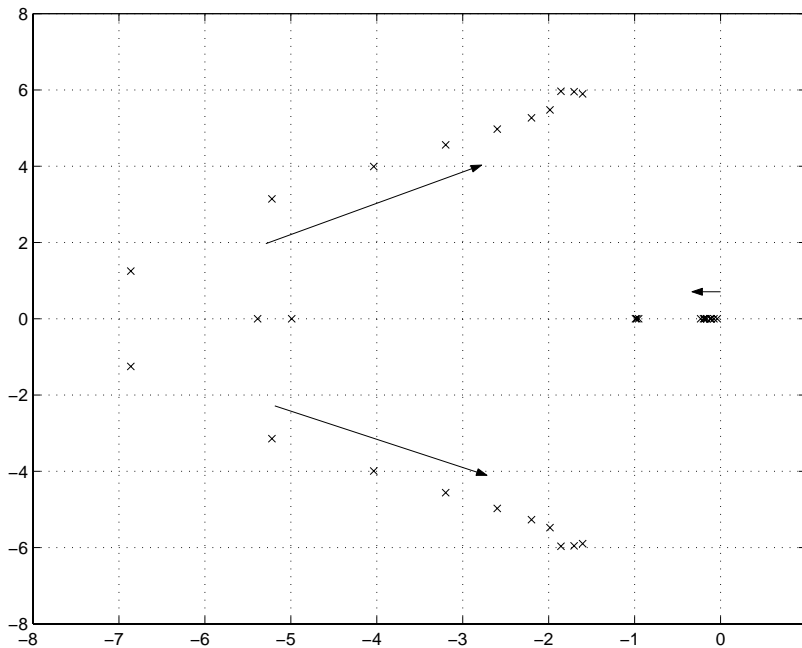
Ιδιοτιμή	Απόσβεση	Μεταβλητή Κατάστασης	Συντελεστής Συμμετοχής
$-1.985 \pm 5.477j$	0.3408	$\omega_r$	0.33
		$\psi_{fd}$	0.68
		$\psi_{kq}$	1.0
-0.2317	1.0	$\omega_r$	1.0
		$\psi_{fd}$	0.47

Πίνακας 5.10: Ιδιοτιμές μοντέλου για ισχύ  $P=1$  α.μ.

Ιδιοτιμή	Απόσβεση	Μεταβλητή Κατάστασης	Συντελεστής Συμμετοχής
$-1.857 \pm 5.966j$	0.2973	$\omega_r$	0.29
		$\psi_{fd}$	0.81
		$\psi_{kq}$	1.0
-0.9912	1.0	$\omega_r$	1.0
		$\psi_{fd}$	0.35

Από τον πίνακα 5.8 παρατηρούμε ότι για μικρή ισχύ ( $P=0.3$  α.μ) κυρίαρχη μεταβλητή κατάστασης είναι η πεπλεγμένη ροή ανά sec του τυλίγματος διέγερσης, γεγονός που δικαιολογεί την πολύ αργή απόκριση του συγκεκριμένου μοντέλου για μικρές τιμές της ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στον πίνακα 5.8 για  $P=0.3$  α.μ. η κυρίαρχη ιδιοτιμή είναι η  $-0.07858$ , η οποία μεταφράζεται σε χρονική σταθερά του συστήματος,  $50.9$  sec. Επίσης παρατηρούμε ότι μεταβολή της ροής του τυλίγματος απόσβεσης προκαλεί ταλάντωση η οποία μπορεί να χαρακτηριστεί ως «ηλεκτρομηχανική» καθώς συμμετέχει σε αυτή και η ταχύτητα του δρομέα. Ο ρυθμός απόκρισης αυτός είναι χαρακτηριστικός των μεγάλων μηχανών επαγωγής και εκδηλώνεται σε μικρή χρονική κλίμακα όπως συμπεράναμε και από το σχήμα 5.24.

Όπως φαίνεται στους πίνακες 5.9 και 5.10, στις υπόλοιπες περιπτώσεις κυρίαρχη μεταβλητή καταστάσεως είναι η ταχύτητα του δρομέα. Έτσι για  $P=0.7$  α.μ. η κυρίαρχη ιδιοτιμή είναι η  $-0.2317$ , η οποία μεταφράζεται σε χρονική σταθερά,  $17.26$  sec. Έτσι παρατηρούμε ότι για το συγκεκριμένο μοντέλο με την αύξηση της ισχύος η απόκριση του συστήματος γίνεται πιο γρήγορη. Επίσης η ταλάντωση που εμφανίζεται είναι πλέον καθαρά ηλεκτρική ταλάντωση. Επίσης με την αύξηση της ισχύος παρατηρούμε μείωση του συντελεστή απόσβεσης της ταλάντωσης που εμφανίζεται. Ωστόσο η μικρή αυτή απόσβεση δεν επηρεάζει την απόκριση του συστήματος καθώς η ιδιοτιμή στην οποία αντιστοιχεί δεν είναι η κυριαρχούσα.



Σχήμα 5.31: Γεωμετρικός τόπος των ιδιοτιμών του συστήματος

Στο σχήμα 5.31 παραθέτουμε το γεωμετρικό τόπο των ιδιοτιμών του συστήματος για  $0 \leq P \leq 1$  με βήμα 0.1.

Τέλος στους πίνακες 5.11 και 5.12 παρατίθενται τα δεξιά ιδιοδιανύσματα που αντιστοι-

χούν στις ιδιοτιμές, για δύο από τα παραπάνω σημεία λειτουργίας. Ειδικότερα, για ισχύ  $P=0.3$  α.μ τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 5.11.

Πίνακας 5.11: Δεξιά ιδιοδιανύσματα του συστήματος για χαμηλό φορτίο

Ιδιοτιμή=-4.035 ± 3.99j		
Μεταβλητή Κατάστασης	Δεξί Ιδιοδιάνυσμα	
	Μέτρο	Γωνία (Μοίρες)
$\omega_r$	0.96	0.0
$\psi_{fd}$	0.01	-15.38
$\psi_{kq}$	0.27	65.18

Ιδιοτιμή=-0.07858		
Μεταβλητή Κατάστασης	Δεξί Ιδιοδιάνυσμα	
	Μέτρο	Γωνία (Μοίρες)
$\omega_r$	1	0.0
$\psi_{fd}$	0.03	180
$\psi_{kq}$	0.0	0.0

Από τον πρώτο πίνακα παρατηρούμε ότι η γωνία μεταξύ των πεπλεγμένων ρών ανά sec των τυλιγμάτων διέγερσης και απόσβεσης είναι κοντά στις  $90^0$  ( $80.56^0$ ).  
Για ισχύ  $P=0.7$  α.μ τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 5.12.

Πίνακας 5.12: Δεξιά ιδιοδιανύσματα του συστήματος για μέσο φορτίο

Ιδιοτιμή=-1.985 ± 5.477j		
Μεταβλητή Κατάστασης	Δεξί Ιδιοδιάνυσμα	
	Μέτρο	Γωνία (Μοίρες)
$\omega_r$	0.98	0.0
$\psi_{fd}$	0.03	-11.33
$\psi_{kq}$	0.2	57.12

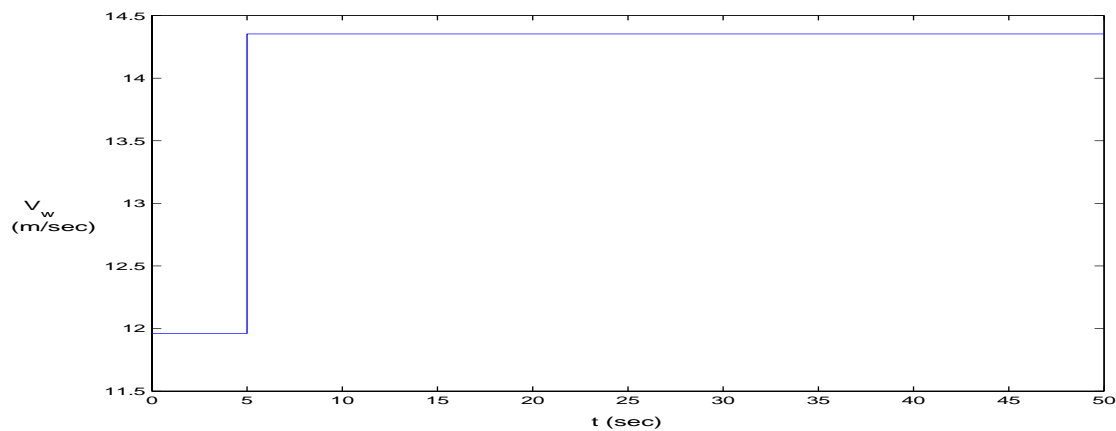
Ιδιοτιμή=-0.2317		
Μεταβλητή Κατάστασης	Δεξί Ιδιοδιάνυσμα	
	Μέτρο	Γωνία (Μοίρες)
$\omega_r$	1	0.0
$\psi_{fd}$	0.02	180
$\psi_{kq}$	0.01	180



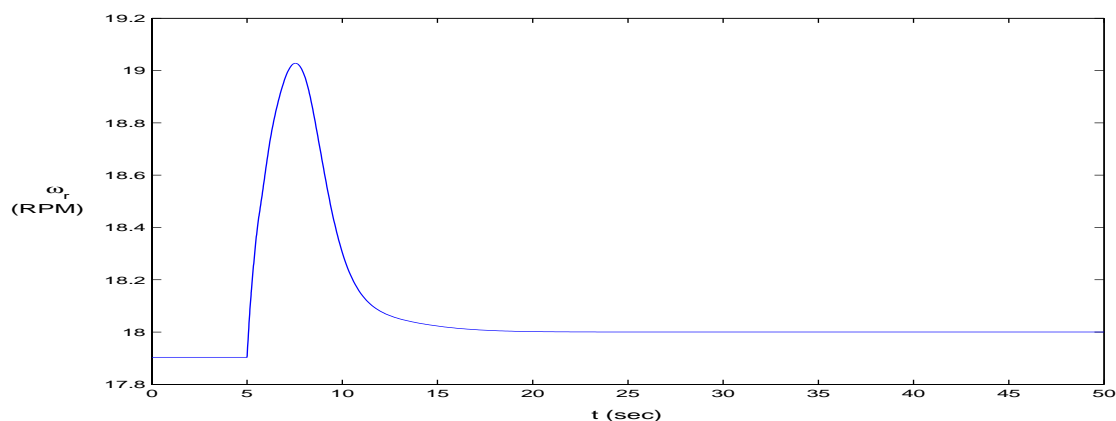
Και σε αυτήν την περίπτωση η γωνία μεταξύ των πεπλεγμένων ροών ανά sec των τυλιγμάτων διέγερσης και απόσβεσης είναι κοντά στις  $90^0$  ( $68.45^0$ ).

#### 5.2.4 Επιλογή Παραμέτρων Ελεγκτή Γωνίας Βήματος Πτερυγίων

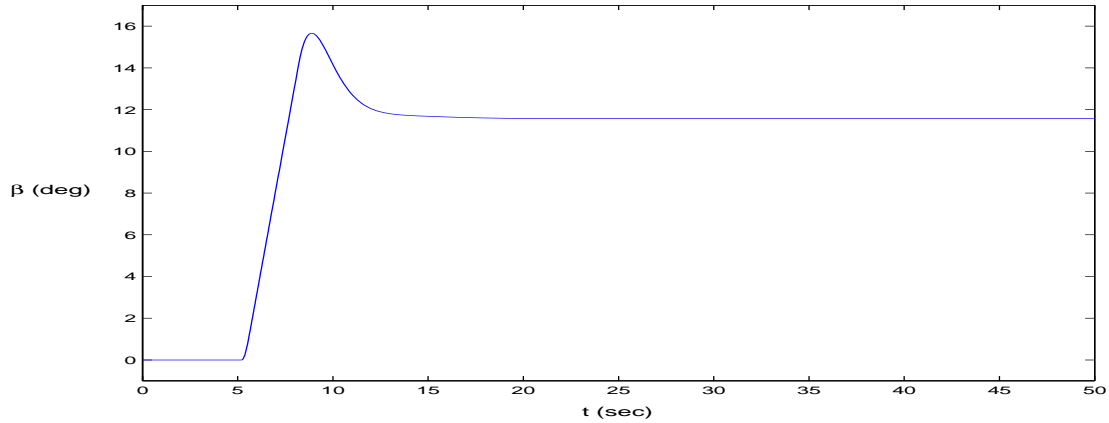
Στη συγκεκριμένη παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του συγκεκριμένου μοντέλου της Α/Γ, για τιμές του ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής, με σκοπό να παρουσιασθεί η λειτουργία του συστήματος ελέγχου της γωνίας βήματος των πτερυγίων (pitch control). Πιο συγκεκριμένα, επιβάλλοντας μια βηματική αύξηση του ανέμου κατά 20% της αρχικής τιμής που βρέθηκε από την αρχικοποίηση για  $P=0.95$  α.μ, (σχήμα 5.32), παρουσιάζονται στα σχήματα 5.33 και 5.34 οι αποκρίσεις της ταχύτητας του δρομέα της Α/Γ και της γωνίας βήματος.



Σχήμα 5.32: Βηματική αύξηση ανέμου



Σχήμα 5.33: Απόκριση της ταχύτητας του δρομέα για ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερη της ονομαστικής



Σχήμα 5.34: Απόκριση της γωνίας βήματος πτερυγίων για ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερη της ονομαστικής

Οι αποκρίσεις αυτές σχεδιάστηκαν με τις εξής παραμέτρους του PI ελεγκτή του ρυθμιστή γωνίας βήματος πτερυγίων:

$$K_p = 200$$

$$K_i = 60$$

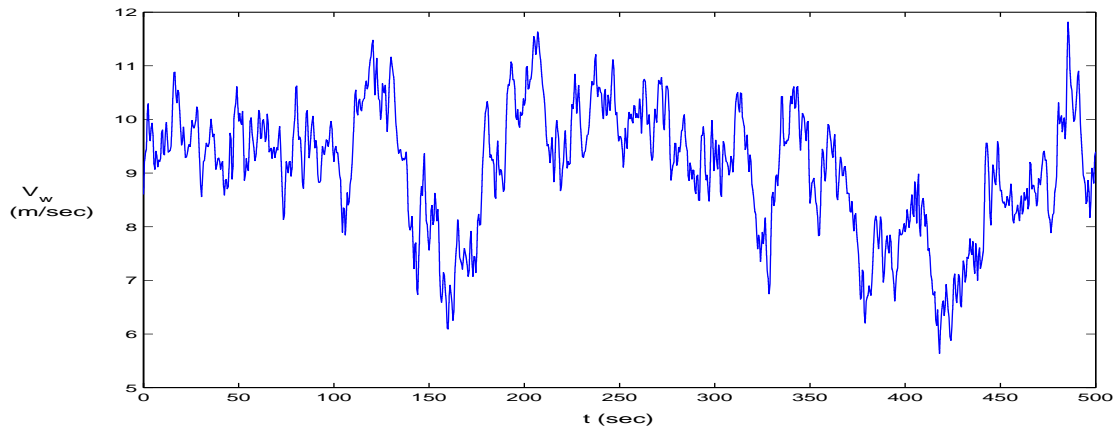
Οι παραπάνω παράμετροι επιλέχθηκαν μετά από αρκετές προσομοιώσεις και έχοντας ως στόχο αφενός την μικρότερη δυνατή υπερύψωση και αφετέρου τον ταχύτερο χρόνο αποκατάστασης στη γωνία βήματος και στην ταχύτητα του δρομέα.

Παρατηρώντας τις αποκρίσεις στα σχήματα 5.33 και 5.34 συμπεραίνουμε κατ' αρχάς ότι το pitch control λειτουργεί αποτελεσματικά, αφού για τιμές του ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής τίθεται σε λειτουργία, με αποτέλεσμα η γωνία βήματος των πτερυγίων να αυξάνεται τόσο, ώστε η ταχύτητα του δρομέα της Α/Γ να έχει την ονομαστική της τιμή (18 ΣΑΛ). Επίσης στην απόκριση του σχήματος 5.34 είναι εμφανής και η δράση του περιοριστή του ρυθμού αύξησης της κλίσης των πτερυγίων όπου στη συγκεκριμένη περίπτωση τέθηκε ίσος με 5 deg/sec.

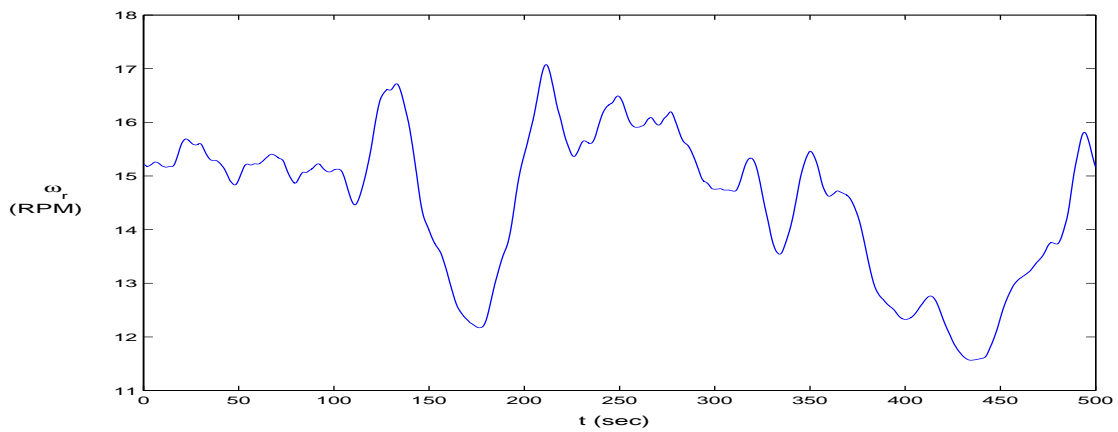
### 5.2.5 Απόκριση Μοντέλου Α/Γ σε Χρονοσειρά Ανέμου

Στη συγκεκριμένη παράγραφο παρατίθεται η απόκριση του μοντέλου της Α/Γ έχοντας ως είσοδο μια χρονοσειρά ανέμου μέσης τιμής 9 m/sec. Πιο συγκεκριμένα, εκτός από την χρονοσειρά του ανέμου (σχήμα 5.35) παρουσιάζονται στα σχήματα 5.36 και 5.37 η ταχύτητα του δρομέα  $w_r$  και η ισχύς που εγχέεται στο δίκτυο  $P_{grid}$ .

