



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΩΝ

## Λειτουργία και Έλεγχος Συστήματος Ανεμογεννήτριας με Μηχανή Επαγωγής σε Διάταξη Διπλής Τροφοδότησης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ευθύμιος Κ. Καραλής

**Επιβλέπων :** Μαρία Γ. Ιωαννίδου, Καθηγήτρια ΕΜΠ  
Ιωάννης Κατηνιώτης, Ηλεκτρολόγος Μηχανικός

Αθήνα, Ιούνιος 2008





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΩΝ

## Λειτουργία και Έλεγχος Συστήματος Ανεμογεννήτριας με Μηχανή Επαγωγής σε Διάταξη Διπλής Τροφοδότησης

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ευθύμιος Κ. Καραλής

**Επιβλέπων :** Μαρία Γ. Ιωαννίδου, Καθηγήτρια ΕΜΠ  
Ιωάννης Κατηνιώτης, Ηλεκτρολόγος Μηχανικός

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 11<sup>η</sup> Ιουνίου 2008

.....  
Μαρία Ιωαννίδου  
Καθηγήτρια ΕΜΠ

.....  
Κωνσταντίνος Καραγιαννόπουλος  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Χρήστος Παπαγεωργίου  
Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούνιος 2008

.....  
Ευθύμιος Κ. Καραλής

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

Copyright © Ευθύμιος, Καραλής, 2008.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η προσομοίωση της λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας (Α/Γ) μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης (ΓΕΔΤ) καθώς επίσης και ο έλεγχος της γωνίας βήματος των πτερυγίων. Η προσομοίωση γίνεται με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab/Simulink.

Αναλυτικότερα στο Κεφάλαιο 1, γίνεται εισαγωγή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Αναφέρονται τα είδη, τα πλεονεκτήματα και ο ενεργειακός τους ρόλος στην παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας σε εθνικό επίπεδο. Από τις ΑΠΕ, αναλύεται η αιολική ενέργεια. Γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή και παρουσιάζεται η χρησιμότητα της, τα προβλήματα που προκύπτουν από την σύνδεση Α/Γ στο δίκτυο και η θέση της στο παγκόσμιο ενεργειακό επίπεδο.

Στο Κεφάλαιο 2, γίνεται παρουσίαση των μηχανών επαγωγής. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η μαθηματική θεμελίωση της θεωρίας των μετασχηματισμών σε πλαίσιο αναφοράς δύο κάθετων αξόνων που περιστρέφεται με αυθαίρετη ταχύτητα και η μοντελοποίηση (δυναμικό μοντέλο) των ασύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών επαγωγής.

Στο Κεφάλαιο 3, γίνεται μια γενική παρουσίαση των αιολικών συστημάτων. Περιγράφονται τα δομικά στοιχεία της Α/Γ, η αεροδυναμική μετατροπή της ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική, τα διάφορα συστήματα Α/Γ που χρησιμοποιούνται και δίνεται το μαθηματικό μοντέλο της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης.

Στο Κεφάλαιο 4, παρουσιάζεται η συνολική στρατηγική έλεγχου Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας με ΓΕΔΤ, η οποία περιλαμβάνει τον αεροδυναμικό έλεγχο της Α/Γ και τον ηλεκτρικό έλεγχο της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης στην πλευρά του δρομέα (μηχανής) και στην πλευρά του στάτη (δικτύου).

Στο Κεφάλαιο 5, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από δοκιμές που έγιναν με το μοντέλο προσομοίωσης που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 4, ως προς την απόκριση του συστήματος υπό την επίδραση διαφόρων αλλαγών του ανέμου. Τέλος, παρατίθενται γενικά σχόλια και συμπεράσματα της εργασίας για τη λειτουργία και απόκριση του συστήματος που αναπτύχθηκε.

Στο παράρτημα δίνονται ευρετήριο συμβόλων, τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας, του μετατροπέα και της τουρμπίνας που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα και μοντέλα προσομοίωσης της συνολικής στρατηγικής έλεγχου του συστήματος.

## Λέξεις Κλειδιά

Αιολική ενέργεια, Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών, Γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης, Ελεγκτής γωνίας βήματος πτερυγίων, Μετατροπέας, Matlab/Simulink

## **Abstract**

The subject of this thesis is the analysis and simulation of a variable speed, pitch controlled wind turbine equipped with a doubly fed induction generator (DFIG). Simulation was made with the use of the software Matlab/Simulink®, ed. 7.0.1.

Analytically, Chapter 1 is an introduction to renewable energy sources (RES). Are reported the types, the advantages and their energy role in the production of electric energy at national level. By the RES, the aeolian energy is analyzed. Begins a short historical retrospection and is presented its usefulness, the problems that result from connection in the electrical network and its place at the world energy level.

Chapter 2, present the induction machines. Specifically, are presented the mathematical base of theory of transformation to a reference frame which rotates at an arbitrary angular velocity and the modelling (dynamic model) of the induction machines.

Chapter 3, is a general presentation of aeolian systems. The structural elements of wind turbine, the aerodynamic transformation of wind energy in electric and the various wind turbine systems that are used, are described. Moreover, the dynamic model of a double fed induction generator (DFIG) is given.

In Chapter 4, the overall control strategy of variable speed doubly fed induction generator wind turbine is presented, which includes the aerodynamic control of the wind turbine and the electric control of the DFIG both at rotor side (machine) and at the stator side (grid).

In Chapter 5, the results from the simulations of the developed model under different wind conditions are presented. Finally, general comments and conclusions on the operation and the results of the developed system are made.

In the appendix are given the list symbol, the characteristics of generator, converter and turbine that were used in the program and simulation models used in the overall control strategy.

## **Key Words**

Wind energy, Variable speed wind turbine, Doubly fed induction generator, Pitch control, converter, Matlab/Simulink

## *Ευχαριστίες*

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την καθηγήτρια κ. Μαρία Ιωαννίδου για την υπόδειξη του θέματος, την επιστημονική καθοδήγηση, την αρμονική συνεργασία και πολύπλευρη συμπαράστασή της καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον υπεύθυνο της διπλωματικής μου κ. Ιωάννη Κατηνιώτη για την άψογη συνεργασία που είχαμε και το χρόνο που μου αφιέρωσε με τη συνεχή παρουσία του ώστε να ολοκληρώσω την εργασία αυτή. Οι επιστημονικές συμβουλές του και οι υποδείξεις του ήταν κρίσιμες για την επίλυση των προβλημάτων που προέκυπταν κατά τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας όπως και η συμβολή του στην εύρεση και υλοποίηση του αλγορίθμου σε Matlab.





# **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>**

### **ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΑΠΕ)**

<b>1.1. Γενικά περί ανανεώσιμων πηγών ενέργειας</b> .....	13
<b>1.2 Πλεονεκτήματα ΑΠΕ</b> .....	15
<b>1.3 Γενικά για την αιολική ενέργεια</b> .....	16
1.3.1 Ιστορική εξέλιξη.....	16
1.3.2 Χρησιμότητα αιολικής ενέργειας.....	18
1.3.3 Προβλήματα από την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας .....	19
<b>1.4 Η κατάσταση των ΑΠΕ στην Ελλάδα</b> .....	20
<b>1.5 Η αιολική ενέργεια σε παγκόσμιο επίπεδο</b> .....	25
<b>1.6 Ανακεφαλαίωση</b> .....	29

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>**

### **ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ**

<b>2.1 Γενικά για μηχανές επαγωγής</b> .....	31
2.1.1 Ηλεκτρική μηχανή AC.....	31
2.1.2 Ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες.....	31
2.1.3 Ισοδύναμο κύκλωμα μηχανής επαγωγής.....	32
<b>2.2 Δυναμικό μοντέλο μηχανής επαγωγής</b> .....	34
<b>2.3 Μοντέλο μηχανής επαγωγής σε χωρικά διανύσματα</b> .....	38
2.3.1 Εισαγωγή .....	38
2.3.2 Θεωρία συστήματος αναφοράς .....	39
2.3.3 Δυναμικό μοντέλο μηχανών επαγωγής με χωρικά διανύσματα .....	43
2.3.3.1 Δυναμικό μοντέλο σε στατό πλαίσιο αναφοράς (εξισώσεις Stanley) .....	45
2.3.3.2 Δυναμικό μοντέλο σε σύγχρονα περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς (εξισώσεις Kron).....	46
2.3.4 Ροή ισχύος στο d-q ισοδύναμο κύκλωμα.....	48
2.3.5 Ηλεκτρομαγνητική ροπή .....	49
<b>2.4 Αρχές διανυσματικού ελέγχου</b> .....	51
2.4.1 Κατηγορίες ελέγχου μηχανών επαγωγής.....	51
2.4.2 Θεωρία ελέγχου προσανατολισμένου πεδίου.....	53
2.4.3 Βέλτιστες συνθήκες παραγωγής ροπής.....	53
2.4.4 Δυναμικό μπλοκ διάγραμμα.....	54
2.4.5. Συνθήκες προσανατολισμένου πεδίου.....	55

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>**

### **ΑΙΟΛΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ**

<b>3.1 Εισαγωγή</b> .....	57
<b>3.2 Μετατροπή ενέργειας από τον άνεμο</b> .....	57
3.2.1 Περιγραφή αιολικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.....	57
3.2.2. Βασικά δομικά στοιχεία γεννητριών.....	58

3.2.3 Αεροδυναμικός έλεγχος ισχύος A/Γ.....	60
3.2.3 Αεροδυναμική μετατροπή .....	60
<b>3.3 Συστήματα ανεμογεννητριών (A/Γ) .....</b>	<b>62</b>
3.3.1 Ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας .....	63
3.3.2 Ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας .....	64
3.3.3. Ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας με ΓΕΔΤ.....	65
<b>3.4 Γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης για A/Γ.....</b>	<b>66</b>
3.4.1 Ισοδύναμο κύκλωμα ΓΕΔΤ.....	67
3.4.2 Ροή Ισχύος.....	68

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

### ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΕΛΕΓΧΟΥ

<b>4.1 Εισαγωγή.....</b>	<b>71</b>
<b>4.2 Περιγραφή συνολικού συστήματος ελέγχου A/Γ μεταβλητής ταχύτητας με ΓΕΔΤ.....</b>	<b>71</b>
<b>4.3 Έλεγχος ανεμογεννήτριας (A/Γ) .....</b>	<b>73</b>
4.3.1 Αντικειμενικός σκοπός ελέγχου .....	73
4.3.2.Στρατηγική ελέγχου μεταβλητού-βήματος μεταβλητής-ταχύτητας.....	75
4.3.3 Περιγραφή των Περιοχών Λειτουργίας.....	79
4.3.4 Σύστημα ελεγκτή βήματος κλίσης πτερυγίων (pitch controller system) .....	81
4.3.5 Χαρακτηριστικές μεγεθών A/Γ.....	82
<b>4.4. Έλεγχος ΓΕΔΤ.....</b>	<b>85</b>
4.4.1 Έλεγχος μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου.....	85
4.4.2 Έλεγχος μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα.....	88

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

<b>5.1 Εισαγωγή.....</b>	<b>93</b>
<b>5.2 Απόκριση συστήματος σε μεταβολές του ανέμου.....</b>	<b>93</b>
5.2.1 Απόκριση του συστήματος σε μεταβολές (βηματικές) του ανέμου.....	93
5.2.2 Απόκριση του συστήματος σε μεταβολές (τυχαίες χρονοσειρές) του ανέμου.....	106
<b>5.3 Συμπεράσματα.....</b>	<b>110</b>

### **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**

Παράρτημα Α - Ευρετήριο συμβόλων.....	111
Παράρτημα Β – Δεδομένα.....	113
Παράρτημα Γ – Μοντέλα προσομοίωσης.....	114
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>117</b>

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ- ΠΙΝΑΚΩΝ

## Κεφάλαιο 1

- Πίνακας 1.1** Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος (MW) από ΑΠΕ μεταξύ 1990-2004  
**Πίνακας 1.2** Παραγωγή Ηλεκτρικής ενέργειας (GWh) από ΑΠΕ μεταξύ 1990-2004  
**Πίνακας 1.3** Πρωτογενής παραγωγή από ΑΠΕ  
**Πίνακας 1.4** Εξέλιξη της συμμετοχής των ΑΠΕ στην ακαθάριστη εγχώρια κατανάλωση  
**Πίνακας 1.5** Εξέλιξη της συμμετοχής των ΑΠΕ στην ακαθάριστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας  
**Πίνακας 1.6** Εγκατεστημένη Ισχύς από Αιολικά στην Ευρωπαϊκή Ένωση
- Σχήμα 1.1** Εξέλιξη εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ χωρίς μεγάλα υδροηλεκτρικά  
**Σχήμα 1.2** Παραγωγή Ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ χωρίς μεγάλα Υ/Η  
**Σχήμα 1.3** Πρωτογενής παραγωγή από ΑΠΕ μη συμπεριλαμβανομένων των μεγάλων Υ/Η & της βιομάζας στον οικιακό τομέα.  
**Σχήμα 1.4** Η παγκόσμια κατανομή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανεμογεννήτριες  
**Σχήμα 1.5** Η ανάπτυξη της εγκατεστημένης ισχύος αιολικών πάρκων ανά την υφήλιο

## Κεφάλαιο 2

- Σχήμα 2.1** Ισοδύναμο ανά φάση κύκλωμα της ασύγχρονης τριφασικής μηχανής επαγωγής στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.  
**Σχήμα 2.2** R-L Κύκλωμα  
**Σχήμα 2.3** Μαγνητικοί άξονες τριφασικής μηχανής επαγωγής  
**Σχήμα 2.4** Σχηματική Αναπαράσταση των αξόνων  $d$  και  $q$  πλαισίου αναφοράς με αυθαίρετη ταχύτητα περιστροφής  
**Σχήμα 2.5** Ισοδύναμο κύκλωμα για το δυναμικό μοντέλο της μηχανής σε περιστρεφόμενο πλαίσιο με αυθαίρετη ταχύτητα. Στο σχήμα φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα: (α) εγκάρσιου άξονα  $q$  και (β) ευθέως άξονα  $d$ .  
**Σχήμα 2.6** Αναπαράσταση μπλοκ διαγράμματος ενός DC κινητήρα ξένης διέγερσης  
**Σχήμα 2.7** Μπλοκ διάγραμμα ενός προσανατολισμένου πεδίου μηχανής επαγωγής

## Κεφάλαιο 3

- Σχήμα 3.1** Σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο  
**Σχήμα 3.2** Φωτογραφία του εσωτερικού της Α/Γ  
**Σχήμα 3.3** Σχηματική αναπαράσταση μετατροπής αιολικής ενέργειας  
**Σχήμα 3.4** Χαρακτηριστική  $C_p(\lambda, \beta)$  για διάφορες τιμές της γωνίας βήματος  $\beta$   
**Σχήμα 3.5** Α/Γ σταθερής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής (ασύγχρονη)  
**Σχήμα 3.6** Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας με σύγχρονη / επαγωγής (ασύγχρονη) γεννήτρια  
**Σχήμα 3.7** Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης  
**Σχήμα 3.8** Σύστημα ΓΕΔΤ με back-to-back μετατροπέα .  
**Σχήμα 3.9** Ισοδύναμο κύκλωμα της ΓΕΔΤ  
**Σχήμα 3.10** Ροή ισχύος σε σύστημα ΓΕΔΤ χωρίς απώλειες .

## Κεφάλαιο 4

- Πίνακας 4.1** Χαρακτηριστικά Ανεμογεννήτριας  
**Πίνακας 4.2** Περιγραφή της Περιοχής Λειτουργίας I  
**Πίνακας 4.3** Περιγραφή της Περιοχής Λειτουργίας II  
**Πίνακας 4.4** Περιγραφή της Περιοχής Λειτουργίας III