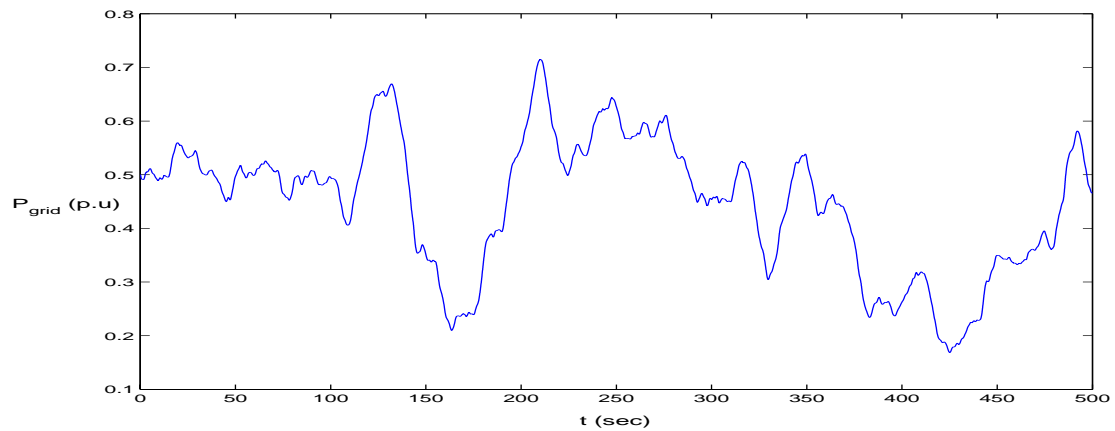
Για τον λόγο που εξηγήσαμε στην παράγραφο 5.1.5 χρησιμοποιήθηκε και στην συγκεκριμένη περίπτωση βαθυπερατό φίλτρο με  $T=4$ .



Σχήμα 5.35: Χρονοσειρά ανέμου μέσης τιμής 9 m/sec



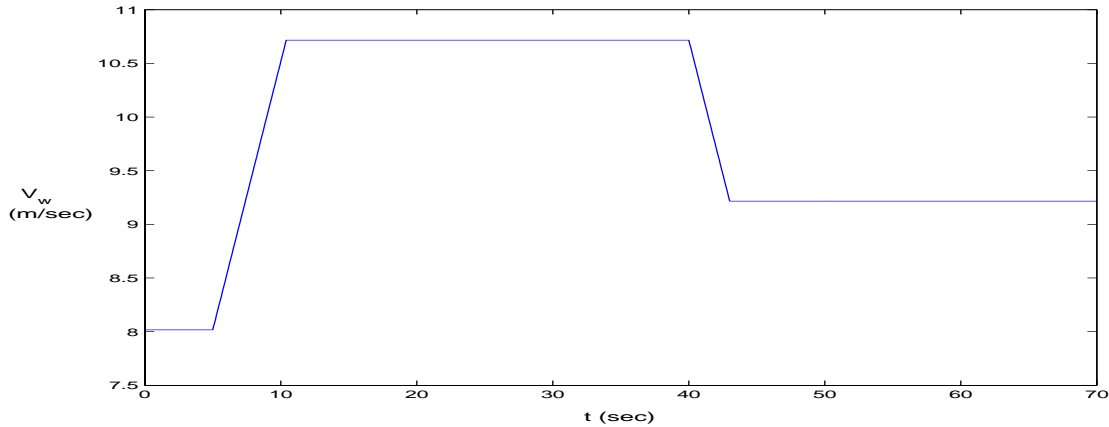
Σχήμα 5.36: Απόκριση της ταχύτητας του δρομέα σε χρονοσειρά ανέμου



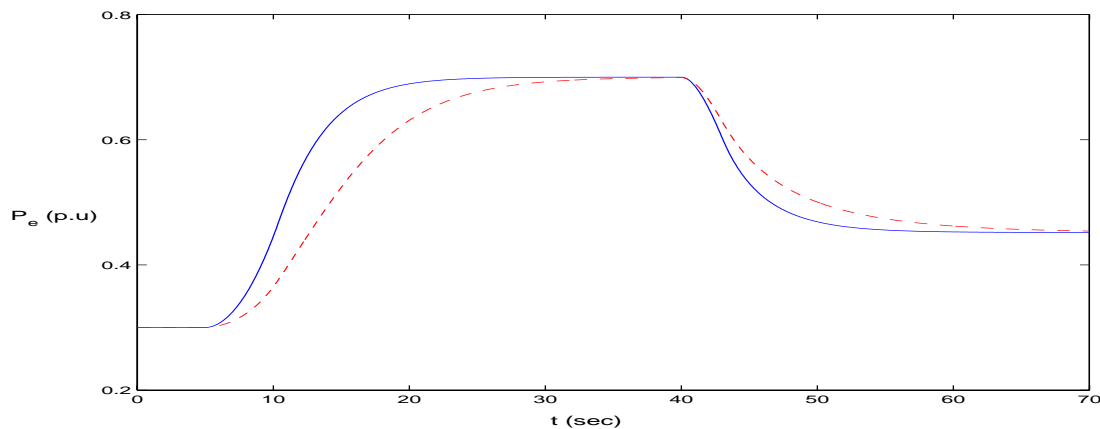
Σχήμα 5.37: Απόκριση της ισχύος του δικτύου σε χρονοσειρά ανέμου

### 5.3 Σύγκριση Μεθόδων Ελέγχου Α/Γ

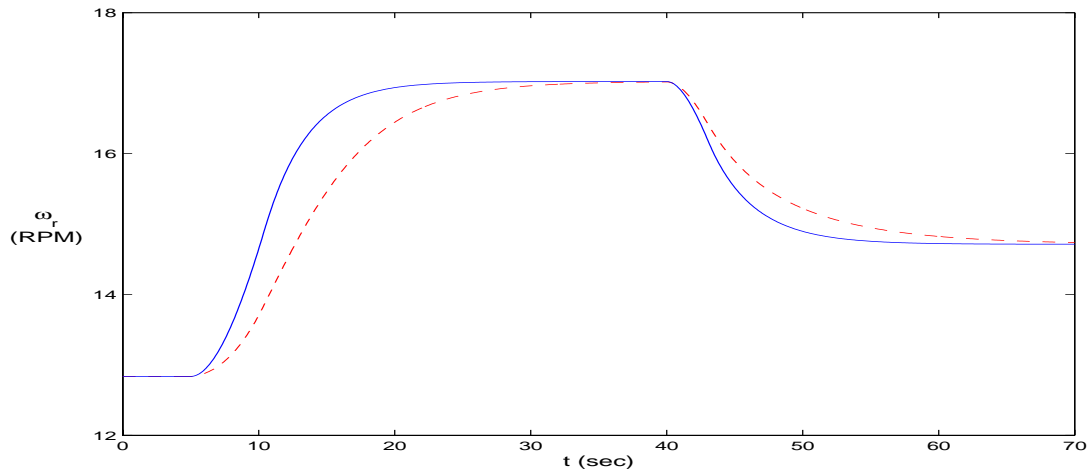
Παρατηρώντας τις αποκρίσεις των ανάλογων μεγεθών στις παραγράφους 5.1 και 5.2, παρατηρούμε ότι η απόκριση του δεύτερου μοντέλου είναι πιο αργή, κάτι που είναι εμφανέστερο σε μικρές φορτίσεις όπου κυριαρχεί η δυναμική της ροής του πεδίου διέγερσης. Για να αξιολογήσουμε κατά πόσο επηρεάζει η αργή αυτή απόκριση τη λειτουργία του συστήματος υπό μεταβλητή ταχύτητα ανέμου, συγκρίνουμε την απόκριση των δύο μοντέλων, όταν η ταχύτητα του ανέμου έχει την μορφή που φαίνεται στο σχήμα 5.38.



Σχήμα 5.38: Ταχύτητα ανέμου



Σχήμα 5.39: Ηλεκτρομαγνητική ισχύς του μοντέλου Α/Γ με Α.Ρ.Τ (μπλε συνεχής γραμμή) και του μοντέλου Α/Γ με έλεγχο της ενεργού ισχύος μέσω της διέγερσης (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή)



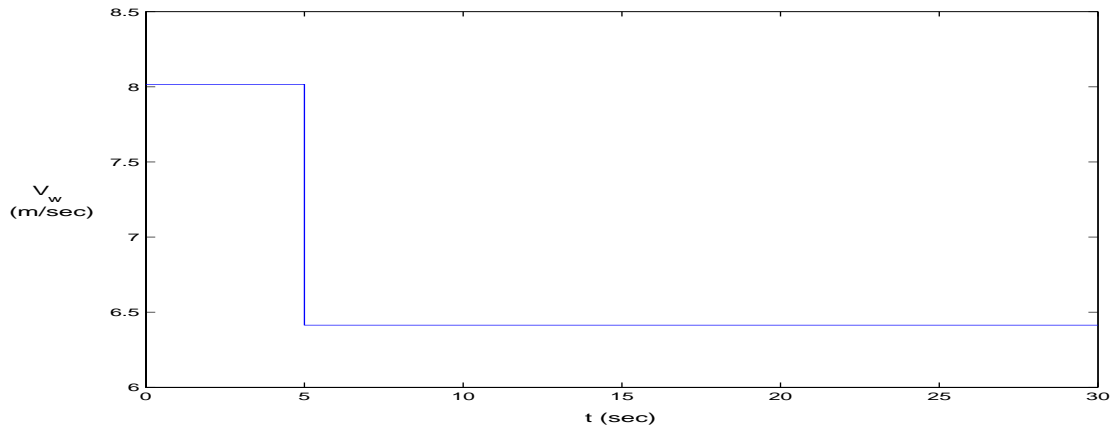
Σχήμα 5.40: Ταχύτητα δρομέα του μοντέλου A/Γ με A.P.T (μπλε συνεχής γραμμή) και του μοντέλου A/Γ με έλεγχο της ενεργού ισχύος μέσω της διέγερσης (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή)

Πιο συγκεκριμένα, ξεκινώντας από μικρή ισχύ ( $P=0.3$  α.μ), επιβάλλουμε στα 5 sec αύξηση του ανέμου μέχρι η ισχύς να γίνει  $P=0.7$  α.μ. Εκεί διατηρείται σταθερή για 30 sec και στην συνέχεια ξαναμειώνεται έτσι ώστε να φτάσει την τιμή  $P=0.4$  α.μ. όπου και παραμένει σταθερή μέχρι το τέλος της προσομοίωσης.

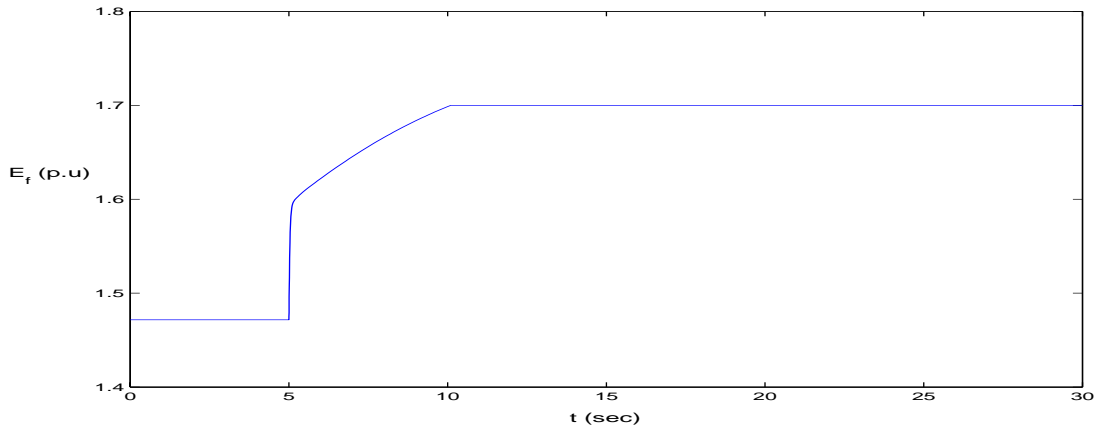
Στα σχήματα 5.39 και 5.40 φαίνεται η απόκριση της ισχύος και της ταχύτητας του δρομέα των δύο μοντέλων αντίστοιχα. Όπως παρατηρούμε πράγματι η απόκριση του δεύτερου μοντέλου είναι πιο αργή, κυρίως στις χαμηλές στροφές, ωστόσο η συνολική απόκριση είναι αρκετά όμοια.

## 5.4 Λειτουργία DC/DC Μετατροπέα Ανύψωσης σε Περίπτωση Σταθερής Διέγερσης

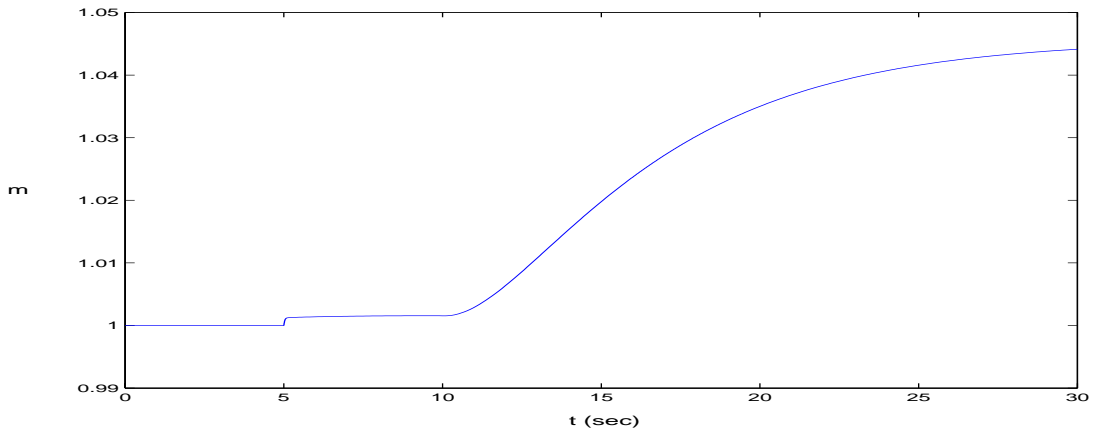
Στη συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του μοντέλου της A/Γ που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.5. Πιο συγκεκριμένα, αρχικοποιώντας το μοντέλο για ισχύ  $P=0.3$  α.μ., επιβάλλουμε βηματική μείωση του ανέμου κατά 20% της αρχικής τιμής που βρέθηκε από την αρχικοποίηση (σχήμα 5.41). Τα αποτελέσματα της αρχικοποίησης είναι τα ίδια με αυτά του πίνακα 5.1. Η απόκριση διαφόρων μεγεθών του μοντέλου φαίνεται στα σχήματα 5.42-5.45. Ειδικότερα στο σχήμα 5.42 φαίνεται η απόκριση της Η.Ε.Δ διέγερσης για την παραπάνω μεταβολή. Στο σχήμα 5.43 φαίνεται η απόκριση του λόγου διαμόρφωσης  $m$  του chopper, ενώ στο σχήμα 5.44 φαίνεται η ενεργός ισχύς της γεννήτριας. Τέλος στο σχήμα 5.45 φαίνεται η απόκριση της ταχύτητας του δρομέα.