#### **Πίνακας 4.5** Περιγραφή της Περιοχής Λειτουργίας IV

<b>Σχήμα 4.1</b>	Συνολικό σύστημα ελέγχου για A/T μεταβλητής ταχύτητας με ΓΕΔΤ
<b>Σχήμα 4.2</b>	Ιδανική καμπύλη ισχύος
<b>Σχήμα 4.3</b>	Καμπύλη $C_p$ - $\lambda$ για διάφορες τιμές της γωνίας βήματος $\beta$
<b>Σχήμα 4.4</b>	Καμπύλη ισχύος εξόδου – ταχύτητα γεννήτριας
<b>Σχήμα 4.5</b>	Χαρακτηριστική ελέγχου ισχύος εξόδου – ταχύτητα γεννήτριας
<b>Σχήμα 4.6</b>	Χαρακτηριστική ταχύτητας ανέμου – ταχύτητας μηχανής
<b>Σχήμα 4.7</b>	Χαρακτηριστική ταχύτητας ανέμου – παραγόμενης ισχύος
<b>Σχήμα 4.8</b>	Χαρακτηριστική ταχύτητας ανέμου – γωνίας βήματος
<b>Σχήμα 4.9</b>	Χαρακτηριστική ταχύτητας ανέμου – αεροδυναμικού συντελεστή $C_p$
<b>Σχήμα 4.10</b>	Χαρακτηριστική ταχύτητας ανέμου – $\lambda$
<b>Σχήμα 4.11</b>	Χαρακτηριστική ταχύτητας ανέμου – ροπής
<b>Σχήμα 4.12</b>	Σχηματικό διάγραμμα μετατροπέα ισχύος στη μεριά του δικτύου
<b>Σχήμα 4.13</b>	Σχηματικό διάγραμμα τάσεως dc-link
<b>Σχήμα 4.14</b>	Σχηματικό διάγραμμα του διανυσματικού ελέγχου στην πλευρά του δικτύου
<b>Σχήμα 4.15</b>	Σχηματικό διάγραμμα του διανυσματικού ελέγχου στην πλευρά του δρομέα

### **Κεφάλαιο 5**

#### **Πίνακας 5.1** Μεταβολές ταχύτητας ανέμου $V_w$

<b>Σχήμα 5.1</b>	Ταχύτητα ανέμου $V_w$ (m/s)
<b>Σχήμα 5.2</b>	Απόκριση ταχύτητας (δρομέα) μηχανής $w_r$ (pu)
<b>Σχήμα 5.3</b>	Απόκριση παραγόμενης ενεργού ισχύος $P$ (MW)
<b>Σχήμα 5.4</b>	Απόκριση γωνίας βήματος κλίσης πτερυγίων $\beta$ (deg)
<b>Σχήμα 5.5</b>	Απόκριση $V_{dc}$ (V)
<b>Σχήμα 5.6</b>	Απόκριση παραγόμενης άεργου ισχύος $Q$ (Mvar)
<b>Σχήμα 5.7</b>	Απόκριση τάσης d-άξονα στάτη
<b>Σχήμα 5.8</b>	Απόκριση τάσης q-άξονα στάτη
<b>Σχήμα 5.9</b>	Απόκριση ρεύματος d-άξονα στάτη
<b>Σχήμα 5.10</b>	Απόκριση ρεύματος q-άξονα στάτη
<b>Σχήμα 5.11</b>	Απόκριση τάσης d-άξονα δρομέα
<b>Σχήμα 5.12</b>	Απόκριση τάσης q-άξονα δρομέα
<b>Σχήμα 5.13</b>	Απόκριση ρεύματος d-άξονα δρομέα
<b>Σχήμα 5.14</b>	Απόκριση ρεύματος q-άξονα δρομέα
<b>Σχήμα 5.15</b>	Απόκριση τάσης d-άξονα δικτύου
<b>Σχήμα 5.16</b>	Απόκριση τάσης q-άξονα δικτύου
<b>Σχήμα 5.17</b>	Απόκριση ρεύματος d-άξονα δικτύου
<b>Σχήμα 5.18</b>	Απόκριση ρεύματος q-άξονα δικτύου
<b>Σχήμα 5.19</b>	Απόκριση μηχανικής ροπής
<b>Σχήμα 5.20</b>	Απόκριση ηλεκτρικής ροπής
<b>Σχήμα 5.21</b>	Ταχύτητα ανέμου $V_w$ (m/s)
<b>Σχήμα 5.22</b>	Απόκριση παραγόμενης ενεργού ισχύος $P$ (MW)
<b>Σχήμα 5.23</b>	Απόκριση ταχύτητας (δρομέα) μηχανής $w_r$ (pu)
<b>Σχήμα 5.24</b>	Απόκριση γωνίας βήματος κλίσης πτερυγίων $\beta$ (deg)
<b>Σχήμα 5.25</b>	Απόκριση $V_{dc}$ (V)
<b>Σχήμα 5.26</b>	Απόκριση παραγόμενης άεργου ισχύος $Q$ (Mvar)
<b>Σχήμα 5.27</b>	Απόκριση μηχανικής ροπής
<b>Σχήμα 5.28</b>	Απόκριση ηλεκτρικής ροπής

# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>**

## ***ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΑΠΕ)***

### **1.1 Γενικά περί ανανεώσιμων πηγών ενέργειας**

Οι "ήπιες μορφές ενέργειας" ή "ανανεώσιμες πηγές ενέργειας" (ΑΠΕ) είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχεται από διάφορες φυσικές πηγές, όπως ο άνεμος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες. Ο όρος "ήπιες" αναφέρεται σε δυο βασικά χαρακτηριστικά τους.

- i. Για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση, καύση, όπως με τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας, αλλά η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση.
- ii. Πρόκειται για "καθαρές" μορφές ενέργειας, φιλικές στο περιβάλλον, που δεν αποδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα.

Οι ήπιες μορφές ενέργειας βασίζονται στην ηλιακή ακτινοβολία, με εξαίρεση τη γεωθερμική ενέργεια, η οποία είναι ροή ενέργειας από το εσωτερικό του φλοιού της γης, και την ενέργεια απ' τις παλίρροιες που εκμεταλλεύεται τη βαρύτητα. Οι βασιζόμενες στην ηλιακή ακτινοβολία ήπιες πηγές ενέργειας είναι ανανεώσιμες, μιας και δεν πρόκειται να εξαντληθούν όσο υπάρχει ο ήλιος, δηλαδή για μερικά ακόμα δισεκατομμύρια χρόνια. Ουσιαστικά είναι ηλιακή ενέργεια "συσκευασμένη" κατά τον ένα ή τον άλλο τρόπο: η βιομάζα είναι ηλιακή ενέργεια δεσμευμένη στους ιστούς των φυτών μέσω της φωτοσύνθεσης, η αιολική εκμεταλλεύεται τους ανέμους που προκαλούνται απ' τη θέρμανση του αέρα ενώ αυτές που βασίζονται στο νερό εκμεταλλεύονται τον κύκλο εξάτμισης-συμπύκνωσης του νερού και την κυκλοφορία του. Η γεωθερμική ενέργεια δεν είναι ανανεώσιμη, καθώς τα γεωθερμικά πεδία κάποια στιγμή εξαντλούνται.

Το ενδιαφέρον για τις ήπιες μορφές ενέργειας ανακινήθηκε τη δεκαετία του 1970, ως αποτέλεσμα κυρίως των απανωτών πετρελαϊκών κρίσεων της εποχής, αλλά και της αλλοίωσης του περιβάλλοντος και της ποιότητας ζωής από τη χρήση κλασικών πηγών ενέργειας. Ιδιαίτερα ακριβές στην αρχή, ξεκίνησαν σαν πειραματικές εφαρμογές. Σήμερα όμως λαμβάνονται υπόψη στους επίσημους σχεδιασμούς των ανεπτυγμένων κρατών για την ενέργεια και, αν και αποτελούν πολύ μικρό ποσοστό της ενεργειακής παραγωγής, ετοιμάζονται βήματα για παραπέρα αξιοποίησή τους. Το κόστος δε των εφαρμογών ήπιων μορφών ενέργειας πέφτει συνέχεια τα τελευταία είκοσι χρόνια και ειδικά η αιολική και υδροηλεκτρική ενέργεια, αλλά και η βιομάζα, μπορούν πλέον να ανταγωνίζονται στα ίσα παραδοσιακές πηγές ενέργειας όπως ο άνθρακας και η πυρηνική ενέργεια. Ενδεικτικά, στις Η.Π.Α. το 6% της ενέργειας προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές, ενώ στην Ευρωπαϊκή Ένωση το 2010 το 25% της ενέργειας θα προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές (κυρίως υδροηλεκτρικά και βιομάζα).

**Είδη ήπιων μορφών ενέργειας :**

- **Αιολική ενέργεια.** Χρησιμοποιήθηκε παλιότερα για την άντληση νερού από πηγάδια καθώς και για μηχανικές εφαρμογές (π.χ. την άλεση στους ανεμόμυλους). Έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται για ηλεκτροπαραγωγή.
- **Ηλιακή ενέργεια.** Χρησιμοποιείται περισσότερο για θερμικές εφαρμογές (ηλιακοί θερμοσίφωνες και φούρνοι) ενώ η χρήση της για την παραγωγή ηλεκτρισμού έχει αρχίσει να κερδίζει έδαφος, με την βοήθεια της πολιτικής προώθησης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας από το ελληνικό κράτος και την Ευρωπαϊκή Ένωση.
- **Υδατοπτώσεις.** Είναι τα γνωστά υδροηλεκτρικά έργα, που στο πεδίο των ήπιων μορφών ενέργειας εξειδικεύονται περισσότερο στα μικρά υδροηλεκτρικά. Είναι η πιο διαδεδομένη μορφή ανανεώσιμης ενέργειας.
- **Βιομάζα.** Χρησιμοποιεί τους υδατάνθρακες των φυτών (κυρίως αποβλήτων της βιομηχανίας ξύλου, τροφίμων και ζωοτροφών και της βιομηχανίας ζάχαρης) με σκοπό την αξιοποίηση της ενέργειας που δεσμεύτηκε απ' το φυτό με τη φωτοσύνθεση. Ακόμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν αστικά απόβλητα και απορρίμματα. Μπορεί να δώσει βιοαιθανόλη και βιοαέριο, που είναι καύσιμα πιο φιλικά προς το περιβάλλον από τα παραδοσιακά. Είναι μια πηγή ενέργειας με πολλές δυνατότητες και εφαρμογές που θα χρησιμοποιηθεί στο μέλλον.
- **Γεωθερμική ενέργεια.** Προέρχεται από τη θερμότητα που παράγεται απ' τη ραδιενεργό αποσύνθεση των πετρωμάτων της γης. Είναι εκμεταλλεύσιμη εκεί όπου η θερμότητα αυτή ανεβαίνει με φυσικό τρόπο στην επιφάνεια, π.χ. στους θερμοπίδακες ή στις πηγές ζεστού νερού. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε απευθείας για θερμικές εφαρμογές είτε για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η Ισλανδία καλύπτει το 80-90% των ενεργειακών της αναγκών με γεωθερμική ενέργεια.
- **Ενέργεια από παλίρροιες.** Εκμεταλλεύεται τη βαρύτητα του Ήλιου και της Σελήνης, που προκαλεί ανύψωση της στάθμης του νερού. Το νερό αποθηκεύεται καθώς ανεβαίνει και για να ξανακατέβει αναγκάζεται να περάσει μέσα από μια τουρμπίνα, παράγοντας ηλεκτρισμό. Έχει εφαρμοστεί στην Αγγλία, τη Γαλλία, τη Ρωσία και αλλού.
- **Ενέργεια από κύματα.** Εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια των κυμάτων της θάλασσας.
- **Ενέργεια από τους ωκεανούς.** Εκμεταλλεύεται τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στα στρώματα του ωκεανού, κάνοντας χρήση θερμικών κύκλων. Βρίσκεται στο στάδιο της έρευνας.

## 1.2 Πλεονεκτήματα ΑΠΕ

Τα τελευταία χρόνια, λόγω του έντονου προβληματισμού για τη μείωση των αποθεμάτων των συμβατικών μορφών ενέργειας και την αύξηση της ρύπανσης του περιβάλλοντος, οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) καταλαμβάνουν συνεχώς αυξανόμενο μερίδιο στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα **κύρια πλεονεκτήματα των ΑΠΕ** είναι τα ακόλουθα :

- Είναι πρακτικά ανεξάντλητες πηγές ενέργειας και συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από εξαντλήσιμους συμβατικούς ενεργειακούς πόρους.
- Είναι εγχώριες 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.
- Έχουν συνήθως χαμηλό λειτουργικό κόστος που δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα από τις τιμές των συμβατικών καυσίμων.
- Οι επενδύσεις των ΑΠΕ 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.
- Δεν επιβαρύνουν το τοπικό περιβάλλον με επικίνδυνους αέριους ρύπους, μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του θείου, καρκινογόνα μικροσωματίδια κ.α., όπως γίνεται με τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

### **1.3 Γενικά για την αιολική ενέργεια**

Η αιολική ενέργεια είναι η ενέργεια του ανέμου που προέρχεται από τη μετακίνηση αερίων μαζών της ατμόσφαιρας. Οι μετακινήσεις του αέρα, οι άνεμοι, προέρχονται από τις μεταβολές και τις διαφορετικές από τόπο σε τόπο τιμές της ατμοσφαιρικής πίεσης. Οι διαφορετικές αυτές τιμές της πίεσης οφείλονται στη διαφορετική θέρμανση (απορρόφηση ενέργειας) της ατμόσφαιρας κάθε τόπου από τον Ήλιο.

Η αιολική ενέργεια, μια από τις παλαιότερες μορφές φυσικής ενέργειας, αξιοποιήθηκε από πολύ νωρίς για την παραγωγή μηχανικού έργου και είχε αποφασιστική συμβολή στην εξέλιξη της ανθρωπότητας. Η σημασία της ενέργειας του ανέμου φαίνεται στην Ελληνική μυθολογία, όπου ο Αίολος διορίζεται από τους Θεούς του Ολύμπου ως “Ταμίας των ανέμων”.

Ο άνθρωπος πρωτοχρησιμοποίησε την αιολική ενέργεια στα ιστιοφόρα πλοία, γεγονός που συνέβαλε αποφασιστικά στην ανάπτυξη της ναυτιλίας. Μια άλλη εφαρμογή της αιολικής ενέργειας είναι οι ανεμόμυλοι. Μαζί με τους νερόμυλους συγκαταλέγονται στους αρχικούς κινητήρες που αντικατέστησαν τους μυς των ζώων ως πηγές ενέργειας.

Διαδόθηκαν στην Ευρώπη επί 650 χρόνια, από τον 12ο μέχρι τις αρχές του 19ου αιώνα, οπότε άρχισε σταδιακά να περιορίζεται η χρήση τους, λόγω κυρίως της ατμομηχανής. Η οριστική τους εκτόπιση άρχισε μετά τον Α΄ Παγκόσμιο πόλεμο, παράλληλα με την ανάπτυξη του κινητήρα εσωτερικής καύσεως και την διάδοση του ηλεκτρισμού.

Κατά τη δεκαετία του 1970 , το ενδιαφέρον για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας με ανεμογεννήτριες και ανεμόμυλους ανανεώθηκε λόγω της ενεργειακής κρίσης και των προβλημάτων που δημιουργεί η ρύπανση του περιβάλλοντος.

#### **1.3.1 Ιστορική εξέλιξη**

##### Μέση Ανατολή:

Οι ανεμογεννήτριες είναι συνέχεια των ανεμόμυλων. Ο ανεμόμυλος είναι μια διάταξη που χρησιμοποιεί ως κινητήρια δύναμη την κινητική ενέργεια του ανέμου (αιολική ενέργεια). Χρησιμοποιείται για την άλεση σιτηρών, την άντληση νερού και σε άλλες εργασίες.

Φαίνεται ότι οι αρχαίοι λαοί της Ανατολής χρησιμοποιούσαν ανεμόμυλους, αν και η πρώτη αναφορά σε ανεμόμυλο (ένα περσικό συγκρότημα ανεμόμυλων του 644 μ.Χ.) εμφανίζεται σε έργα Αράβων συγγραφέων του 9ου μ.Χ. αιώνα. Αυτό το συγκρότημα των ανεμόμυλων βρισκόταν στο Σειστάν, στα σύνορα της Περσίας και Αφγανιστάν και ήταν “οριζόντιου τύπου” δηλαδή με ιστία (φτερά) τοποθετημένα ακτινικά σε έναν “κατακόρυφο άξονα”. Ο άξονας αυτός στηριζόταν σε ένα μόνιμο κτίσμα με ανοίγματα σε αντιδιαμετρικά σημεία για την είσοδο και την έξοδο του αέρα. Κάθε μύλος έδινε απευθείας κίνηση σε ένα μόνο ζεύγος μυλόπετρες. Οι πρώτοι μύλοι είχαν τα ιστία κάτω από τις μυλόπετρες, όπως δηλαδή συμβαίνει και στους οριζόντιους νερόμυλους από τους οποίους φαίνεται ότι προέρχονταν. Σε μερικούς από τους μύλους που σώζονται σήμερα τα ιστία τοποθετούνται πάνω από τις μυλόπετρες. Τον 13<sup>ο</sup> αιώνα οι μύλοι αυτού του τύπου ήταν γνωστοί στην Βόρεια Κίνα, όπου μέχρι και τον 16ο αιώνα τους χρησιμοποιούσαν για εξάτμιση του θαλασσινού νερού στην παραγωγή αλατιού. Τον τύπο αυτό του μύλου χρησιμοποιούσαν



επίσης στην Κριμαία, στις περισσότερες χώρες της Δυτικής Ευρώπης και στις ΗΠΑ, μόνο που λίγοι από αυτούς διασώζονται σήμερα. Ο πιο αντιπροσωπευτικός από όλους αυτούς τους τύπους των ανεμόμυλων είναι ο τύπος με το “στροφέιο σχήματος S” (S-Rotor) (εφευρέτης ο Φιλανδός S. J. Savinius) που ακόμη και σήμερα χρησιμοποιείται σε απομονωμένες περιοχές λόγω της φτηνής και εύκολης κατασκευής του.