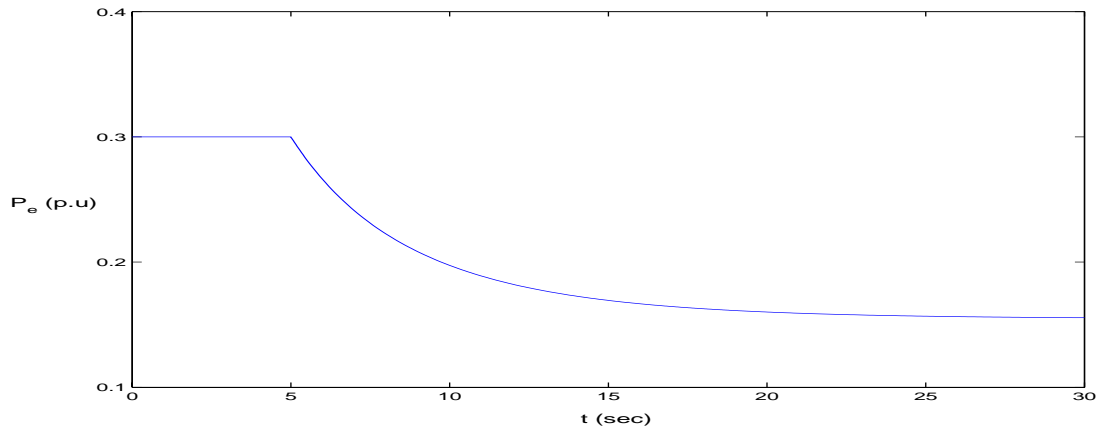
Σχήμα 5.41: Βηματική μείωση ανέμου



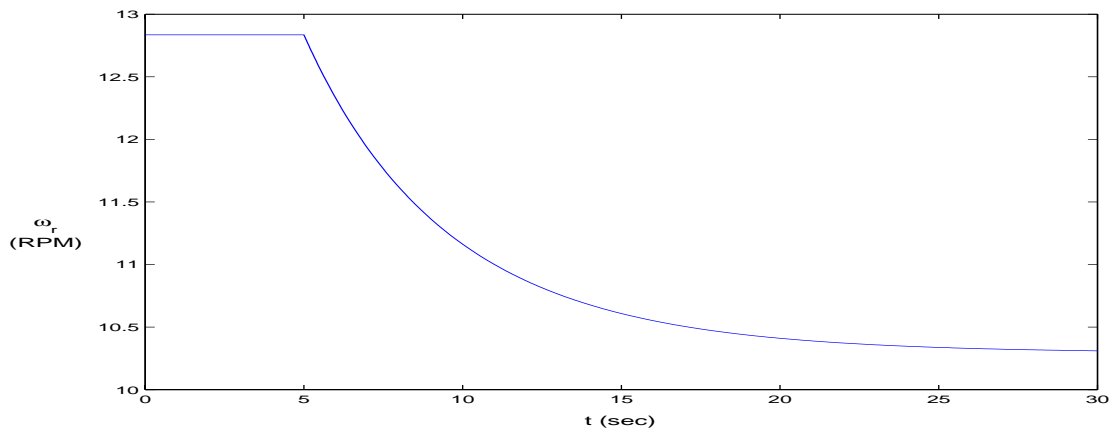
Σχήμα 5.42: Απόκριση της Η.Ε.Δ διέγερσης



Σχήμα 5.43: Απόκριση του λόγου διαμόρφωσης  $m$



Σχήμα 5.44: Απόκριση της ηλεκτρομαγνητικής ισχύος



Σχήμα 5.45: Απόκριση της ταχύτητας του δρομέα

Από τις αποκρίσεις στα σχήματα 5.42-5.45 κατ' αρχάς συμπεραίνουμε ότι το σύστημα είναι ευσταθές ενώ ισορροπεί σε μόνιμη κατάσταση μετά από περίπου 20 sec από την επιβολή της βηματικής μείωσης του ανέμου. Παρατηρώντας την απόκριση της διέγερσης στο σχήμα 5.42, είναι εμφανής ο περιορισμός της τιμής της στο  $E_{fmax} = 1.7$  α.μ. Έτσι, όταν περιοριστεί η διέγερση αρχίζει να μειώνεται η τάση στην έξοδο της γεννήτριας. Τότε τίθεται σε λειτουργία ο DC/DC μετατροπέας ανύψωσης ο οποίος αυξάνει το λόγο διαμόρφωσης  $m$  έτσι ώστε να επαναφέρει την τάση στα άκρα του πυκνωτή στην ονομαστική της τιμή, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.43. Τέλος, στα σχήματα 5.44 και 5.45 παρατηρούμε μείωση της ηλεκτρομαγνητικής ισχύος και της ταχύτητας του δρομέα αντίστοιχα, αφού έχουμε μείωση της ταχύτητας του ανέμου.

### 5.4.1 Ευστάθεια Μικρών Διαταραχών

Στον πίνακα 5.13 παρατίθενται οι ιδιοτιμές του Ιακωβιανού πίνακα A για ένα σημείο λειτουργίας, καθώς και η μεταβλητή κατάσταση που έχει το μεγαλύτερο συντελεστή συμμετοχής.

Πίνακας 5.13: Ιδιοτιμές μοντέλου για ισχύ  $P=0.15$  α.μ.

Ιδιοτιμή	Μεταβλητή Κατάστασης
-0.1948	$\omega_r$
-0.4769	$\psi_{fd}$
-5.419	$\psi_{kq}$

Από τις ιδιοτιμές που φαίνονται στον πίνακα 5.13 παρατηρούμε ότι κυρίαρχη μεταβλητή καταστάσεως είναι η ταχύτητα του δρομέα. Πιο συγκεκριμένα, για  $P=0.15$  α.μ. η κυρίαρχη ιδιοτιμή είναι η -0.1948, η οποία μεταφράζεται σε χρονική σταθερά του συστήματος, 20.5 sec. Αυτό φαίνεται καθαρά στις αποκρίσεις των μεγεθών της παρούσας παραγράφου (σχήματα 5.42-5.45).

Τέλος στον πίνακα 5.14 παρατίθενται τα δεξιά ιδιοδιανύσματα που αντιστοιχούν στις ιδιοτιμές, για το παραπάνω σημείο λειτουργίας.

Πίνακας 5.14: Δεξιά ιδιοδιανύσματα του συστήματος

Ιδιοτιμή=-5.419		
Μεταβλητή Κατάστασης	Δεξί Ιδιοδιάνυσμα	
	Μέτρο	Γωνία (Μοίρες)
$\omega_r$	0.0	0.0
$\psi_{fd}$	0.01	0.0
$\psi_{kq}$	1.0	180

Ιδιοτιμή=-0.4769		
Μεταβλητή Κατάστασης	Δεξί Ιδιοδιάνυσμα	
	Μέτρο	Γωνία (Μοίρες)
$\omega_r$	0.11	180
$\psi_{fd}$	0.99	0.0
$\psi_{kq}$	0.06	0.0



Ιδιοτιμή=-0.1948		
Μεταβλητή Κατάστασης	Δεξί Ιδιοδιάνυσμα	
	Μέτρο	Γωνία (Μοίρες)
$\omega_r$	1	180
$\psi_{fd}$	0.0	0.0
$\psi_{kq}$	0.0	0.0

Όπως παρατηρούμε από τον πίνακα 5.14, οι ιδιοτιμές είναι σε μεγάλο βαθμό αποζευγμένες, αφού σε κάθε ιδιοτιμή αντιστοιχεί μία μόνο μεταβλητή κατάσταση.

---

---

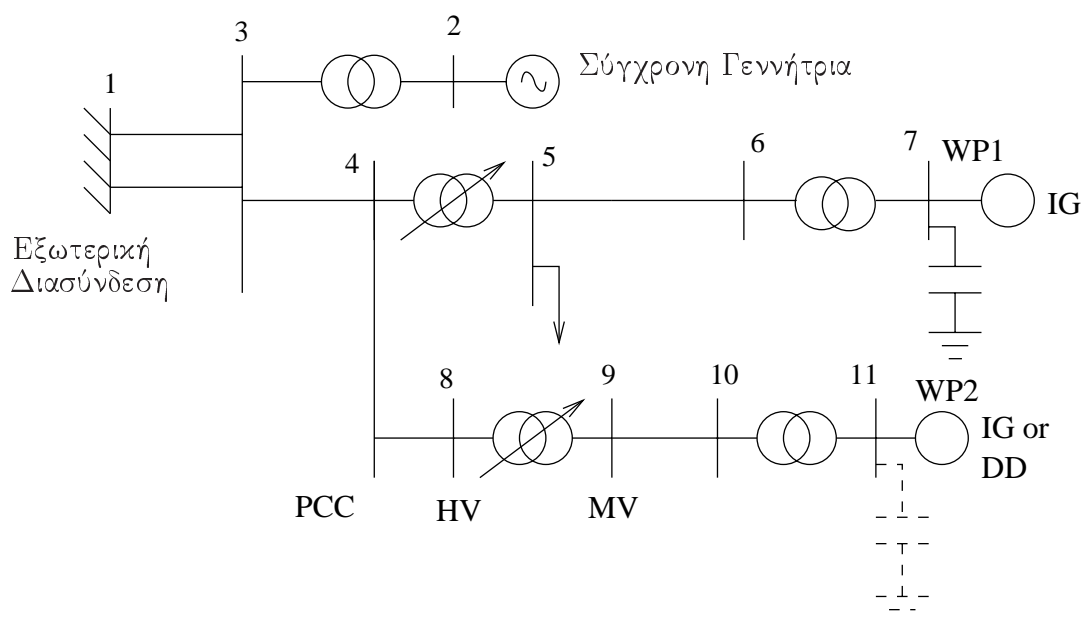
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

---

# ΜΕΛΕΤΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΑΣΘΕΝΟΥΣ ΔΙΚΤΥΟΥ

### 6.1 Περιγραφή Δικτύου

Στη συγκεκριμένη παράγραφο περιγράφεται το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε.) που θα μελετήσουμε στην παρούσα εργασία και του οποίου το μονογραμμικό διάγραμμα φαίνεται στο σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1: Τοπολογία εξεταζόμενου συστήματος

Όπως παρατηρούμε αποτελείται από έναν τοπικό συμβατικό σταθμό παραγωγής με σύγχρονη γεννήτρια ονομαστικής ισχύος 140 MW και από δύο μεγάλα αιολικά πάρκα ονομαστικής ισχύος 100 MW και 50 MW αντίστοιχα. Τα αιολικά πάρκα αναπαρίστανται από μια ισοδύναμη Α/Γ ενώ συνδέονται μέσω μετασχηματιστών ΧΤ/ΜΤ, σταθερής λήψης σε ζυγούς μέσης τάσης. Από τα δύο αιολικά πάρκα, το πρώτο (WP1) θεωρούμε ότι είναι εγκατεστημένο και αποτελείται από Α/Γ επαγωγής σταθερών στροφών, ενώ το δεύτερο (WP2) θεωρούμε ότι είναι προς εγκατάσταση. Στον τερματικό ζυγό του υπάρχοντος αιολικού πάρκου (WP1) έχουν εγκατασταθεί πυκνωτές αντιστάθμισης για να ρυθμίζουν το συντελεστή ισχύος του ζυγού στη μόνιμη κατάσταση έτσι ώστε να είναι μεγαλύτερος από 0.95 (επαγωγικός). Για τη ρύθμιση της τάσης στους ζυγούς ΜΤ χρησιμοποιούνται μετασχηματιστές ΥΤ/ΜΤ οι οποίοι είναι εξοπλισμένοι με μηχανισμό ΣΑΤΥΦ. Το τοπικό φορτίο που βρίσκεται στο ζυγό 5 λαμβάνεται ως φορτίο σταθερής αγωγιμότητας και η κατανάλωσή του για ονομαστική τάση είναι 26.97 MW και 5.75 MVar. Τέλος το σύστημα συνδέεται ασθενώς σε ένα μεγάλο διασυνδεδεμένο σύστημα μέσω δύο πανομοιότυπων γραμμών μεταφοράς.

Τα χαρακτηριστικά των γραμμών μεταφοράς, των Μ/Σ, της σύγχρονης γεννήτριας του συμβατικού σταθμού παραγωγής και των μηχανών επαγωγής των Α/Γ του εγκατεστημένου αιολικού πάρκου φαίνονται στους πίνακες 6.1, 6.2, 6.3 και 6.4.

Πίνακας 6.1: Χαρακτηριστικά γραμμών μεταφοράς

Ζυγοί	R (α.μ.)	X (α.μ.)	B (α.μ.)
1-3 (α)	0.03440	0.16260	0.0
1-3 (β)	0.03440	0.16260	0.0
3-4	0.01560	0.06747	0.04428
4-8	0.01560	0.06747	0.04428
9-10	0.10750	0.28	0.0
5-6	0.10750	0.28	0.0

Πίνακας 6.2: Χαρακτηριστικά μετασχηματιστών

Ζυγοί	R (α.μ.)	X (α.μ.)	B (α.μ.)	r <sub>0</sub> (α.μ.)
4-5	0.00410	0.11743	0.0	0.9
8-9	0.00410	0.12950	0.0	0.98750
3-2	0.00250	0.07222	0.0	1.05
6-7	0.0	0.00083	0.0	1.0
10-11	0.0	0.00167	0.0	1.02

Πίνακας 6.3: Χαρακτηριστικά συμβατικής γεννήτριας

$S_{nom}$ (MVA)	176.47	$X'_d$ (α.μ.)	0.4078
$f_{nom}$ (Hz)	50	$X'_q$ (α.μ.)	0.257
$R_s$ (α.μ.)	0.0	$T_{d0'}$ (sec)	5.84248
$X_{ls}$ (α.μ.)	0.2	$T_{q0'}$ (sec)	0.18736
$X_d$ (α.μ.)	1.759	H (sec)	4
$X_q$ (α.μ.)	1.72	D	0.03

Πίνακας 6.4: Χαρακτηριστικά μηχανών επαγωγής

$f_{nom}$ (Hz)	$R_s$ (α.μ.)	$X_{ls}$ (α.μ.)	$X_m$ (α.μ.)	$R_r$ (α.μ.)	$X_{lr}$ (α.μ.)	H (συνολικό) (sec)
50	0.01	0.1	3	0.01	0.08	3

## 6.2 Μελέτη Βραχυπρόθεσμης Αστάθειας Τάσης

Για τη μελέτη πιθανής βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης θεωρούμε ότι το μέγιστο στιγμιαίο ρεύμα διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας έχει μικρή τιμή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, σε περίπτωση σφάλματος, η υποστήριξη της τάσεως από τη τοπική σύγχρονη γεννήτρια να είναι περιορισμένη κάτι που μπορεί να οδηγήσει ευκολότερα στην απώλεια του σημείου ισορροπίας των μηχανών επαγωγής του υπάρχοντος αιολικού πάρκου (WP1).

Στο αρχικό σημείο λειτουργίας του συστήματος που εξετάζουμε στην παρούσα παράγραφο θεωρούμε ότι η τοπική σύγχρονη γεννήτρια καθώς και τα δύο αιολικά πάρκα παράγουν την ονομαστική τους ισχύ. Στην κατάσταση αυτή το εξεταζόμενο σύστημα εξάγει ενεργό ισχύ και εισάγει άεργο ισχύ από το διασυνδεδεμένο σύστημα. Τη χρονική στιγμή  $t=5$  sec θεωρούμε ότι υπάρχει απώλεια της μίας από τις 2 ισοδύναμες γραμμές διασύνδεσης (βλ σχήμα 6.1) ενώ κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων η ταχύτητα του ανέμου θεωρείται σταθερή. Η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος προσομοιώθηκε σε τρεις περιπτώσεις:

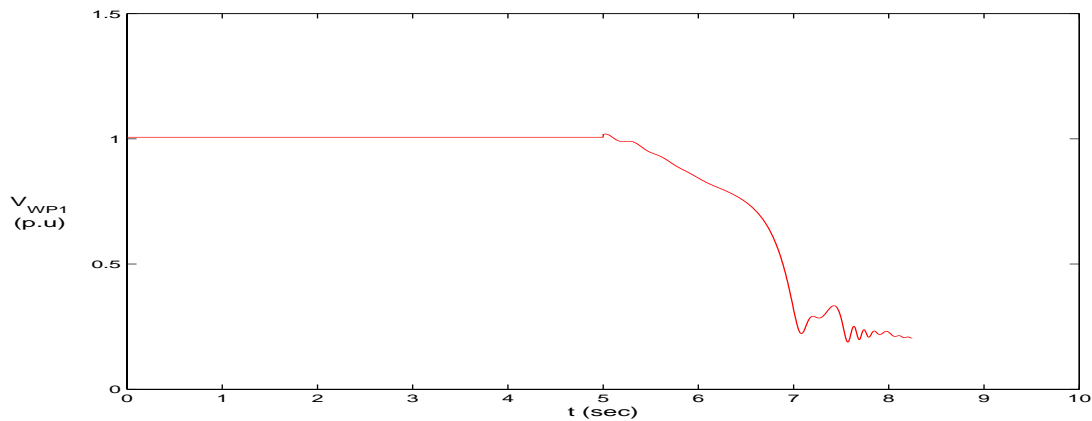
- Το δεύτερο αιολικό πάρκο (WP2) διαθέτει, όπως και το υπάρχον αιολικό πάρκο, Α/Γ σταθερών στροφών με μηχανές επαγωγής.
- Το δεύτερο αιολικό πάρκο (WP2) διαθέτει Α/Γ μεταβλητών στροφών με σύγχρονες μηχανές και με πλήρη μετατροπέα με ρύθμιση του συντελεστή ισχύος στη μονάδα.
- Το δεύτερο αιολικό πάρκο (WP2) διαθέτει Α/Γ μεταβλητών στροφών με σύγχρονες μηχανές και με πλήρη μετατροπέα με ρύθμιση της τάσης δικτύου.

Το λογισμικό προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε βασίζεται σε εκπαιδευτικό λογισμικό προσομοίωσης που έχει αναπτυχθεί σε περιβάλλον Matlab/Simulink σε συνεργασία με το

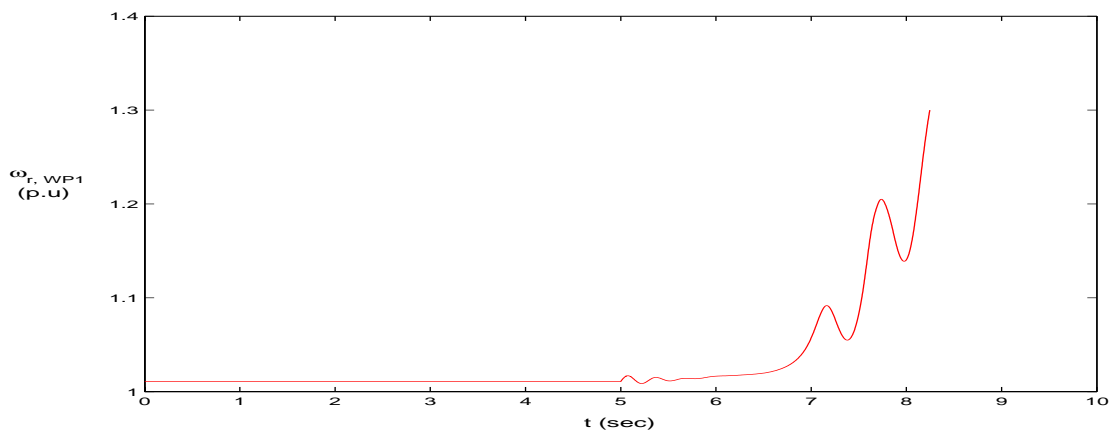
Πανεπιστήμιο της Λιέγης [43] και έχει προσαρμοστεί για ερευνητικούς σκοπούς στο πακέτο WHSSP [17], που είναι κατάλληλο για προσομοιώσεις θεμελιώδους συχνότητας αιολικών ή υβριδικών Σ.Η.Ε. [44].

### 6.2.1 Αιολικό Πάρκο με Α/Γ Σταθερών Στροφών

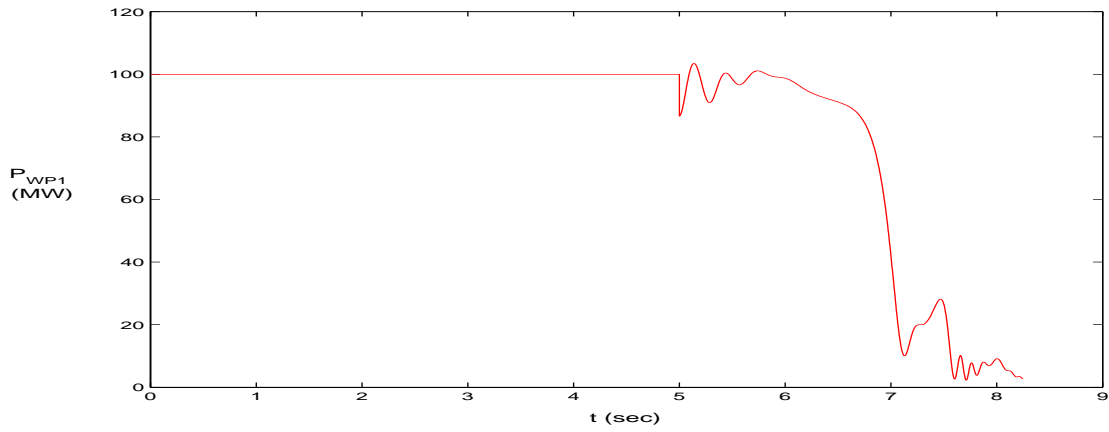
Στην παρούσα παράγραφο εξετάζουμε την περίπτωση κατά την οποία το προς εγκατάσταση αιολικό πάρκο αποτελείται από Α/Γ σταθερών στροφών με μηχανές επαγωγής. Στα σχήματα 6.2-6.9 παρατίθενται οι αποκρίσεις της τάσης, της ταχύτητας, της ενεργού ισχύος και της αέργου ισχύος των δύο αιολικών πάρκων.



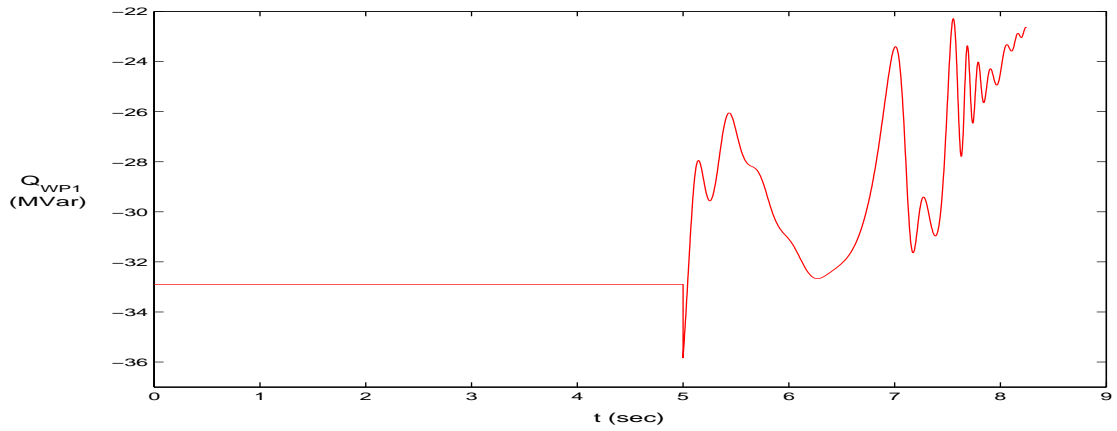
Σχήμα 6.2: Τάση ζυγού σύνδεσης του πρώτου αιολικού πάρκου



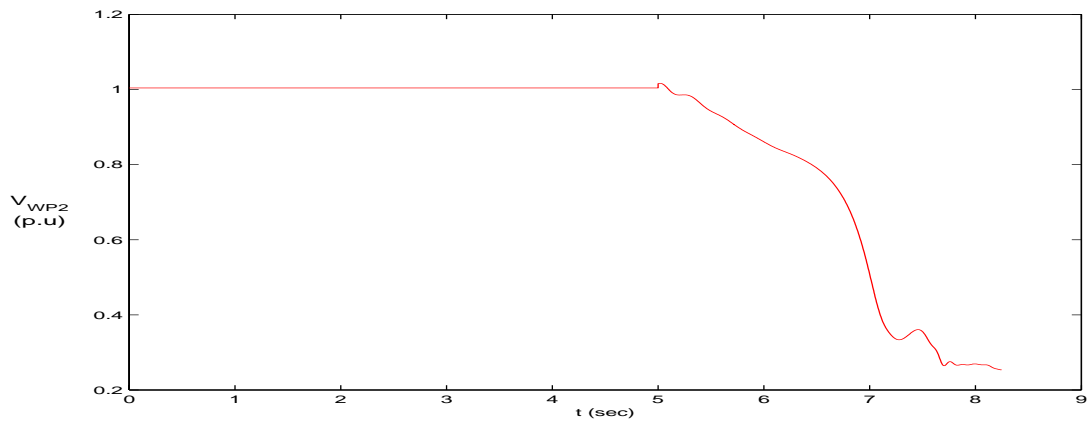
Σχήμα 6.3: Ταχύτητα Α/Γ του πρώτου αιολικού πάρκου



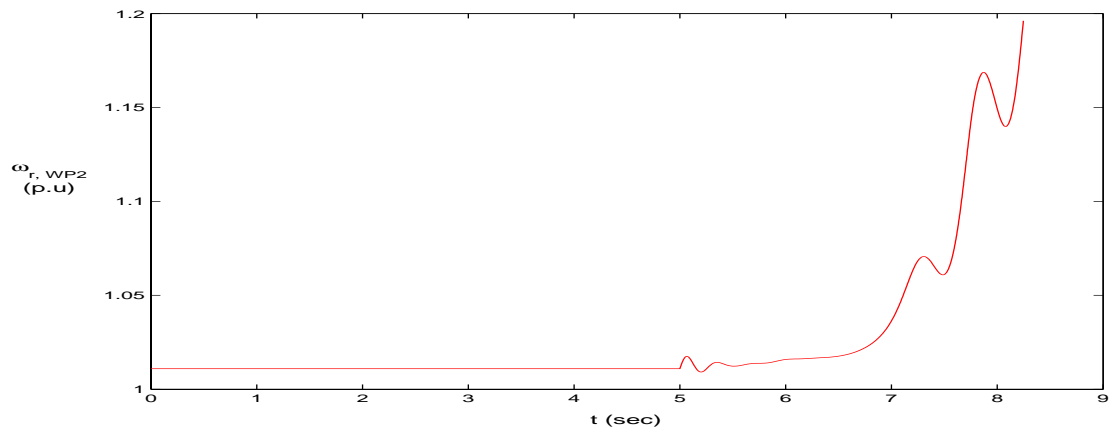
Σχήμα 6.4: Ενεργός ισχύς του πρώτου αιολικού πάρκου



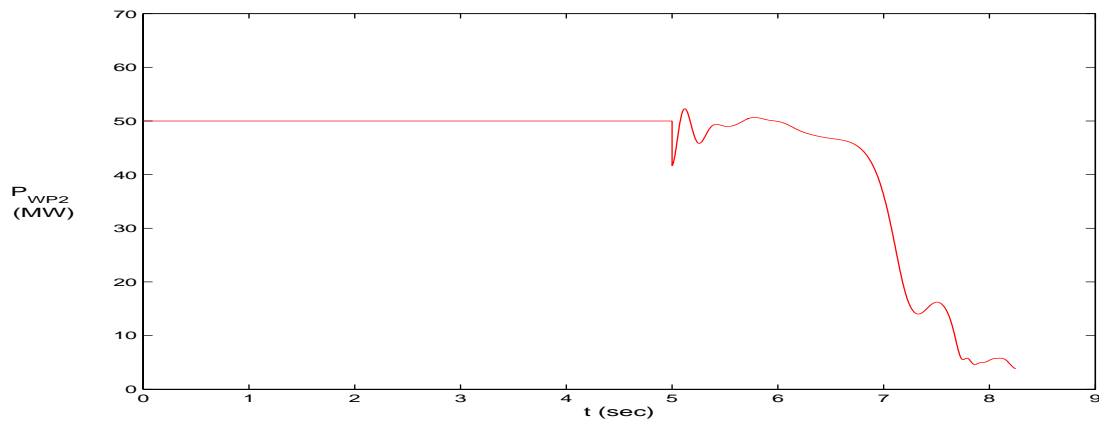
Σχήμα 6.5: Άεργος ισχύς του πρώτου αιολικού πάρκου



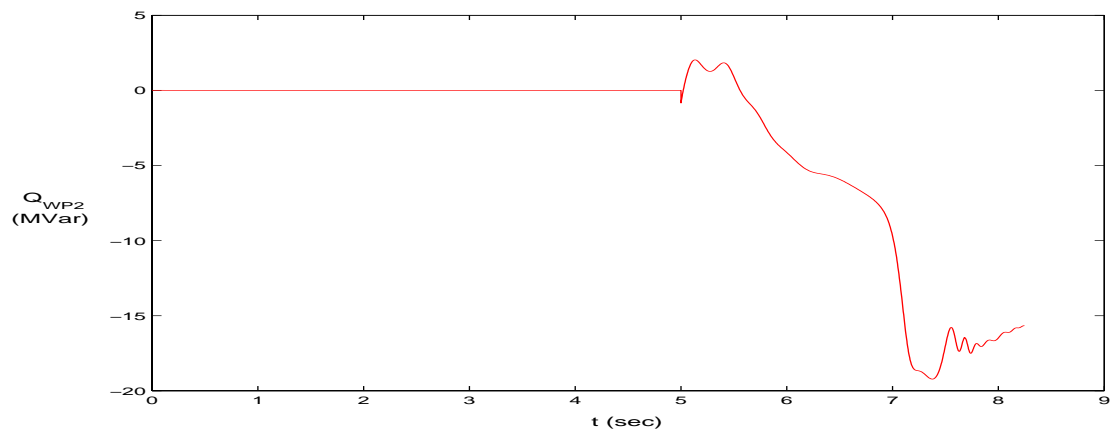
Σχήμα 6.6: Τάση ζυγού σύνδεσης του δεύτερου αιολικού πάρκου



Σχήμα 6.7: Ταχύτητα Α/Γ του δεύτερου αιολικού πάρκου



Σχήμα 6.8: Ενεργός ισχύς του δεύτερου αιολικού πάρκου

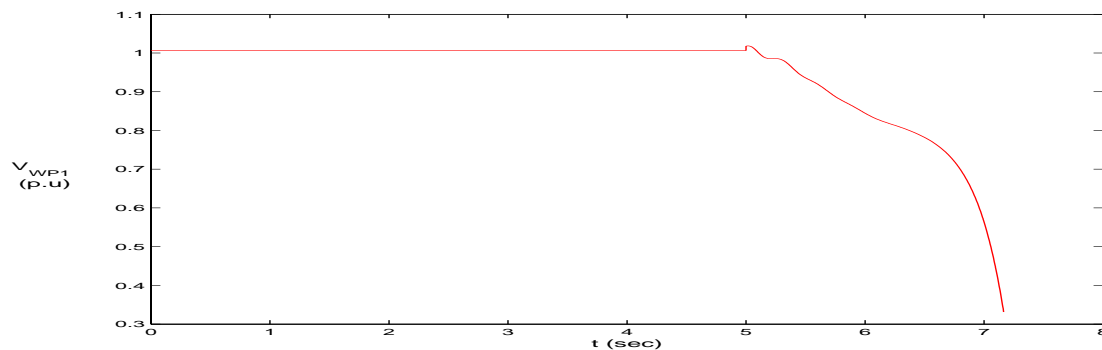


Σχήμα 6.9: Άεργος ισχύς του δεύτερου αιολικού πάρκου

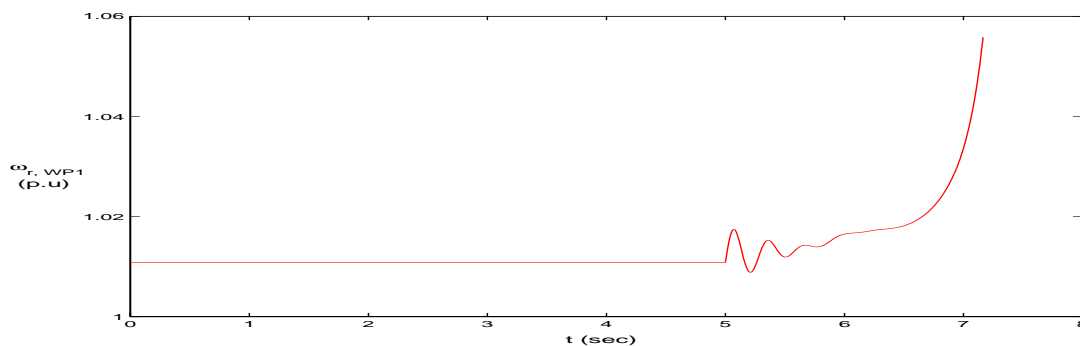
Όπως παρατηρούμε από τα σχήματα 6.2 και 6.6 η απώλεια της γραμμής διασύνδεσης οδηγεί σε κατάρρευση των τάσεων στο σύστημα. Επίσης στις καμπύλες 6.3 και 6.7 παρατηρούμε την επιτάχυνση των γεννητριών επαγωγής των δύο αιολικών πάρκων καθώς δεν έλκονται πλέον από το ευσταθές σημείο ισορροπίας. Τέλος στα σχήματα 6.4, 6.8 και 6.5, 6.9 παρουσιάζεται η ενεργός και άεργος ισχύς αντίστοιχα των δύο αιολικών πάρκων. Επομένως συμπεραίνουμε ότι από πλευράς ασφάλειας τάσεως το νέο αιολικό πάρκο δεν πρέπει να αποτελείται από Α/Γ σταθερών στροφών με μηχανές επαγωγής.

### 6.2.2 Αιολικό Πάρκο με Α/Γ με Πλήρη Μετατροπέα και Ρύθμιση Συντελεστή Ισχύος

Σε αυτή την περίπτωση θεωρούμε ότι το νέο αιολικό πάρκο απαρτίζεται από Α/Γ μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια και πλήρη μετατροπέα, ο οποίος ρυθμίζει τον συντελεστή ισχύος του ζυγού που συνδέεται το αιολικό πάρκο ώστε να είναι μοναδιαίος. Στα σχήματα 6.10, 6.11, 6.12 και 6.13 παρατίθενται οι αποκρίσεις της τάσης, της ταχύτητας, της ενεργού ισχύος και της άεργου ισχύος του αιολικού πάρκου με τις Α/Γ σταθερών στροφών. Τέλος, στο σχήμα 6.14 φαίνεται το ρεύμα του αντιστροφέα των Α/Γ μεταβλητών στροφών του δεύτερου αιολικού πάρκου.