#### Οι πρώτοι ευρωπαϊκοί ανεμόμυλοι:

Ο ανεμόμυλος έφτασε στην Ευρώπη από τους Άραβες, χρησιμοποιήθηκε δε στον τύπο του κατακόρυφου ρωμαϊκού υδραυλικού τροχού, με τη διαφορά ότι ο ανεμόμυλος είχε στην θέση του τροχού κατακόρυφα φτερά που μετέδιδαν την κίνηση στις μυλόπετρες με ένα ζεύγος οδοντωτών τροχών. Οι πρώτοι τέτοιοι περιστρεφόμενοι μύλοι εμφανίστηκαν στη Γαλλία το 1180, στην Αγγλία το 1191 και στη Συρία την εποχή των Σταυροφοριών (1190). Στις αρχές του 14<sup>ου</sup> αιώνα αναπτύχθηκε στη Γαλλία ο ανεμόμυλος σε σχήμα πύργου. Σε αυτόν τον τύπο ανεμόμυλου οι μυλόπετρες και οι οδοντωτοί τροχοί ήταν τοποθετημένοι σε ένα σταθερό πύργο με κινητή οροφή ή “κάλυμμα”, στην οποία στηρίζονταν τα ιστία και η οποία μπορούσε να στραφεί επάνω σε ειδική τροχιά, στην κορυφή του πύργου

#### Ανεμογεννήτρια:

Ο ανεμόμυλος χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά ως ανεμογεννήτρια το 1890 όταν εγκαταστάθηκε πάνω σε χαλύβδινο πύργο ο ανεμόμυλος του Π. Λα Κούρ στη Δανία, με ισχία με σχισμές και διπλά πτερύγια αυτόματης μετάπτωσης προς τη διεύθυνση του ανέμου. Μετά τον Α' Παγκόσμιο πόλεμο, έγιναν πειράματα με ανεμόμυλους που είχαν ισχία αεροτομής, δηλαδή όμοια με πτερύγια αεροπορικής έλικας. Το 1931 μια τέτοια ανεμογεννήτρια εγκαταστάθηκε στην Κριμαία και η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς διοχετευόταν στο τμήμα χαμηλής τάσης του τοπικού δικτύου. Πραγματικές ανεμογεννήτριες με δύο πτερύγια λειτούργησαν κατά στις ΗΠΑ κατά τη δεκαετία του 1940, στην Αγγλία στη δεκαετία του 1950 καθώς και στη Γαλλία. Η πιο πετυχημένη ανεμογεννήτρια αναπτύχθηκε στη Δανία από τον J. Juul με τρία πτερύγια αλληλοσυνδεδεμένα μεταξύ τους και με έναν πρόβολο στο μπροστινό μέρος του άξονα περιστροφής. Στην Ολλανδία εκτελέστηκαν πειράματα από τον F. G. Pigeaud με αντικείμενο τη μετασκευή των παλαιών ανεμόμυλων άλεσης δημητριακών, έτσι ώστε η πλεονάζουσα ενέργεια να χρησιμοποιείται για ηλεκτροπαραγωγή. Χρησιμοποιήθηκε ένας ασύγχρονος ηλεκτροκινητήρας που κινούσε τον ανεμόμυλο (σε περίπτωση άπνοιας) ή λειτουργούσε σαν γεννήτρια, όταν φυσούσε.

Ο μηχανισμός μετάδοσης κίνησης περιλάμβανε συμπλέκτη παράκαμψης με σκοπό ο ηλεκτροκινητήρας να μην κινεί τα ιστία παρά μόνο να εκτελεί χρήσιμο έργο. Η οροφή στρεφόταν με τη βοήθεια σερβοκινητήρα που ελεγχόταν από έναν ανεμοδείκτη.

Μετά τον Β' Παγκόσμιο πόλεμο πολλοί περίμεναν ότι η αιολική ενέργεια θα συνέβαλλε σημαντικά στην παραγωγή ηλεκτρισμού, αλλά οι προσπάθειες ανάπτυξης ανεμογεννητριών ατόνησαν μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1970. Οι προσπάθειες αυτές ξανάρχισαν πιο έντονες μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση (1973) και στηρίχθηκαν κατά μεγάλο μέρος στην σύγχρονη αεροδιαστημική τεχνολογία. Έτσι αναπτύχθηκαν διάφοροι τύποι ανεμογεννητριών και στις αρχές της δεκαετίας του 1980 διατίθονταν στο εμπόριο συγκροτήματα μικρής ισχύος (μέχρι 20-25 kW) ενώ είχαν κατασκευαστεί και ανεμογεννήτριες μεγαλύτερης ισχύος (3-4 MW). Οι ανεμογεννήτριες προηγμένης

τεχνολογίας που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι κυρίως δύο τύπων: ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα με πτερύγια και ανεμογεννήτριες Νταριέ με κατακόρυφο άξονα (από τον Γάλλο G. J. M .Darrieus που τις εφεύρε το 1925).



### 1.3.2 Χρησιμότητα αιολικής ενέργειας

Η συστηματική εκμετάλλευση του αξιόλογου αιολικού δυναμικού της χώρας μας θα συμβάλει:

- στην αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ταυτόχρονη εξοικονόμηση σημαντικών ποσοτήτων συμβατικών καυσίμων, που συνεπάγεται συναλλαγματικά οφέλη.
- σε σημαντικό περιορισμό της ρύπανσης του περιβάλλοντος, αφού έχει υπολογισθεί ότι η παραγωγή ηλεκτρισμού μιας μόνο ανεμογεννήτριας ισχύος 550 KW σε ένα χρόνο , υποκαθιστά την ενέργεια που παράγεται από την καύση 2.700 βαρελιών πετρελαίου, δηλαδή αποτροπή της εκπομπής 735 περίπου τόνων CO2 ετησίως καθώς και 2 τόνων άλλων ρύπων.
- στη δημιουργία πολλών νέων θέσεων εργασίας, αφού εκτιμάται ότι για κάθε νέο Μεγαβάτ αιολικής ενέργειας δημιουργούνται 14 νέες θέσεις εργασίας

Υπολογίζεται ότι είναι δυνατό μερικές χιλιάδες ανεμογεννήτριες να παράγουν την ενέργεια που δίνει η καύση μερικών εκατομμυρίων βαρελιών πετρελαίου ή η λειτουργία ενός μικρού πυρηνικού εργοστασίου.

Η χώρα μας, με μεγάλη παράδοση στην εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, προσφέρεται ιδιαίτερα για την αξιοποίηση αυτής της ανανεώσιμης και καθαρής πηγής αφού διαθέτει ισχυρούς ανέμους, βουνοκορφές και απομονωμένα νησιά.

Μεμονωμένες ανεμογεννήτριες και αιολικά πάρκα λειτουργούν ήδη σε αρκετές περιοχές, με τάση να αυξηθούν τα επόμενα χρόνια.

Η αιολική ενέργεια και ανεξάντλητη (αφού ο ήλιος θα φροντίζει πάντα να υπάρχουν θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ των διάφορων περιοχών της γης, ώστε να προκαλούνται οι άνεμοι), δηλαδή ανανεώσιμη, αλλά και καθαρή, “φιλική” προς το περιβάλλον (αφού η μετατροπή της σε ηλεκτρική δεν το επιβαρύνει).

### 1.3.3 Προβλήματα από την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας

Τα ενδεχόμενα **προβλήματα** από την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας είναι ο θόρυβος από τη λειτουργία των ανεμογεννητριών, οι σπάνιες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές στο ραδιόφωνο, τηλεόραση, τηλεπικοινωνίες, που επιλύονται όμως με την ανάπτυξη της τεχνολογίας και, επίσης, προβλήματα περιβαλλοντικής αισθητικής, όπως για παράδειγμα στην περιοχή της Νότιας Εύβοιας.