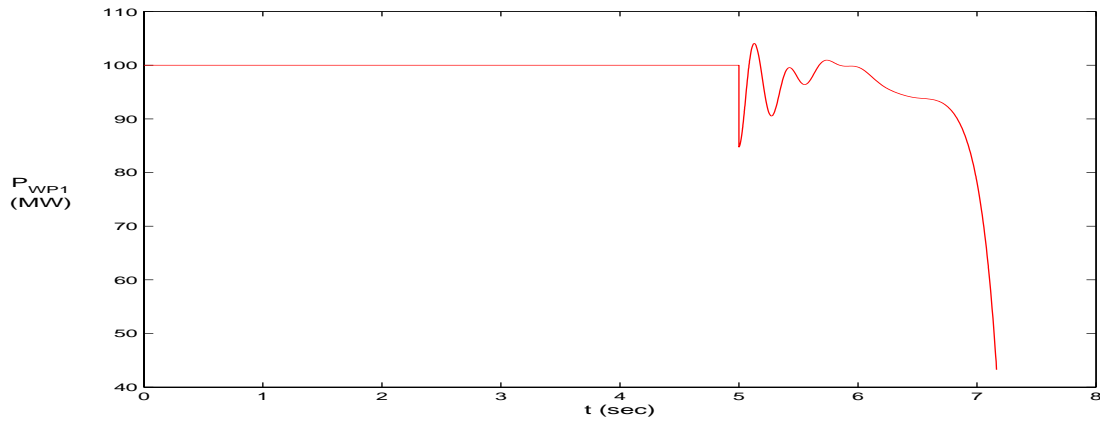


Σχήμα 6.10: Τάση ζυγού σύνδεσης του πρώτου αιολικού πάρκου

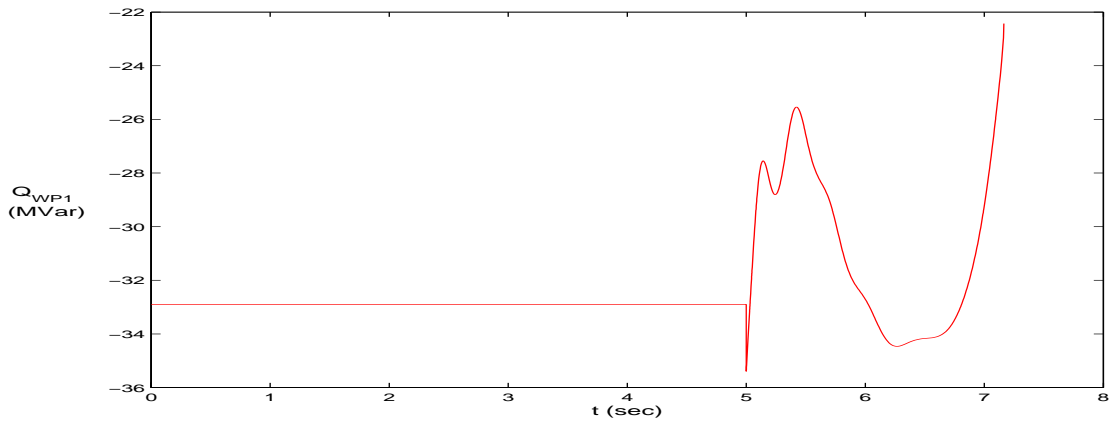


Σχήμα 6.11: Ταχύτητα Α/Γ του πρώτου αιολικού πάρκου

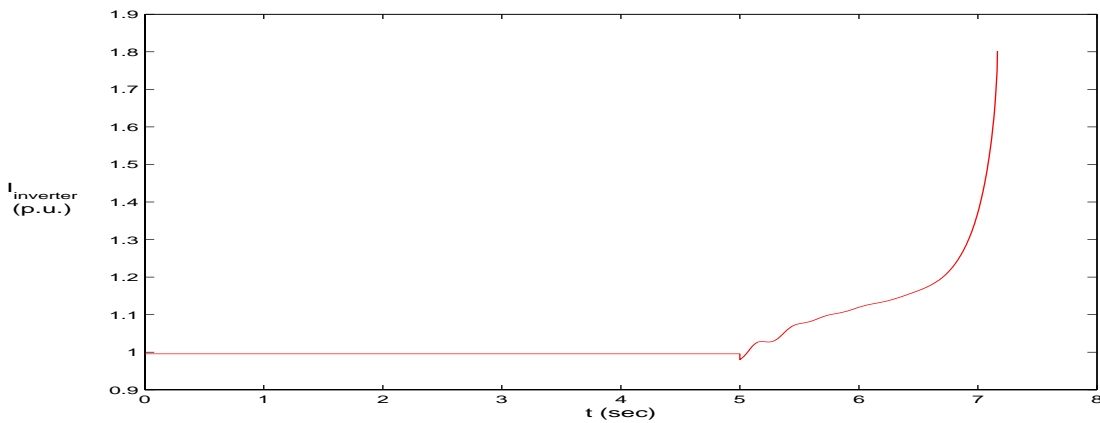




Σχήμα 6.12: Ενεργός ισχύς του πρώτου αιολικού πάρκου



Σχήμα 6.13: Άεργος ισχύς του πρώτου αιολικού πάρκου

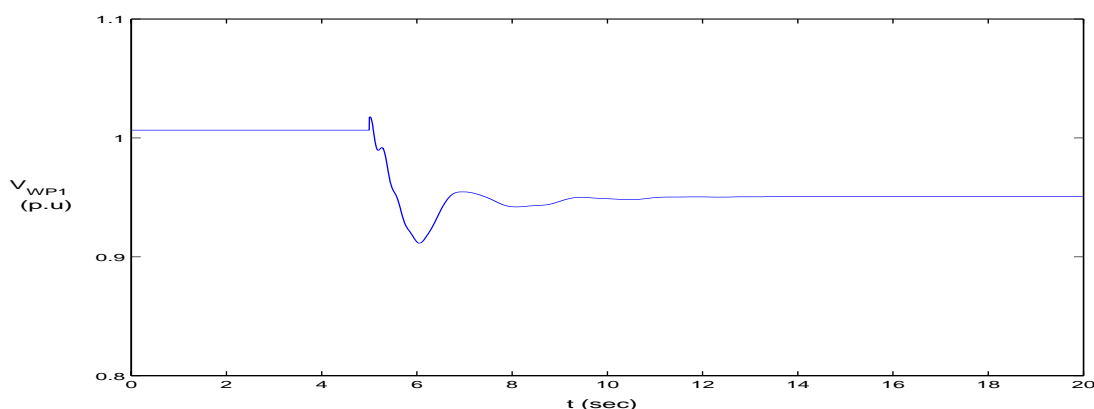


Σχήμα 6.14: Ρεύμα Αντιστροφή Α/Γ του δεύτερου αιολικού πάρκου

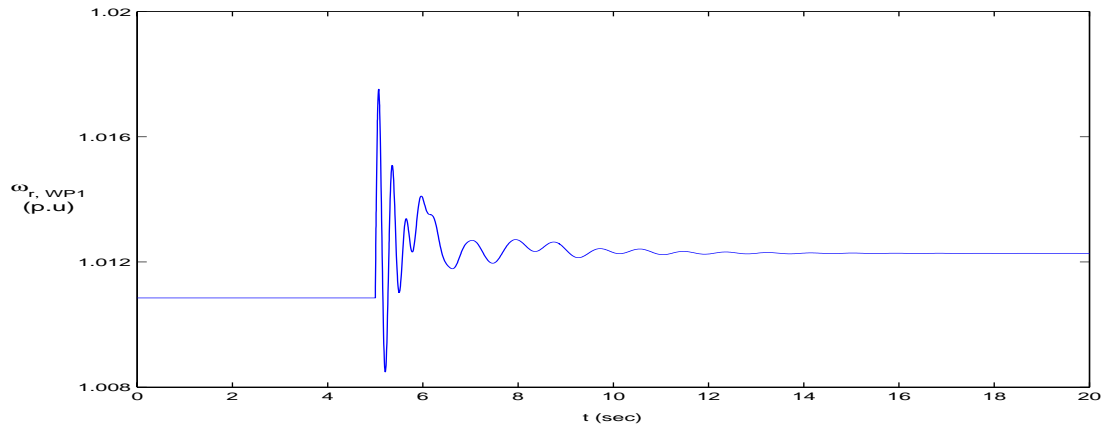
Όπως παρατηρούμε από το σχήμα 6.10 και σε αυτήν την περίπτωση οι τάσεις του συστήματος καταρρέουν. Επίσης στην καμπύλη 6.11 παρατηρούμε την επιτάχυνση των γεννητριών επαγωγής του πρώτου αιολικού πάρκου που οφείλεται στην πτώση τάσεως στον αντίστοιχο ζυγό. Αντίθετα η ταχύτητα των Α/Γ του δεύτερου αιολικού πάρκου είναι σταθερή αφού και η ταχύτητα του ανέμου είναι σταθερή και η δυναμική των Α/Γ είναι αποζευγμένη από το δίκτυο. Το ίδιο ισχύει και για την ενεργό ισχύ του δεύτερου αιολικού πάρκου. Η άεργος ισχύς του δεύτερου αιολικού πάρκου παραμένει επίσης σταθερή, αφού ο PWM μετατροπέας διατηρεί τον συντελεστή ισχύος του δεύτερου αιολικού πάρκου μοναδιαίο. Αντίθετα η ενεργός και άεργος ισχύς του πρώτου αιολικού πάρκου μεταβάλλονται, όπως φαίνεται στα σχήματα 6.12 και 6.13. Τέλος όπως παρατηρούμε από το σχήμα 6.14 το ρεύμα του αντιστροφέα ξεπερνά τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή ( $I_{max} = 1.17$  α.μ.) που υπολογίστηκε στην παράγραφο 3.4.1. Επομένως συμπεραίνουμε ότι παρά τη χρήση Α/Γ μεταβλητών στροφών με έλεγχο της τιμής του συντελεστή ισχύος, το σύστημα δεν είναι ασφαλές από πλευράς ευστάθειας τάσεως.

### 6.2.3 Αιολικό Πάρκο με Α/Γ με Πλήρη Μετατροπέα και Ρύθμιση Τάσης Δικτύου

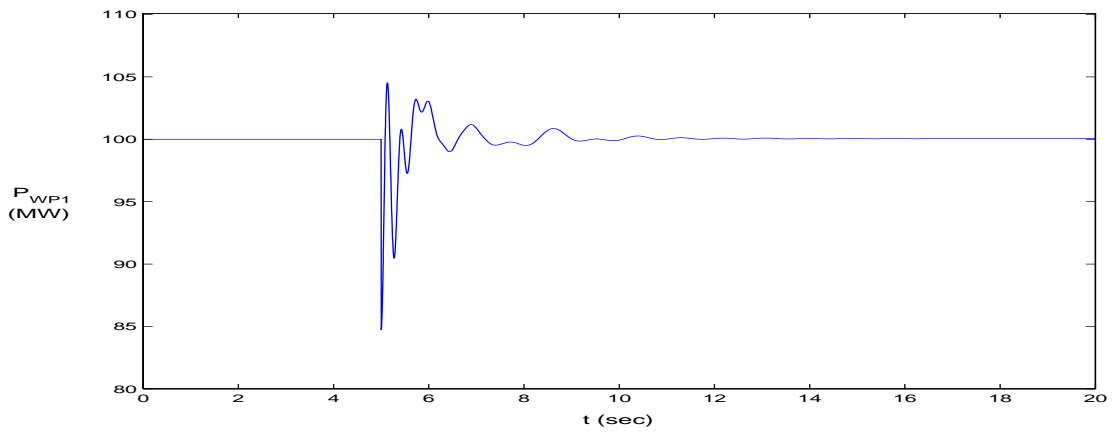
Όπως στην προηγούμενη παράγραφο έτσι και σε αυτή την περίπτωση θεωρούμε ότι το νέο αιολικό πάρκο απαρτίζεται από Α/Γ μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια και πλήρη μετατροπέα. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι τώρα ο PWM μετατροπέας που βρίσκεται από την πλευρά του δικτύου ελέγχει την τιμή της τάσης του ζυγού στον οποίο συνδέεται το αιολικό πάρκο. Στα σχήματα 6.15, 6.16, 6.17 και 6.18 παρατίθενται οι αποκρίσεις της τάσης, της ταχύτητας, της ενεργού ισχύος και της άεργος ισχύος του αιολικού πάρκου με τις Α/Γ σταθερών στροφών. Επίσης στο σχήμα 6.19 φαίνεται η άεργος ισχύς που παρέχει το δεύτερο αιολικό πάρκο στο δίκτυο για να συμβάλει στην διατήρηση της ευστάθειάς του. Τέλος, στο σχήμα 6.20 φαίνεται το ρεύμα του αντιστροφέα των Α/Γ μεταβλητών στροφών του δεύτερου αιολικού πάρκου.



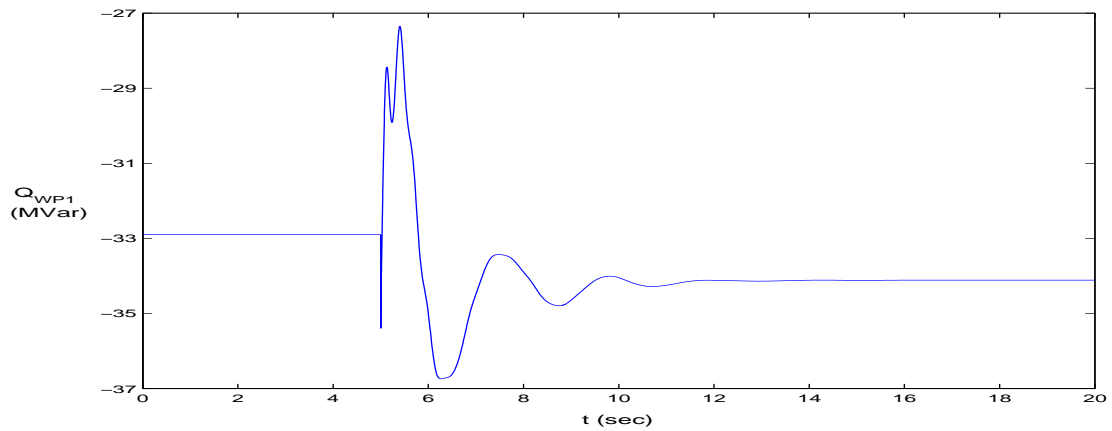
Σχήμα 6.15: Τάση ζυγού σύνδεσης του πρώτου αιολικού πάρκου



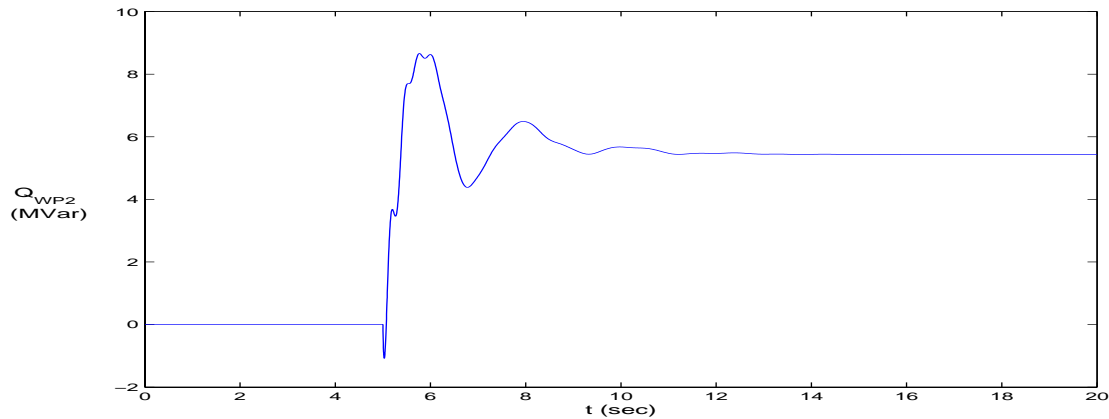
Σχήμα 6.16: Ταχύτητα Α/Γ του πρώτου αιολικού πάρκου



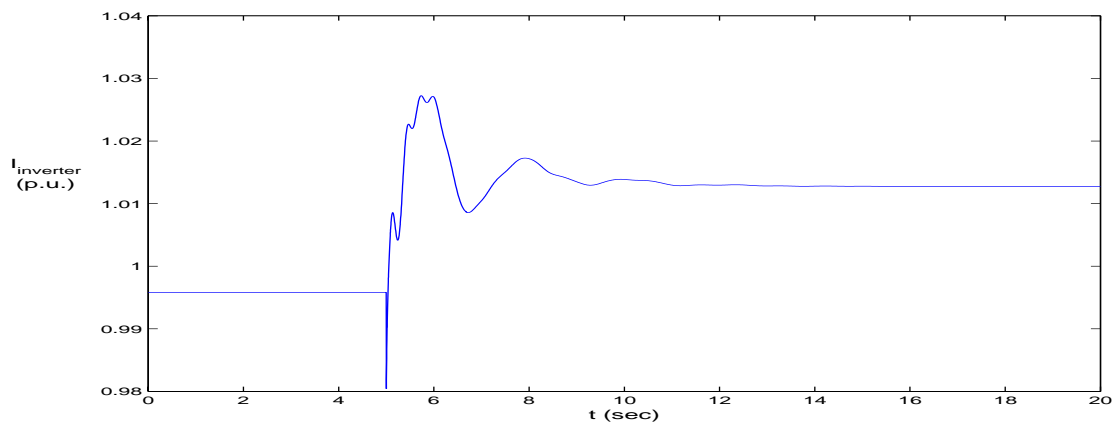
Σχήμα 6.17: Ενεργός ισχύς του πρώτου αιολικού πάρκου



Σχήμα 6.18: Άεργος ισχύς του πρώτου αιολικού πάρκου



Σχήμα 6.19: Άεργος ισχύς του δεύτερου αιολικού πάρκου



Σχήμα 6.20: Ρεύμα Αντιστροφεία Α/Γ του δεύτερου αιολικού πάρκου

Όπως συμπεραίνουμε από τις παραπάνω αποκρίσεις σε αυτήν την περίπτωση το σύστημα είναι ασφαλές από πλευράς ευστάθειας τάσεως. Πιο συγκεκριμένα όπως φαίνεται στο σχήμα 6.15 η τάση στο ζυγό σύνδεσης του πρώτου αιολικού πάρκου ισορροπεί σε νέο σημείο, διαφορετικό από το αρχικό, καθώς όπως εξηγήσαμε στην παράγραφο 4.3.2 για τον έλεγχο της τάσης χρησιμοποιήθηκε P και όχι PI ελεγκτής. Όσον αφορά στην ταχύτητα και την ενεργό ισχύ των Α/Γ του δεύτερου αιολικού πάρκου, αυτές είναι σταθερές αφού και η ταχύτητα του ανέμου είναι σταθερή και η δυναμική των Α/Γ είναι αποζευγμένη από το δίκτυο. Η άεργος ισχύς του δεύτερου αιολικού πάρκου μεταβάλλεται, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.19, έτσι ώστε να συμβάλλει στην αποφυγή της κατάρρευσης των τάσεων του συστήματος. Επίσης η ενεργός και άεργος ισχύς του πρώτου αιολικού πάρκου μεταβάλλονται όπως φαίνεται στα σχήματα 6.17 και 6.18. Τέλος, όπως παρατηρούμε από το σχήμα 6.20 το ρεύμα του αντιστροφεία είναι μέσα στα αποδεκτά όρια και δεν ξεπερνάει την μέγιστη αποδεκτή τιμή (1.17 α.μ.) που υπολογίσαμε στην παράγραφο 3.4.1. Επομένως συμπεραίνουμε

ότι για την ευστάθεια του συστήματος είναι απαραίτητο οι νέες Α/Γ μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα να αξιοποιούν την ικανότητα παραγωγής αέργου ισχύος, ώστε να κρατούν σταθερή την τιμή της τάσης εξόδου τους, εγγέροντας στο δίκτυο την κατάλληλη ποσότητα αέργου ισχύος.

Σε αυτό το σημείο να επισημάνουμε ότι τα παραπάνω αποτελέσματα είναι ταυτόσημα και για τα δύο μοντέλα Α/Γ που αναπτύχθηκαν στην παρούσα εργασία (βλ παραγράφους 3.5.1 και 3.5.2). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε αυτές τις προσομοιώσεις η ταχύτητα του ανέμου θεωρήθηκε σταθερή, με αποτέλεσμα η δυναμική των Α/Γ να είναι πλήρως αποζευγμένη από τη δυναμική του δικτύου.

### 6.3 Προσδιορισμός Μέγιστης Αιολικής Διείσδυσης

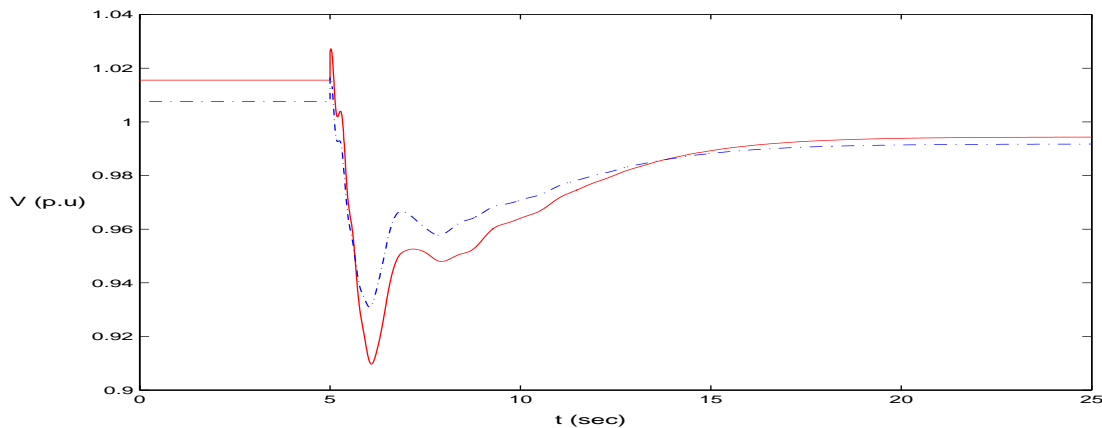
Όπως συμπεράναμε από την προηγούμενη ενότητα το όριο της αιολικής διείσδυσης μειώνεται στην περίπτωση που το νέο αιολικό πάρκο θα αποτελείται από Α/Γ σταθερών στροφών με γεννήτριες επαγωγής, ή από Α/Γ μεταβλητών στροφών με έλεγχο του συντελεστή ισχύος. Σκοπός αυτής της ενότητας είναι η εύρεση της μέγιστης αιολικής διείσδυσης στις περιπτώσεις αυτές.

Σε αυτό το σημείο να τονιστεί ότι μια ολοκληρωμένη μέθοδος μελέτης της ασφάλειας τάσεως σε ένα Σ.Η.Ε είναι ο κανόνας του N-1, όπου N ο αριθμός των στοιχείων που συνθέτουν το Σ.Η.Ε. όπως π.χ. μετασχηματιστές, γεννήτριες, γραμμές μεταφοράς κτλ. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή θα πρέπει να μελετηθεί η απόκριση του υπό μελέτη συστήματος σε κάθε πιθανή διαταραχή. Στην εργασία αυτή η ασφάλεια τάσεως θα μελετηθεί επιλέγοντας ένα ενδεικτικό σενάριο διαταραχής, το οποίο συνίσταται στην απώλεια της μίας από τις δύο γραμμές σύνδεσης με το διασυνδεδεμένο σύστημα, διαταραχή που θεωρείται αρκετά σοβαρή. Η μελέτη όλων των πιθανών διαταραχών ξεφεύγει από τους σκοπούς της διπλωματικής αυτής εργασίας, καθώς η ανάλυση που ακολουθεί για τη μία ενδεικτική διαταραχή μπορεί να εφαρμοστεί χωρίς διαφοροποίηση και για τις υπόλοιπες.

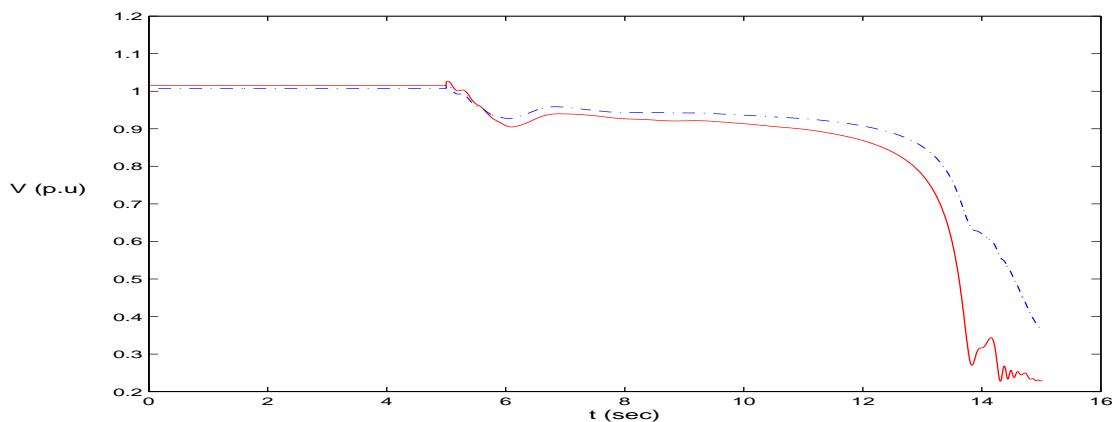
#### 6.3.1 Αιολικό Πάρκο με Α/Γ Σταθερών Στροφών

Αυξάνουμε την ονομαστική ισχύ του αιολικού πάρκου από 30 MW και άνω με βήμα αύξησης 1 MW και μελετάμε σε κάθε επίπεδο αιολικής διείσδυσης την ασφάλεια τάσεως ύστερα από την ενδεικτική διαταραχή που έχει ήδη περιγραφεί. Από τη μελέτη αυτή παρατηρούμε ότι διατηρείται η ευστάθεια τάσεως του συστήματος μέχρι αιολικής διείσδυσης ονομαστικής ισχύος ίσης με 37 MW. Αντίθετα για αιολική διείσδυση ονομαστικής ισχύος ίση με 38 MW εμφανίζεται αστάθεια τάσεως. Επομένως το όριο ασφάλειας τάσεως του συστήματος για την υπόψη διαταραχή είναι ίσο με 37 MW (με ακρίβεια 1 MW). Στη συνέχεια παραθέτουμε τα αποτελέσματα της ανάλυσης ασφάλειας τάσεως για τα εξής κρίσιμα επίπεδα ονομαστικής ισχύος του υπό εγκατάσταση αιολικού πάρκου:

- 37 MW, ισχύς η οποία αποτελεί το όριο ασφαλείας τάσεως.
- 38 MW, ισχύς στην οποία πρωτοεμφανίζεται αστάθεια τάσεως στην απόκριση του συστήματος μετά τη διαταραχή που εξετάζουμε.



Σχήμα 6.21: Τάσεις των ζυγών σύνδεσης του πρώτου (κόκκινη συνεχής γραμμή) και του δεύτερου αιολικού πάρκου (μπλέ διακεκομμένη γραμμή) για  $P_{WP2}=37$  MW



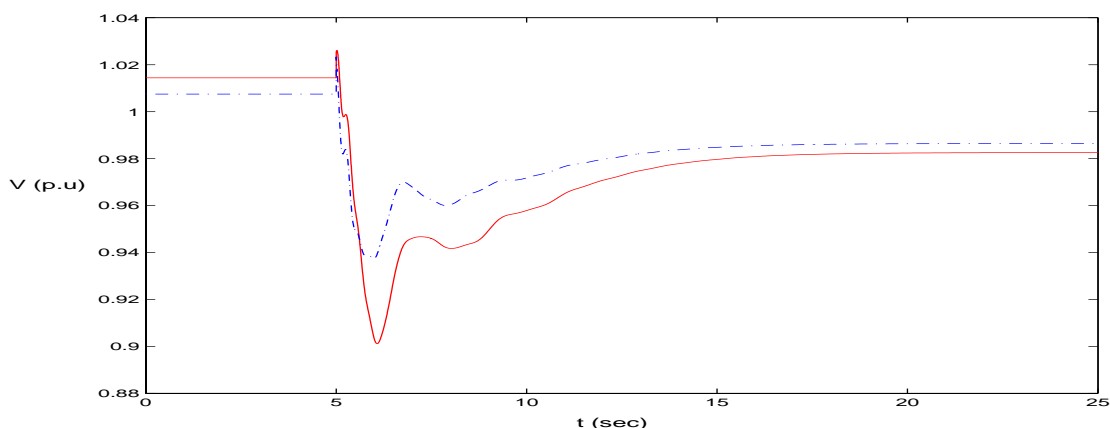
Σχήμα 6.22: Τάσεις των ζυγών σύνδεσης του πρώτου (κόκκινη συνεχής γραμμή) και του δεύτερου αιολικού πάρκου (μπλέ διακεκομμένη γραμμή) για  $P_{WP2}=38$  MW

Στα σχήματα 6.21 και 6.22 φαίνεται η τάση στους ζυγούς σύνδεσης των δύο αιολικών πάρκων για τις δύο προαναφερθείσες περιπτώσεις. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι πράγματι για αιολική διείσδυση του δεύτερου πάρκου ίση με 38 MW έχουμε κατάρρευση των τάσεων, ενώ για αιολική διείσδυση ίση με 37 MW το σύστημα παραμένει ευσταθές.

### 6.3.2 Αιολικό Πάρκο με Α/Γ με Πλήρη Μετατροπέα και Ρύθμιση Συντελεστή Ισχύος

Ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο παρατηρούμε ότι διατηρείται η ευστάθεια τάσεως του συστήματος μέχρι αιολικής διείσδυσης ονομαστικής ισχύος ίσης με 39 MW. Αντίθετα για αιολική διείσδυση ονομαστικής ισχύος ίση με 40 MW εμφανίζεται αστάθεια τάσεως. Επομένως το όριο ασφάλειας τάσεως του συστήματος για την υπόψη διαταραχή είναι ίσο με 39 MW (με ακρίβεια 1 MW). Στη συνέχεια παραθέτουμε τα αποτελέσματα της ανάλυσης ασφάλειας τάσεως για τα εξής κρίσιμα επίπεδα ονομαστικής ισχύος του υπό εγκατάσταση αιολικού πάρκου:

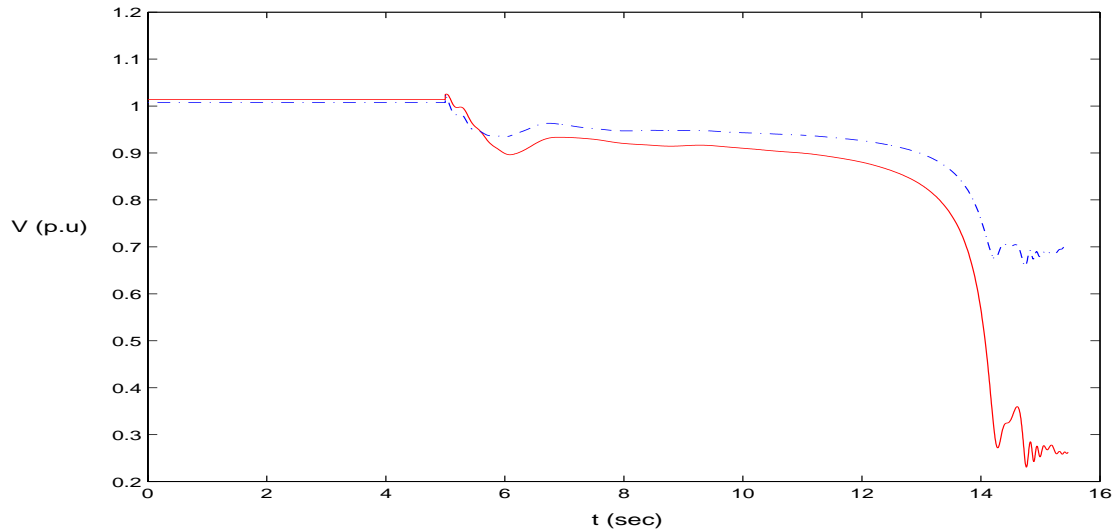
- 39 MW, ισχύς η οποία αποτελεί το όριο ασφάλειας τάσεως
- 40 MW, ισχύς στην οποία πρωτοεμφανίζεται αστάθεια τάσεως στην απόκριση του συστήματος μετά τη διαταραχή που εξετάζουμε.



Σχήμα 6.23: Τάσεις των ζυγών σύνδεσης του πρώτου (κόκκινη συνεχής γραμμή) και του δεύτερου αιολικού πάρκου (μπλέ διακεκομμένη γραμμή) για  $P_{WP2}=39$  MW

Στα σχήματα 6.23 και 6.24 φαίνεται η τάση στους ζυγούς σύνδεσης των δύο αιολικών πάρκων για τις δύο παραπάνω περιπτώσεις. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι πράγματι για αιολική διείσδυση του δεύτερου πάρκου ίση με 40 MW έχουμε κατάρρευση των τάσεων, ενώ για αιολική διείσδυση ίση με 39 MW το σύστημα παραμένει ευσταθές. Σε αυτό το σημείο να παρατηρήσουμε ότι το όριο διείσδυσης της αιολικής ενέργειας σε αυτήν την περίπτωση είναι μεγαλύτερο από την προηγούμενη περίπτωση όπου το προς εγκατάσταση αιολικό πάρκο θεωρήσαμε ότι αποτελείται από Α/Γ σταθερών στροφών με μηχανές επαγωγής.

Τέλος, να σημειώσουμε ότι για την περίπτωση του αιολικού πάρκου με Α/Γ με πλήρη μετατροπέα που ρυθμίζουν την τάση του δικτύου δεν υπάρχει όριο ευστάθειας τάσεως.



Σχήμα 6.24: Τάσεις των ζυγών σύνδεσης του πρώτου (κόκκινη συνεχής γραμμή) και του δεύτερου αιολικού πάρκου (μπλέ διακεκομμένη γραμμή) για  $P_{WP2}=40$  MW

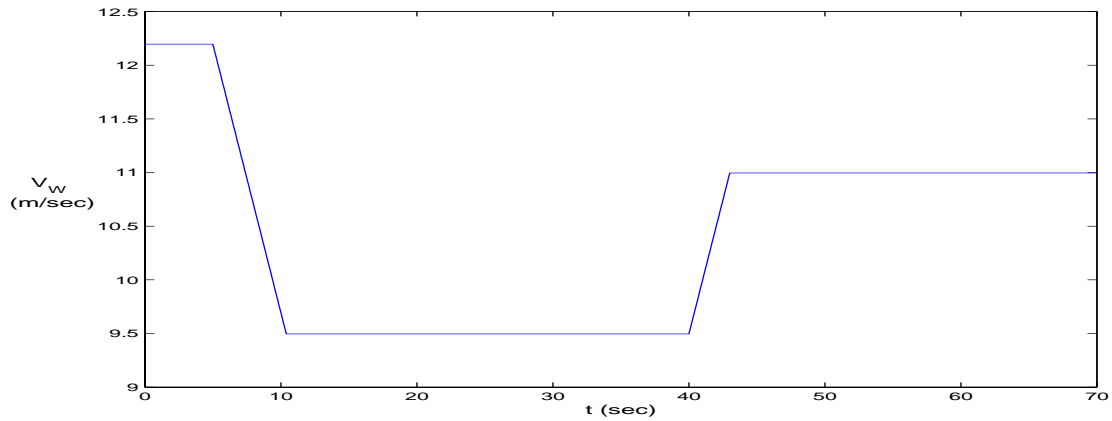
## 6.4 Μελέτη Απόκρισης Δικτύου για Μεταβλητή Ταχύτητα Ανέμου

Όπως έχουμε προαναφέρει, σε μελέτες συστημάτων με αιολική διείσδυση όπου η ταχύτητα του ανέμου λαμβάνεται σταθερή, η δυναμική των Α/Γ είναι αποζευγμένη από τη δυναμική του δικτύου με αποτέλεσμα η μοντελοποίηση της Α/Γ να μην επηρεάζει τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Έτσι για να συμμετέχει η δυναμική της Α/Γ στη δυναμική του συστήματος πρέπει η ταχύτητα του ανέμου να είναι μεταβλητή. Στην συγκεκριμένη παράγραφο μελετάμε την απόκριση του συστήματος του σχήματος 6.1 στις εξής περιπτώσεις:

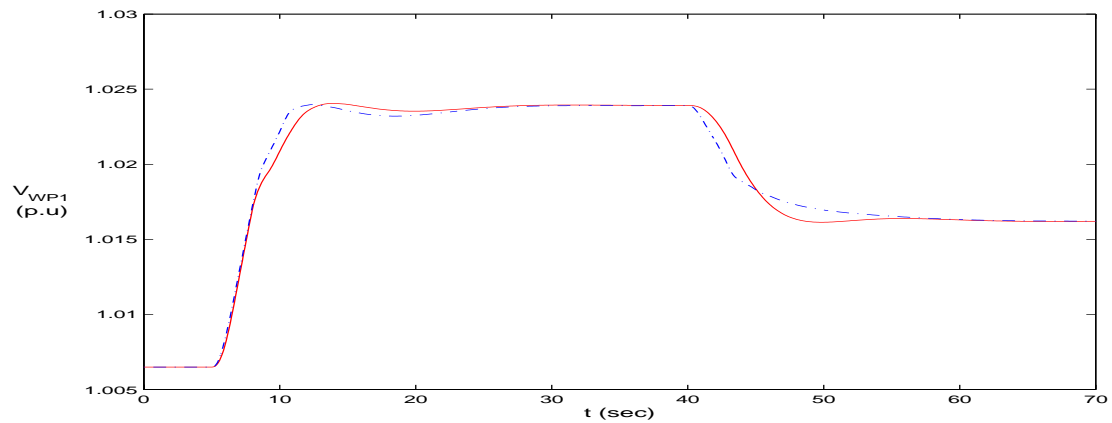
- το δεύτερο αιολικό πάρκο (WP2) αποτελείται από σύγχρονες Α/Γ με αυτόματο ρυθμιστή τάσης (βλ. παράγραφο 3.5.1).
- το δεύτερο αιολικό πάρκο (WP2) αποτελείται από σύγχρονες Α/Γ με έλεγχο της ενεργού ισχύος από τη διέγερση (βλ. παράγραφο 3.5.2).