Η ένταξη των ανεμογεννητριών στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, εκτός από τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα, συνεπάγεται και κάποια προβλήματα. Η μεταβλητότητα του ανέμου προκαλεί σημαντικές διακυμάνσεις στην ισχύ που απομαστεύεται από τον άνεμο, με αποτέλεσμα την εμφάνιση μηχανικών και ηλεκτρικών ταλαντώσεων καθώς και τη μείωση της ποιότητας της ηλεκτρικής ισχύος η οποία τροφοδοτείται στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Το πρόβλημα αυτό είναι ακόμα πιο έντονο στην περίπτωση της διεσπαρμένης παραγωγής, όπου τα δίκτυα με τα οποία συνδέονται τα αιολικά πάρκα είναι συνήθως ασθενή δίκτυα απομακρυσμένων περιοχών.

Οι κυριότερες επιπτώσεις της διεσπαρμένης παραγωγής στη λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι ακόλουθες :

- αλλαγές στο επίπεδο της τάσης των δικτύων
- μειωμένη ποιότητα ηλεκτρικής ισχύος
- μεταβολή των ρευμάτων από σφάλματα του δικτύου- αλλαγή του επιπέδου βραχυκύκλωσης
- αύξηση της αρμονικής παραμόρφωσης των τάσεων και ρευμάτων του δικτύου
- διακύβευση της ευστάθειας του συστήματος

Αρκετά από αυτά τα προβλήματα μπορούν να αντιμετωπισθούν με τη χρήση των

- **Ευέλικτων Συστημάτων Μεταφοράς Εναλλασσόμενου Ρεύματος (EP) -Flexible AC Transmission System (FACTS).**

Η τεχνολογία τους βασίζεται στη χρήση αξιόπιστων, μεγάλης ταχύτητας ηλεκτρονικών διακοπών ισχύος, προκεχωρημένης θεωρίας ελέγχου και σύγχρονους επεξεργαστές. Στην εξάπλωσή του βοήθησε η τεχνολογία οπτικών ινών, η οποία επέτρεψε την αποστολή και λήψη σημάτων σε επίπεδα υψηλών τάσεων αλλά και η ανάπτυξη της

τεχνολογίας κατασκευής διακοπτικών ηλεκτρονικών στοιχείων με διακοπτική ικανότητα στο επίπεδο των MW

Οι συσκευές FACTS, συνδεδεμένες στο αιολικό πάρκο, συντελούν στη βελτίωση της ποιότητας της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος, στον έλεγχο της πραγματικής και άεργου ισχύος, στην ενίσχυση της ευστάθειας του συστήματος και στον περιορισμό του ρεύματος βραχυκύκλωσης με αποτέλεσμα την αποφυγή της αποσύνδεσης του πάρκου από το δίκτυο.

- **Ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών,**

Οι οποίες συνδέονται στο δίκτυο με διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος και επιτυγχάνουν τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος, τη βελτίωση της ποιότητάς της, τη μείωση των μηχανικών καταπονήσεων, τη δυνατότητα ελέγχου της άεργου ισχύος κ.α. Η ιδέα των μεταβλητών στροφών στηρίζεται στις αρχές λειτουργίας ενός σφονδύλου. Όταν παρατηρείται αύξηση της αεροδυναμικής ισχύος, μέρος της μετατρέπεται σε κινητική, αποκόπτοντας με αυτό τον τρόπο τις γρήγορες μεταβολές της. Το αντίθετο συμβαίνει κατά τη μείωση της ταχύτητας του ανέμου. Η μεγιστοποίηση της αεροδυναμικής απόδοσης της ανεμογεννήτριας επιτυγχάνεται προσαρμόζοντας την ταχύτητα περιστροφής του ρότορα της ανεμογεννήτριας σε κάθε ταχύτητα του ανέμου, με τη χρήση συστημάτων ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος.

Τέλος, όταν το αιολικό πάρκο πρέπει να συνδεθεί σε ένα απομακρυσμένο δίκτυο EP, μια ενδιαφέρουσα τεχνολογία είναι αυτή της *Διασύνδεσης Εναλλασσόμενου Ρεύματος/ Συνεχούς Ρεύματος/ Εναλλασσόμενου Ρεύματος (EP/ΣΡ/EP) με Μετατροπείς Πηγής Τάσης (ΜΠΤ)*, γνωστή με το όνομα HVDC link ή HVDC PLUS.

Τα κύρια δομικά της στοιχεία είναι δύο ΜΠΤ με διπολικά τρανζίστορ μονωμένης πύλης (IGBT) και αντιπαράλληλες διόδους και δύο καλώδια ΣΡ. Τα κύρια πλεονεκτήματά της είναι ότι, σε αντίθεση με την κλασική διασύνδεση EP/ΣΡ/EP, επιτρέπει τη διασύνδεση ασθενών ή ακόμα και παθητικών δικτύων με τις ανεμογεννήτριες και ότι προσφέρει βελτιωμένη ποιότητα τροφοδοτούμενης ισχύος σε συνδυασμό με ανεξάρτητο έλεγχο της άεργου ισχύος. Η τεχνολογία αυτή εφαρμόζεται σήμερα με επιτυχία σε διάφορες απαιτητικές περιπτώσεις διασύνδεσης δικτύων.

#### **1.4 Η κατάσταση των ΑΠΕ στην Ελλάδα**

Η συνεισφορά των ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο είναι της τάξης του 5%, σε επίπεδο συνολικής διάθεσης πρωτογενούς ενέργειας στη χώρα και της τάξης του 13-14%, σε επίπεδο εγχώριας παραγωγής πρωτογενούς ενέργειας. Η ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ στην Ελλάδα αυξάνεται σημαντικά τα τελευταία χρόνια και είναι της τάξης του 2-2,5% της ακαθάριστης εγχώριας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Αφορά κυρίως σε Αιολικά και Μικρά Υδροηλεκτρικά, σε ένα μικρό βαθμό τη Βιομάζα, ενώ σύντομα αναμένεται και η συνεισφορά της Γεωθερμίας [27].

Λαμβάνοντας υπόψη τα μεγάλα Υδροηλεκτρικά (εξαιρώντας την παραγωγή από άντληση), η ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ είναι στα επίπεδα του 10%. Η παραγωγή θερμικής ενέργειας από ΑΠΕ προέρχεται κυρίως από ενεργητικά ηλιακά, θερμικές χρήσεις

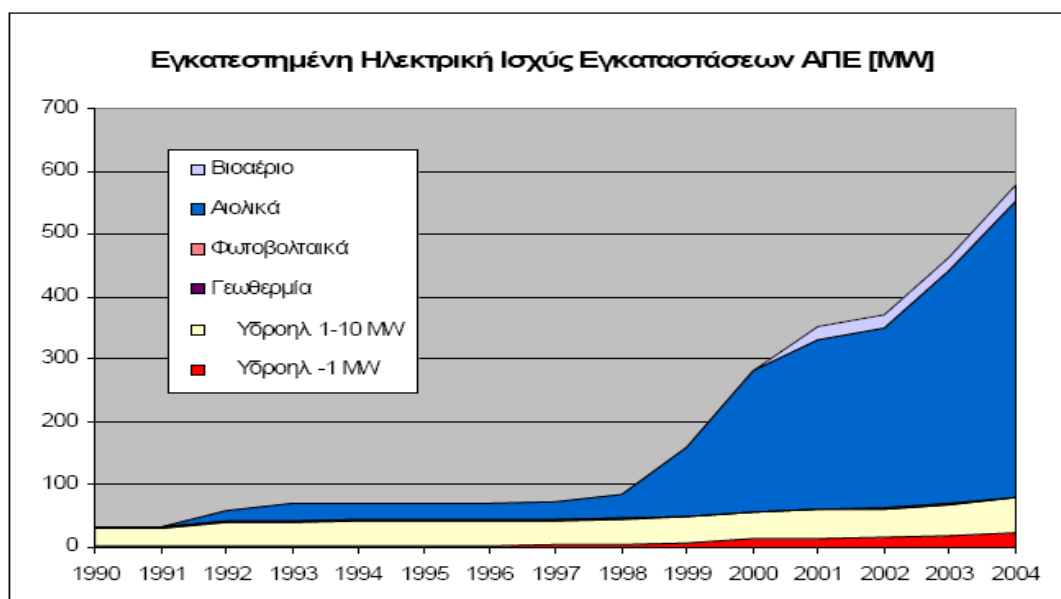
της βιομάζας και γεωθερμικές αντλίες θερμότητας. Η μεγάλη ανάπτυξη της βιομηχανίας ηλιακών συλλεκτών κατά τις τελευταίες δεκαετίες έχει οδηγήσει την Ελλάδα στη δεύτερη θέση σε εγκατεστημένη επιφάνεια συλλεκτών σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Ωστόσο η κύρια παραγωγή θερμότητας, από βιομάζα προέρχεται είτε από καύση μη εμπορικής βιομάζας, στον οικιακό τομέα, είτε από υπολείμματα βιομάζας σε βιομηχανικές μονάδες κατεργασίας ξύλου, τροφίμων, βάμβακος, κ.λπ. όπου και χρησιμοποιείται για ίδιες ανάγκες. Θα μπορούσε κανείς να πει ότι η Ελληνική αγορά θερμότητας από ΑΠΕ είναι σε στάδιο εκκίνησης. Η χρήση των βιοκαυσίμων στην Ελλάδα είναι επίσης σε φάση εκκίνησης και ολοκληρώνεται η μελέτη για την διείσδυσή τους στην αγορά. Αυτή τη στιγμή, προετοιμάζονται δύο μονάδες παραγωγής βιοντίζελ στην Ελλάδα, που χρηματοδοτούνται από το ΕΠΑΝ.

Η εγκατεστημένη ισχύς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ ήταν 3.593 MW στο τέλος του 2004, όταν η συνολική εγκατεστημένη ισχύς του Ελληνικού Συστήματος Ηλεκτροπαραγωγής ήταν περίπου 12.000 MW.

Ισχύς Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας (MW)															
Τεχνολογία ΑΠΕ	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
<b>Σύνολο</b>	2411	2515	2541	2552	2552	2552	2551	2757	2896	3068	3299	3369	3388	3473	3593
Υδροηλεκτρική Ενέργεια	2408	2512	2523	2523	2523	2523	2522	2728	2856	2959	3072	3076	3078	3079	3095
<i>εκ των οποίων αντλητικά συστήματα</i>	315	315	315	315	315	315	315	520	615	615	699	699	699	699	699
Υ/Η <1 MW*	2	2	2	2	3	3	3	4	5	8	14	15	17	19	23
Υ/Η 1-10 MW*	28	28	39	39	39	39	39	39	40	42	42	45	45	50	56
Υ/Η 10+MW*	2063	2167	2167	2167	2166	2166	2165	2165	2197	2294	2317	2317	2317	2311	2317
Γεωθερμία	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0
Φωτοβολταϊκά	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
Αιολική Ενέργεια	1	1	16	27	27	27	27	27	38	109	226	270	287	371	472
Βιοαέριο	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	22	22	22	25
<i>* Δεν συμπεριλαμβάνεται η ισχύς των αντλητικών</i>															

**Πίνακας 1.1 Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος (MW) από ΑΠΕ μεταξύ 1990-2004**

Ειδικότερα, τα 27 MW των Αιολικών Πάρκων της ΔΕΗ το 1997, έφθασαν τα 472 MW με άδεια λειτουργίας στο τέλος του 2004. Τα Μικρά Υδροηλεκτρικά έφθασαν τα 80 MW στο τέλος του 2004 από τα 43 MW της ΔΕΗ το 1997. Τέλος οι εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής και συμπαραγωγής από βιοαέριο (κυρίως στα Λιόσια και την Ψυτάλλεια) έχουν ηλεκτρική ισχύ 25 MW.



Σχήμα 1.1 Εξέλιξη εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ χωρίς μεγάλα υδροηλεκτρικά

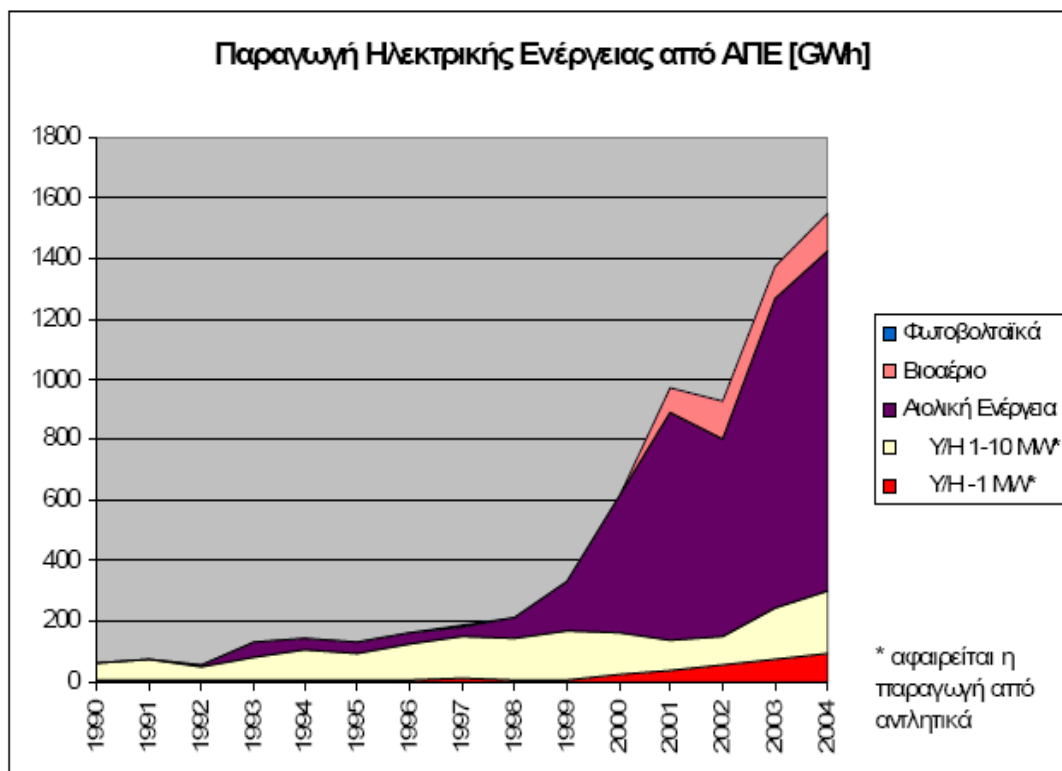
Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ το 2004 έφθασε τις 6,45 TWh περίπου και προήλθε κατά 81% από υδροηλεκτρικούς σταθμούς (5205 GWh), κατά 17% από αιολικά πάρκα (1121 GWh), 124 GWh (2%) παρήχθησαν από βιομάζα, ενώ υπήρχε και μία πολύ μικρή παραγωγή από φωτοβολταϊκούς σταθμούς ( Πίνακας 1.2)

Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας (GWh)															
Τεχνολογία ΑΠΕ	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
<b>Σύνολο</b>	1999	3173	2397	2588	2879	3816	4542	4132	3936	4992	4562	3560	4240	6459	6450
Υδροηλεκτρική Ενέργεια	1997	3171	2389	2541	2842	3782	4504	4096	3866	4829	4111	2725	3463	5332	5205
<i>εκ των οποίων αντλητικά συστήματα</i>															
Υ/Η -1 MW*	228	72	186	259	243	253	156	214	149	237	418	628	663	566	533
Υ/Η 1-10 MW*	6	5	5	5	8	7	7	11	8	9	26	40	58	76	91
Υ/Η 10+MW*	54	71	43	77	97	89	119	138	138	160	140	95	92	169	212
Υ/Η 10+MW*	1709	3023	2155	2200	2495	3434	4222	3733	3572	4423	3527	1962	2650	4521	4369
Αιολική Ενέργεια	2	2	8	47	37	34	38	36	70	162	451	756	651	1021	1121
Βιοαέριο	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	79	126	105	123
Φωτοβολταϊκά	0,1	0,0	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,5	0,6	0,8

\* δεν συμπεριλαμβάνεται η παραγωγή των αντλητικών

Πίνακας 1.2 Παραγωγή Ηλεκτρικής ενέργειας (GWh) από ΑΠΕ μεταξύ 1990-2004

Η ακαθάριστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας την ίδια χρονιά ήταν 62 TWh. Η εξέλιξη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ φαίνεται στο Σχήμα 1.2



Σχήμα 1.2 Παραγωγή Ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ χωρίς μεγάλα Υ/Η

Για το 2004 η συνολική πρωτογενής παραγωγή θερμότητας ήταν 44.434 TJ, προερχόμενη κατά 86% από βιομάζα, κατά 10% από ηλιακή ενέργεια ,και κατά 3,5% από βιοαέριο.