Σε αυτές τις προσομοιώσεις η ταχύτητα του ανέμου στο δεύτερο αιολικό πάρκο έχει την μορφή του σχήματος 6.25. Στα σχήματα 6.26 και 6.27 φαίνεται η απόκριση της τάσης των ζυγών σύνδεσης των δύο αιολικών πάρκων για την παραπάνω μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου, ενώ στα σχήματα 6.28 και 6.29 φαίνεται η ενεργός ισχύς και η ταχύτητα των Α/Γ για τις δύο προαναφερθείσες περιπτώσεις.

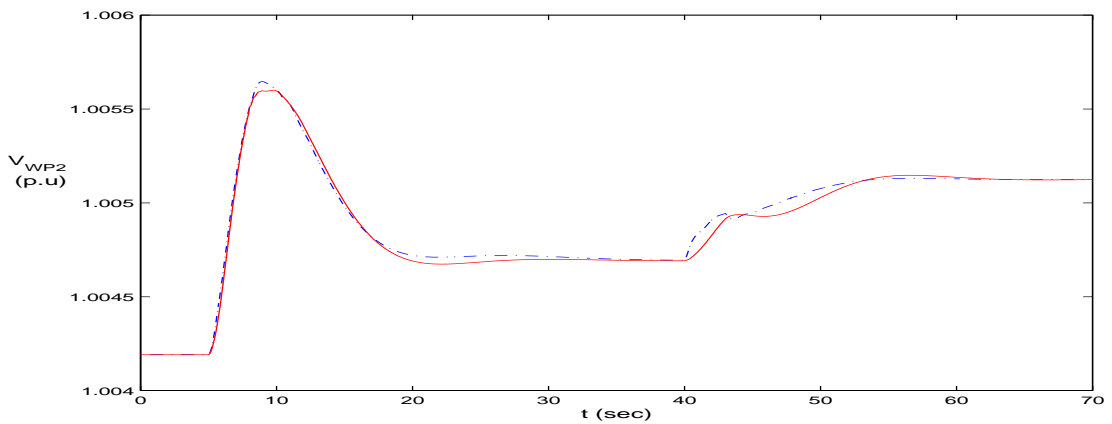




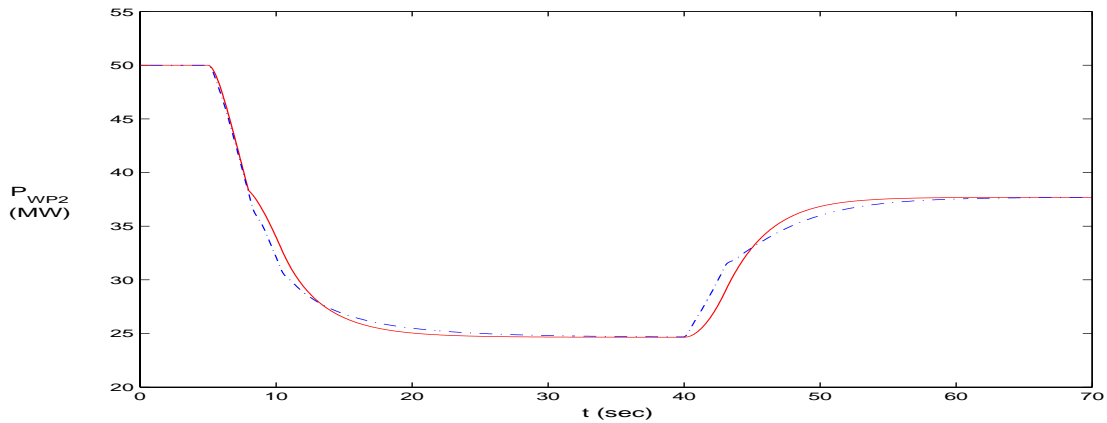
Σχήμα 6.25: Ταχύτητα ανέμου



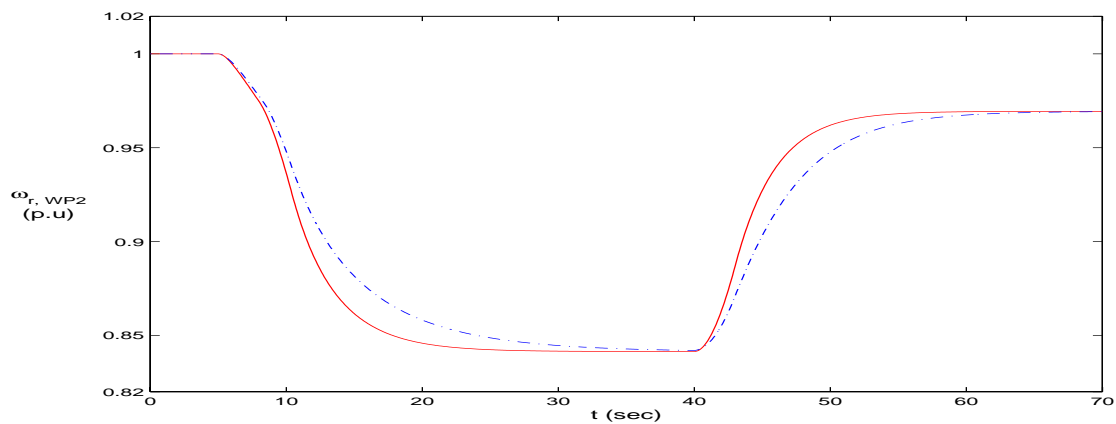
Σχήμα 6.26: Τάση του ζυγού σύνδεσης του πρώτου αιολικού πάρκου για μοντέλο A/Γ με A.P.T (κόκκινη συνεχής γραμμή) και μοντέλου A/Γ με έλεγχο της ενεργού ισχύος μέσω της διέγερσης (μπλέ διακεκομμένη γραμμή)



Σχήμα 6.27: Τάση του ζυγού σύνδεσης του δεύτερου αιολικού πάρκου για μοντέλο A/Γ με A.P.T (κόκκινη συνεχής γραμμή) και μοντέλου A/Γ με έλεγχο της ενεργού ισχύος μέσω της διέγερσης (μπλέ διακεκομμένη γραμμή)



Σχήμα 6.28: Ενεργός ισχύς του δεύτερου αιολικού πάρκου για μοντέλο A/Γ με A.P.T (κόκκινη συνεχής γραμμή) και μοντέλου A/Γ με έλεγχο της ενεργού ισχύος μέσω της διέγερσης (μπλέ διακεκομμένη γραμμή)



Σχήμα 6.29: Ταχύτητα A/Γ του δεύτερου αιολικού πάρκου για μοντέλο A/Γ με A.P.T (κόκκινη συνεχής γραμμή) και μοντέλου A/Γ με έλεγχο της ενεργού ισχύος μέσω της διέγερσης (μπλέ διακεκομμένη γραμμή)

Όπως παρατηρούμε η απόκριση του συστήματος είναι ευσταθής και για τα δύο μοντέλα των A/Γ. Ωστόσο, όπως είχαμε συμπεράνει στην παράγραφο 5.3 και επαληθεύεται από τα σχήματα 6.28 και 6.29, η απόκριση του μοντέλου της A/Γ με έλεγχο της ενεργού ισχύος μέσω της διέγερσης είναι πιο αργή, χωρίς ωστόσο να επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό η συνολική απόκριση του συστήματος.

---

---

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

---

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

### 7.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκαν δύο διαφορετικά μοντέλα Α/Γ μεταβλητών στροφών με σύγχρονη μηχανή και πλήρη μετατροπέα, κατάλληλα για μελέτες ευστάθειας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα της Α/Γ που εξετάστηκε αποτελείται από σύγχρονη μηχανή η οποία διαθέτει τύλιγμα διέγερσης. Το κιβώτιο ταχυτήτων παραλείπεται λόγω της πολυπολικής γεννήτριας και της παρεμβολής του μετατροπέα, με αποτέλεσμα ο δρομέας του ανεμοκινητήρα να συνδέεται στον ίδιο άξονα με το δρομέα της γεννήτριας. Η γεννήτρια συνδέεται στο δίκτυο μέσω ενός πλήρους μετατροπέα AC/DC/AC, ο οποίος αποτελείται από έναν ανορθωτή διόδων και έναν PWM αντιστροφέα. Στην περίπτωση που η διέγερση της γεννήτριας δεν μπορεί να αυξηθεί πάνω από ένα όριο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας DC/DC μετατροπέας ανύψωσης για τον έλεγχο της τάσης εισόδου του PWM αντιστροφέα.

Στη διπλωματική αυτή εργασία εξετάστηκαν δύο στρατηγικές ελέγχου της γεννήτριας. Πιο συγκεκριμένα, στον πρώτο τρόπο ελέγχου το σύστημα διέγερσης της γεννήτριας χρησιμοποιείται για να ελέγχει την τάση στα άκρα της μέσω ενός τυπικού αυτόματου ρυθμιστή τάσης (Automatic Voltage Regulator, AVR). Λόγω του ανορθωτή διόδων η τάση του πυκνωτή  $V_c$  είναι ανάλογη της τάσης  $V_s$  των ακροδεκτών της γεννήτριας ενώ στο α.μ. σύστημα οι τιμές τους ταυτίζονται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, το σύστημα διέγερσης να ελέγχει τελικά την DC τάση του πυκνωτή και να την κρατάει στην ονομαστική της τιμή (1 α.μ.). Όσον αφορά στον αντιστροφέα PWM, που είναι από την πλευρά του δικτύου, αυτός εγγχεί ενεργό ισχύ στο δίκτυο, ακολουθώντας την στρατηγική Μέγιστης Απολαβής Ισχύος. Η στρατηγική αυτή συνίσταται στην ρύθμιση της ταχύτητας της Α/Γ έτσι ώστε για κάθε ταχύτητα ανέμου να περιστρέφεται με κατάλληλες στροφές, ώστε να λειτουργεί υπό μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται μέγιστη παραγωγή μηχανικής ισχύος.

Επίσης εξετάστηκε μια παραλλαγή της πρώτης στρατηγικής ελέγχου κατά την οποία η τιμή της διέγερσης περιορίζεται στην ανώτατη τιμή  $E_f^{max} = 1.7$  α.μ. Στην περίπτωση αυτή, επειδή με τη μείωση της ισχύος η τάση  $V_s$  στους ακροδέκτες της γεννήτριας μειώνεται, χρησιμοποιείται ένας DC/DC μετατροπέας ανύψωσης ο οποίος κρατάει την τιμή της τάσης  $V_c$  του πυκνωτή σταθερή μεταβάλλοντας τον λόγο διαμόρφωσης,  $m$ .

Στο δεύτερο τρόπο ελέγχου, το σύστημα διέγερσης της γεννήτριας χρησιμοποιείται για να υλοποιεί τη στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος. Πιο συγκεκριμένα έχοντας δεδομένη τη ταχύτητα του δρομέα, υπολογίζουμε την βέλτιστη ενεργό ισχύ που πρέπει να παράγει η γεννήτρια και στη συνέχεια υπολογίζεται ποιά πρέπει να είναι η κατάλληλη διέγερση για την δεδομένη ενεργό ισχύ. Ο PWM αντιστροφέας σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται έτσι ώστε να κρατάει σταθερή την τάση εισόδου του ελέγχοντας την ενεργό ισχύ που μεταφέρεται από την DC πλευρά προς το δίκτυο.

Τέλος, περιγράφηκε η περίπτωση ενός ασθενούς δικτύου με μεγάλη αιολική διείσδυση. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκε ένα δίκτυο με ένα τοπικό συμβατικό σταθμό παραγωγής με σύγχρονη γεννήτρια και δύο μεγάλα αιολικά πάρκα. Από τα δύο αιολικά πάρκα, το πρώτο θεωρήσαμε ότι είναι εγκατεστημένο και αποτελείται από Α/Γ επαγωγής σταθερών στροφών, ενώ το δεύτερο θεωρήσαμε ότι είναι προς εγκατάσταση. Το σύστημα συνδεόταν σε ένα μεγάλο διασυνδεδεμένο σύστημα μέσω δύο πανομοιότυπων γραμμών μεταφοράς. Επίσης για την μελέτη πιθανής βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης θεωρήθηκε ότι το μέγιστο στιγμιαίο ρεύμα διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας έχει μικρή τιμή με αποτέλεσμα, σε περίπτωση σφάλματος, η υποστήριξη της τάσεως από τη τοπική σύγχρονη γεννήτρια να είναι περιορισμένη κάτι που μπορεί να οδηγήσει ευκολότερα στην απώλεια του σημείου ισορροπίας των μηχανών επαγωγής του υπάρχοντος αιολικού πάρκου. Μέσω κατάλληλων προσομοιώσεων αποδείχθηκε ότι το όριο μέγιστης αιολικής διείσδυσης δεν μπορεί να αυξηθεί με τη χρήση στο νέο αιολικό πάρκο, Α/Γ σταθερών στροφών με γεννήτρες επαγωγής. Αντίθετα, η χρήση Α/Γ μεταβλητών στροφών και με πλήρη μετατροπέα οι οποίες ρυθμίζουν την τάση του ζυγού στον οποίο συνδέεται το αιολικό πάρκο, αυξάνει το μέγιστο όριο αιολικής διείσδυσης από πλευράς ασφάλειας τάσης.

## 7.2 Προοπτικές

Αντικείμενο μελλοντικής ερευνητικής προσπάθειας μπορεί να αποτελέσει η προσθήκη στα αναπτυχθέντα μοντέλα της δυνατότητας αδιάκοπης παροχής ισχύος σε συνθήκες βύθισης τάσεως (Low-Voltage-Ride-Through). Αυτό γίνεται ολοένα και περισσότερο επιτακτικό τα τελευταία χρόνια όπου παρατηρείται συνεχής αύξηση της διείσδυσης αιολικής ενέργειας στα Σ.Η.Ε. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η νέα φιλοσοφία για τη σύνδεση των Α/Γ στο δίκτυο είναι να έχουν την δυνατότητα να υποστηρίξουν το δίκτυο σε περιπτώσεις διαταραχών σε αυτό.

Ένα επιπλέον θέμα που χρήζει περισσότερης μελέτης αλλά και ενημέρωσης για την τεχνολογία που χρησιμοποιείται από τις σημερινές κατασκευάστριες εταιρίες Α/Γ, είναι αυτό του συστήματος ελέγχου της γωνίας βήματος πτερυγίων (pitch control). Βελτίωση

του pitch control είναι δυνατό να επιτευχθεί επιτυχάνοντας προσαρμοστικό έλεγχο των παραμέτρων του, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας της Α/Γ την κάθε χρονική στιγμή.

Επιπρόσθετα, θα μπορούσε να γίνει βελτιστοποίηση της μοντελοποίησης του αεροδυναμικού μέρους της Α/Γ έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη η εμφάνιση των ανώτερων αρμονικών στην αεροδυναμική ροπή, που οφείλονται στη μεταβολή της ταχύτητας με το ύψος (wind shear) και στο φαινόμενο σκίασης του πύργου (tower shadow).

Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει η προσπάθεια ανάπτυξης μοντέλου Α/Γ με μεταβλητή διέγερση και μόνιμη ύπαρξη DC/DC μετατροπέα ανύψωσης, ο οποίος θα λειτουργεί έτσι ώστε να υλοποιεί τη στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος [21].

Η μεγάλης κλίμακας διείσδυση διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής στα Σ.Η.Ε. έχουν επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό αφενός τη δομή και αφετέρου τη λειτουργία των σημερινών δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας. Το γεγονός αυτό καθιστά αναγκαίο, τα υπάρχοντα λογισμικά που είναι διαθέσιμα και κατάλληλα για προσομοιώσεις δικτύων, να συμπεριλάβουν κατάλληλα μοντέλα των νέων αυτών μονάδων παραγωγής. Πολλά από αυτά τα εργαλεία προσομοίωσης Σ.Η.Ε. χρησιμοποιούν το λογισμικό περιβάλλον MATLAB/SIMULINK. Με βάση το λογισμικό αυτό αναπτύχθηκαν και τα μοντέλα των Α/Γ στην παρούσα διπλωματική εργασία. Αυτό τους δίνει τη δυνατότητα να μπορούν να προστεθούν στη βιβλιοθήκη μοντέλων υπάρχοντων λογισμικών και να συμβάλουν σε μελέτες ροών φορτίου καθώς και σε μελέτες προσδιορισμού μέγιστης αιολικής διείσδυσης

Τέλος, τα αποτελέσματα που έχουν εξαχθεί από τις προσομοιώσεις των αντίστοιχων μοντέλων θα πρέπει να επιβεβαιωθούν και στην πράξη, με την πειραματική υλοποίηση της διάταξης και των αντίστοιχων ελεγκτών στο εργαστήριο. Εξάλλου, είναι προφανές ότι στα επόμενα στάδια της κατασκευής της ανεμογεννήτριας θα προκύψουν νέοι περιορισμοί και επιπλέον δυνατότητες που δεν ήταν δυνατό να προβλεφθούν από τη θεωρητική ανάλυση.

---

---

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α΄

---

## ΚΩΔΙΚΑΣ ΜΑΤΛΑΒ

### 1.1 initialization1.m

Στην παρούσα παράγραφο παρατίθεται το αρχείο `initialization1.m`. Το αρχείο αυτό αρχικοποιεί τα μοντέλα των παραγράφων 4.3 και 4.4 με βάση τα όσα έχουν αναφερθεί στις παραγράφους 4.3.3 και 4.4.3.

```
clear
wbb = 18;
k = 2 * pi/60;
poles = 80;
Rs = 0.06;
Q = 0;
Xmd = 1.21;
Xmq = 0.606;
Xls = 0.121;
Xd = Xmd + Xls;
Xq = Xmq + Xls;
Rfd = 0.0086;
Xfd = 1.33;
Xkq = 0.7;
Rkq = 0.05;
vkq = 0;
ikq = vkq/Rkq;
wb = 24 * pi;
H = 3.64;
Vs = 1;
```

```

KP = 100;
wrmax = 1.00001;
Cdc = 0.01;
P = Ισχύς Αρχικοποίησης;
    if P >= 0 & P <= 0.119744168
        wrm = (P + 2.394883362)/4.789766725 % pu
    elseif P > 0.119744168 & P <= 0.766991071
        wrm = (P/0.827516117)^(1/3) % pu
    elseif P > 0.766991071 & P <= 1
        wrm = (P + 8.32035716)/9.32035716 % pu
    end
wr0 = wrm * wbb * k * poles/2; % electric rad/s
Ix = P/Vs;
Vx = Vs;
d = atan((wr0/wb) * Xq * Ix / (Vx + Rs * Ix));
vd0 = Vx * sin(d);
vq0 = Vx * cos(d);
id0 = Ix * sin(d);
iq0 = Ix * cos(d);
Ef0 = (wb/wr0) * vq0 + Xd * id0 + (wb/wr0) * Rs * iq0;
ifd0 = Ef0/Xmd;
vfd = ifd0 * Rfd;
psids0 = -Xd * id0 + Xmd * ifd0;
psiqs0 = -Xq * iq0 + Xmq * ikq;
psifd0 = -Xmd * id0 + Xfd * ifd0;
psikq0 = -Xmq * iq0 + Xkq * ikq;
Te0 = psids0 * iq0 - psiqs0 * id0;
Tm0 = Te0;
V = sqrt(vd02 + vq02);
Vref = 1;
beta0 = 0;
H = 3.64;
ro = 1.225;
Sb = 2000000;
R = 37.5;
Cpopt = 0.438;
lopt = 6.3;
A = pi * R2;
Vwo0 = [10];
options = optimset('Display','iter'); % Option to display output
[Vwo, fval] = fsolve(@wind, Vwo0, options, P, beta0, A, ro, R, Sb, wbb, wrm, Te0)

```

## 1.2 wind.m

Το αρχείο wind.m αποτελεί βοηθητικό αρχείο για την εκτέλεση του αρχείου αρχικοποίησης initialization1.m. Το αρχείο αυτό περιέχει τη μη γραμμική εξίσωση που πρέπει να επιλυθεί για την εύρεση της αρχικής ταχύτητας ανέμου.

```
function DT = wind(Vwo, P, beta0, A, ro, R, Sb, wbb, wrm, Te0)
y = wbb * wrm;
lamda = [(2 * pi * y / 60) * R] / Vwo;
u = [beta0; lamda];
cp = cpf(u);
Tm = 0.5 * ro * cp * A * Vwo3 / (Sb * wrm);
DT = Tm - Te0;
```

## 1.3 initialization2.m

Το αρχείο αυτό αρχικοποιεί το μοντέλο της παραγράφου 4.5 με βάση τη διαδικασία που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.5.4.

```
clear
wbb = 18;
k = 2 * pi / 60;
poles = 80;
Rs = 0.06;
Q = 0;
Xmd = 1.21;
Xmq = 0.606;
Xls = 0.121;
Xd = Xmd + Xls;
Xq = Xmq + Xls;
Rfd = 0.0086;
Xfd = 1.33;
Xkq = 0.7;
Rkq = 0.05;
Ef = 1.7;
Ifd = Ef / Xmd;
wb = 24 * pi;
wrmax = 1.0001;
vkq = 0;
ikq0 = vkq / Rkq;
x(1) = 1;
```



```

x(2) = 0;
x(3) = 1;
x(4) = 0;
P = Ισχύς Αρχικοποίησης;
l = P;
    if P >= 0 & P <= 0.119744168
        wrm = (P + 2.394883362)/4.789766725 % pu
    elseif P > 0.119744168 & P <= 0.766991071
        wrm = (P/0.827516117)^(1/3) % pu
    elseif P > 0.766991071 & P <= 1
        wrm = (P + 8.32035716)/9.32035716 % pu
    end
wr0 = wrm * wbb * k * poles/2 % electric rad/s
m = wr0;
w = wr0/wb;
x0 = [x(1); x(2); x(3); x(4)];
options = optimset('Display','iter'); % Option to display output
[x, fval] = fsolve(@equationsV, x0, options, l, m, Rs, Xq, wb, Xd, Xmd, Ef, Q)
Vs = sqrt(x(1) * x(1) + x(3) * x(3));
d = asin(x(1)/Vs)
Ix = P/Vs;
Vx = Vs;
d0 = atan((wr0/wb) * Xq * Ix / (Vx + Rs * Ix));
vd0 = Vx * sin(d);
vq0 = Vx * cos(d);
id0 = Ix * sin(d);
iq0 = Ix * cos(d);
Ef0 = (wb/wr0) * vq0 + Xd * id0 + (wb/wr0) * Rs * iq0;
ifd0 = Ef0/Xmd;
vfd = ifd0 * Rfd;
psids0 = -Xd * id0 + Xmd * ifd0
psiqs0 = -Xq * iq0 + Xmq * ikq0
psifd0 = -Xmd * id0 + Xfd * ifd0
psikq0 = -Xmq * iq0 + Xkq * ikq0
Te0 = psids0 * iq0 - psiqs0 * id0
Tm0 = Te0;
V = sqrt(vd02 + vq02)
Vref = 1;
m0 = V/Vref;
beta0 = 0;
H = 3.64;

```

```

ro = 1.225;
Sb = 2000000;
R = 37.5;
Cpopt = 0.438;
lopt = 6.3;
A = pi * R2;
Vwo0 = [10];
options = optimset('Display','iter'); % Option to display output
[Vwo, fval] = fsolve(@wind, Vwo0, options, P, beta0, A, ro, R, Sb, wbb, wrm, Te0)

```

## 1.4 equations.m

Το αρχείο equations.m αποτελεί (μαζί με το αρχείο wind.m 1.2) βοηθητικό αρχείο για την εκτέλεση του αρχείου αρχικοποίησης initialization2.m. Το αρχείο αυτό περιέχει το σύστημα των μη γραμμικών εξισώσεων 4.34-4.37 που περιγράφονται στην παράγραφο 4.5.4.

```

function HH = fun(x, l, m, Rs, Xq, wb, Xd, Xmd, Ef, Q)
Vd = x(1);
Id = x(2);
Vq = x(3);
Iq = x(4);
HH = [Vd + Rs * Id - m * Xq * Iq/wb;
      Vq + Rs * Iq - (m/wb) * (-Xd * Id + Ef);
      l - Vd * Id - Vq * Iq;
      Q - Vq * Id + Vd * Iq];

```

## 1.5 modana.m

Το πρόγραμμα modana γραμμικοποιεί το μοντέλο που δίνεται ως είσοδος και υπολογίζει τις ιδιοτιμές του συστήματος. Είσοδος του προγράμματος αυτού είναι το αρχείο mdl του μοντέλου. Απαραίτητο για την εκτέλεση του αρχείου αυτού, είναι να έχει γίνει αρχικοποίηση του μοντέλου έτσι ώστε να είναι δεδομένες οι αρχικές τιμές των ολοκληρωτών. Το modana δίνει ως αποτέλεσμα τις ιδιοτιμές, καθώς και τους συντελεστές συμμετοχής κάθε μεταβλητής κατάστασης σε κάθε ιδιοτιμή.

```

[sizes, x0, xstr]=ονομασία μοντέλου ;
[A, B, C, D] = linmod('ονομασία μοντέλου', x0)
[V, E] = eig(A);
diag(E)

```

```

W = inv(V);

clear P;
for k = 1 : sizes(1)
P(:, k) = W(k, :).' * V(:, k);
P(:, k) = P(:, k)/norm(P(:, k), inf);
end;

for j = 1 : sizes(1)
    if imag(E(j, j)) >= 0
        xz = imag(E(j, j))/real(E(j, j));
        damp = sqrt(1/(xz2 + 1));
        count = fprintf(1, 'Eigenvalue % 11.4g + j % 11.4g \t damping : %11.4g \n',
            real(E(j, j)), imag(E(j, j)), damp);
        for i = 1 : sizes(1)
            if abs(P(i, j)) > 0.1
                count = fprintf(1, ' %20s %5.2f \n', char(xstr(i)), abs(P(i, j)));
            end
        end
    end
end
end
end

```

---

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ν.Α.Βοβός, *Ανάλυση Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 2004.
- [2] ICAP, “Η Αγορά Ενέργειας στην Ελλάδα,” [www.energia.gr](http://www.energia.gr).
- [3] Α.Ε.Λ.Δημέας, “Συμβολή στον Κατανεμημένο Έλεγχο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας με Μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής Στη Χαμηλή Τάση,” Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., 2006.
- [4] Α. S. Meliopoulos, “Challenges in Simulation and Design of  $\mu$ Grids,” *Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 1, no. 1, pp. 309–314, 27-31 January 2002.
- [5] Ν.Χατζηαργυρίου, “Οικονομική Αποτίμηση της Αιολικής Παραγωγής στην Κρήτη και οι Προοπτικές της Διεσπαρμένης Παραγωγής,” Συνέδριο Ινστιτούτου Ν.Α. Ευρώπης IENE «Ενέργεια και Ανάπτυξη στην Κρήτη», Χανιά, Κρήτη, 26-27 Μαΐου 2006.
- [6] Ν.Δ.Ηατziαργυριου, Ι.Skoteinos, and Α.Γ.Τσικαλακis, “Status of Integrating Renewable Electricity Production in Greece, Prospects and Problems,” in *Proceedings of 2005 IEEE St.Petersburg PowerTech*.
- [7] J.Kabouris and C.D.Vournas, “Application of Interruptible Contracts to Increase Wind Power Penetration in Congested Areas,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 3, pp. 1642–1649, August 2004.
- [8] J.Kabouris and Ν.Ηαtziαργυριου, “Wind Power in Greece – Current Situation, Future Developments and Prospects,” in *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Montreal, Canada, 18-22 June 2006.
- [9] Φ.Δ.Κανέλλος, “Συμβολή στην Προσομοίωση και Αναγνώριση Ανεμογεννητριών με Ασύγχρονη Γεννήτρια για τη Δημιουργία Μειωμένης Τάξης Ισοδυνάμων Μοντέλων,” Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., Οκτώβριος 2003.

- [10] Σ.Α.Παπαθανασίου, “Διαμόρφωση του Ηλεκτρικού Συστήματος των Ανεμογεννητριών,” Ε.Μ.Π.
- [11] J.G.Slootweg, “Wind power - modeling and impact on power system dynamics,” Ph.D. dissertation, TU Delft, 2003.
- [12] C.Abbey and G.Joos, “Effect of Low Voltage Ride Through (LVRT) Characteristic on Voltage Stability,” in *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, vol. 2, 12-16 June 2005, pp. 1901–1907.
- [13] F.Santjer, “The New Philosophy for Grid Connection and how to Verify the Behaviour of Wind Farms,” in *EWEC 2004*, London, November 2004.
- [14] J.Niiranen, “Voltage Dip Ride-Through of a Doubly Fed Generator Equipped with an Active Crowbar,” in *Proceedings of Nordic Wind Power Conference*, March 2004.
- [15] G.Tsourakis and C.D.Vournas, “Simulation of Low Voltage Ride-Through Capability of Wind Turbines with Doubly Fed Induction Generator,” in *EWEC 2006*, Athens, Hellas, 27 February - 2 March 2006.
- [16] Κ.Δ.Βουρνάς, *Ευστάθεια Μονίμου Καταστάσεως*. Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2004.
- [17] Ε.Γ.Ποταμιανάκης, “Προσομοίωση και Γραμμικοποίηση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας για την Ανάλυση Βραχυπρόθεσμης Ευστάθειας Τάσης,” Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., Απρίλιος 2006.
- [18] V.Akhmatov, “Analysis of dynamic behaviour of electric power systems with large amount of wind power,” Ph.D. dissertation, Technical University of Denmark, April 2003.
- [19] G.Tsourakis, E.Potamianakis, and C.D.Vournas, “Eliminating Voltage Instability Problems in Wind Parks by Using Doubly Fed Induction Generators,” in *EWEC 2004*, London, November 2004.
- [20] D.C.Aliprantis, S.A.Papathanassiou, S.A.Papadopoulos, and A.G.Kladas, “Modeling and Control of a Variable Speed Wind Turbine Equipped with Permanent Magnet Synchronous Generator,” in *Proceedings of ICEM 2000*, Helsinki, Finland, August 2000.
- [21] S.B.Papaefthimiou and S.A.Papathanassiou, “Simulation and Control of a Variable Speed Wind Turbine with Synchronous Generator,” in *Proceedings of ICEM 2006*, Crete, Hellas, September 2006.
- [22] S.Achilles and M.Pöller, “Direct Drive Synchronous Machine Models for Stability Assessment of Wind Farms,” in *Proceedings of 4th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and transmission Networks for Offshore Wind Farms*, Billund, Denmark, October 20-21 2003.

- [23] V.Akhmatov, “Modelling and Ride-Through Capability of Variable Speed Wind Turbines with Permanent Magnet Generators,” *Wind Energy*, vol. 9, pp. 313–326, 2005.
- [24] J.G.Slootweg, S.W.H.de.Haan, H.Polinder, and W.L.Kling, “Modeling Wind Turbines in Power System Dynamics Simulations,” in *Proceedings of 2001 IEEE PES Summer Meeting*, vol. 1, 15-19 July 2001, pp. 22–26.
- [25] J.G.Slootweg and W.L.Kling, “Aggregated Modelling of Wind Parks in Power System Dynamics Simulations,” in *Proceedings of 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference*, Bologna,Italy, 23-26 June 2003.
- [26] V.Akhmatov, H.Knudsen, and A.H.Nielsen, “Advanced Simulation of Windmills in the Electric Power Supply,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 22, no. 6, pp. 421–434, 2000.
- [27] M.Palsson, T.Toftenvaag, K.Uhlen, and J.O.G.Tande, “Large-Scale Wind Power Integration and Voltage Stability Limits in Regional Networks,” in *Proceedings of 2002 IEEE PES Summer Meeting*, vol. 2, 2002, pp. 762–769.
- [28] F.Fesquet, P.Juston, and I.Garzulino, “Impact and Limitation of Wind Power Generation in an Island Power System,” in *Proceedings of 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference*, Bologna,Italy, 23-26 June 2003.
- [29] P.Ledesma, J.Usaola, and J.L.Rodriguez, “Transient Stability of a Fixed Speed Wind Farm,” *International Journal of Renewable Energy*, vol. 28, pp. 1341–1355, 2003.
- [30] J.G.Slootweg and W.L.Kling, “The Impact of Large Scale Wind Power Generation on Power System Oscillations,” *International Journal of Electrical Power Systems Research*, vol. 67, pp. 9–20, 2003.
- [31] F.Zhou, G.Joos, and C.Abbey, “Voltage Stability in Weak Connection Wind Farms,” in *Proceedings of 2000 IEEE PES General Meeting*, 12-16 June 2005, pp. 610–615.
- [32] Σ.Α.Παπαθανασίου, “Συμβολή στην Ανάλυση Ανεμογεννητριών Μεταβλητών Στροφών με Ασύγχρονη Γεννήτρια για την επιλογή του Ηλεκτρικού Σχήματος,” Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., Φεβρουάριος 1997.
- [33] P.Kundur, *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, 1994.
- [34] P.C.Krause, O.Wasynczuk, and S.D.Sudhoff, *Analysis of Electric Machinery*. IEEE Press, New York, 2000.

- [35] Δ.Αλιπράντης, “Μοντελοποίηση και Έλεγχος Ανεμογεννήτριας Μεταβλητών Στροφών με Γεννήτρια Μονίμων Μαγνητών,” Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Ιούνιος 1999.
- [36] N.Mohan, T.M.Undeland, and W.P.Robbins, *POWER ELECTRONICS: Converters, Applications and Designs*. John Wiley & Sons, 1989.
- [37] Σ.Ν.Μανιάς, *Ηλεκτρονικά Ισχύος*. Εκδόσεις Συμεών, 2000.
- [38] Ν.Γ.Μαράτος, *Τεχνικές Βελτιστοποιήσεως*. Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- [39] T.V.Cutsem and C.D.Vournas, *Voltage Stability of Electric Power Systems*. Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [40] R.Lasseter, K.Tomsovic, and P.Piagi, “Scenarios for Distributed Technology Applications with Steady State and Dynamic Models of Loads and Micro-Sources,” Power System Engineering Research Center University of Wisconsin, Tech. Rep., April 2000.
- [41] A.I.Tsouchnikas, S.A.Papathanassiou, and N.D.Hatziargyriou, “Modeling and control of a variable speed wind turbine equipped with a direct drive synchronous generator,” National Technical University of Athens, School of Electrical and Computer Engineering, Tech. Rep., 2004.
- [42] Β.Μ.Νομικός, “Συστηματική Σχεδίαση Σταθεροποιητών σε Συστήματα με Σύγχρονες και Ασύγχρονες Μηχανές,” Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., Απρίλιος 2005.
- [43] C.D.Vournas, E.G.Potamianakis, C.Moors, and T.V.Cutsem, “An Educational Simulation Tool for Power System Control and Stability,” *IEEE Transactions on Power Systems. Special Section on Power Engineering Education*, vol. 19, no. 1, February 2004.
- [44] E.G.Potamianakis and C.D.Vournas, “Modeling and Simulation of Small Hybrid Power Systems,” in *Proceedings of 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference*, Bologna, Italy, June 23-26 2003.
- [45] S.Heir, *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*. Wiley, 1998.
- [46] Μ.Π.Παπαδόπουλος, *Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας Από Ανανεώσιμες Πηγές*. Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1997.
- [47] J.G.Slootweg, H.Polinder, and W.L.Kling, “Initialization of wind Turbine models in Power System Dynamics Simulations,” in *IEEE Porto Power Tech Conference*, vol. 4, Porto, Portugal, 10-13 September 2001.
- [48] G.Tsourakis, E.Farantatos, and C.D.Vournas, “Generic Model and Control Modes for a Full-Converter Synchronous Wind Generator,” in *Proceedings of ICEM 2006*, Crete, Hellas, September 2006.

- [49] G.Tsourakis and C.D.Vournas, “Modeling, Control and Stability of Wind Turbines with Doubly Fed Induction Generator,” in *CIGRÉ Symposium*, Athens, April 2005.