Η παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας από ΑΠΕ (Πίνακας 1.3) το 2004 ήταν 1606 Ktoe, ενώ στις αρχές της δεκαετίας του 90 ήταν 1125 Ktoe. Εξ' αυτών 702 ktoe οφείλονται στην χρήση μη εμπορικής βιομάζας στα νοικοκυριά, 215 ktoe στην χρήση βιομάζας στη βιομηχανία για ίδιες ανάγκες (συνολικό ποσοστό της βιομάζας 57%), 448 ktoe (28 %) από την παραγωγή των υδροηλεκτρικών, 96 ktoe (6%) από την παραγωγή των αιολικών, 108 ktoe (7%) από την παραγωγή των θερμικών ηλιακών συστημάτων και 36 ktoe (2%) από το βιοαέριο, κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η εξέλιξη της παραγωγής πρωτογενούς ενέργειας από ΑΠΕ φαίνεται στο Σχήμα 1.3

Πρωτογενής Παραγωγή από ΑΠΕ (ktoe)															
Τεχνολογία ΑΠΕ	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Υδροηλεκτρική Ενέργεια	172	273	206	219	245	325	388	353	333	416	354	235	298	459	448
εκ των οποίων αντλητικά συστήματα	20	6	16	22	21	22	13	18	13	20	36	54	57	49	46
Υ/Η < 1 MW*	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	2	3	5	7	8
Υ/Η 1-10 MW*	5	6	4	7	8	8	10	12	12	14	12	8	8	15	18
Υ/Η 10+MW*	147	260	185	189	215	295	363	321	307	381	304	169	228	389	376
Βιομάζα	893	897	899	899	894	897	908	911	907	911	945	938	948	910	917
στον Οικιακό τομέα	702	702	702	702	702	702	702	702	702	702	702	702	702	702	702
στη Βιομηχανία κτλ	191	195	196	197	191	195	206	209	205	209	243	236	246	207	215
Αιολική Ενέργεια	0	0	1	4	3	3	3	3	6	14	39	65	56	88	96
Φωτοβολταϊκά	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ηλιακή Ενέργεια	56	63	70	75	79	82	86	89	93	97	99	100	102	105	108
Βιοαέριο	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	33	48	36	36
Γεωθερμία**	3	3	3	3	4	3	3	2	3	2	2	2	1	1	1
Σύνολο	1125	1236	1178	1201	1225	1311	1388	1359	1342	1440	1439	1373	1453	1598	1606
Σύνολο χωρίς αντλητικά	1105	1230	1162	1178	1204	1290	1375	1340	1329	1420	1403	1319	1396	1550	1560
Σύνολο χωρίς μεγάλα Υ/Η αντλητικά, και Βιομάζα στον Οικιακό τομέα	256	268	274	287	287	292	309	317	320	337	397	448	466	458	482

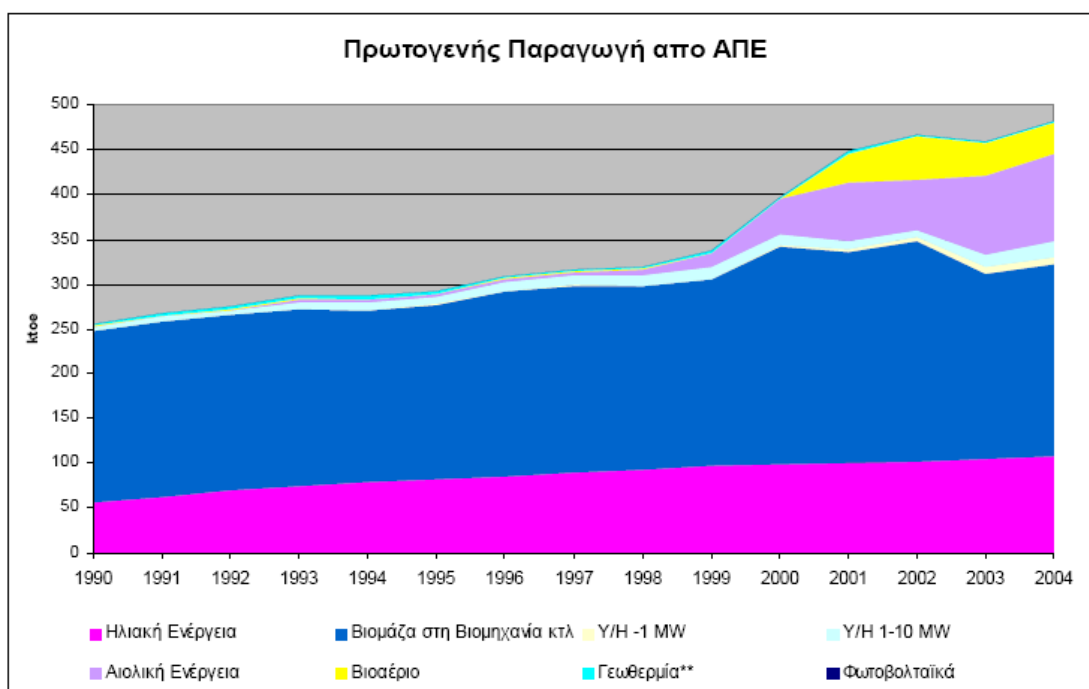
\* Δεν συμπεριλαμβάνεται η παραγωγή των αντλητικών, \*\* γίνεται επανεξέταση των στοιχείων

Πίνακας 1.3 Πρωτογενής παραγωγή από ΑΠΕ

Συμμετοχή των ΑΠΕ στο Ενεργειακό Ισοζύγιο															
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Πρωτογενής Παραγωγή από ΑΠΕ	1.125	1.236	1.178	1.201	1.225	1.311	1.388	1.359	1.342	1.440	1.439	1.373	1.453	1.598	1.606
Παραγωγή από ΑΠΕ χωρίς μεγάλα Υ/Η, αντλητικά, και Βιομάζα στον Οικιακό τομέα	256	268	274	287	287	292	309	317	320	337	397	448	466	458	482
Ακαθάριστη Εγχώρια Κατανάλωση	22181	22286	22840	22638	23405	23482	24161	25056	26385	26623	27821	28704	29025	30160	30494
Συμμετοχή των ΑΠΕ στην Ακαθάριστη Εγχώρια Κατανάλωση	5,1%	5,5%	5,2%	5,3%	5,2%	5,6%	5,7%	5,4%	5,1%	5,4%	5,2%	4,8%	5,0%	5,2%	5,2%
Σύνολο ΑΠΕ, εκτός μεγάλων Υ/Η, αντλητικών και Βιομάζας στον Οικιακό τομέα	1,2%	1,2%	1,2%	1,3%	1,2%	1,2%	1,3%	1,3%	1,2%	1,3%	1,4%	1,6%	1,6%	1,5%	1,6%

Πίνακας 1.4 Εξέλιξη της συμμετοχής των ΑΠΕ στην ακαθάριστη εγχώρια κατανάλωση





**Σχήμα 1.3** Πρωτογενής παραγωγή από ΑΠΕ μη συμπεριλαμβανομένων των μεγάλων Υ/Η & της βιομάζας στον οικιακό τομέα.

Η συνεισφορά των ΑΠΕ στην ακαθάριστη εγχώρια κατανάλωση ενέργειας είναι σταθερή και κυμαίνεται γύρω από ένα ποσοστό της τάξεως του 5-5,5% (*Πίνακας 1.4*). Ο λόγος είναι ότι η παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας από ΑΠΕ οφείλεται κατά 70% στη μη εμπορική βιομάζα και στα μεγάλα υδροηλεκτρικά, που παραμένουν σε σταθερά ποσοστά και δεν επηρεάζονται από την χρηματοδοτική πολιτική.

Όπως φαίνεται στο *Σχήμα 1.3*, η συνολική συνεισφορά των ΑΠΕ, αν αφαιρέσει κανείς την βιομάζα στον οικιακό τομέα και τα μεγάλα υδροηλεκτρικά, παρουσιάζει μια σταθερά ανοδική πορεία λόγω των μέτρων οικονομικής υποστήριξης. Δεδομένης πάντως της αύξησης της ζήτησης ενέργειας και της συνεπαγόμενης αύξησης της ακαθάριστης εγχώριας κατανάλωσης, το ποσοστό αυτό δεν φαίνεται να αλλάζει.

Τα στατιστικά στοιχεία των τελευταίων ετών παρουσιάζουν επίσης την έντονη διακύμανση του ποσοστού συμμετοχής των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή (5-10%), η οποία οφείλεται, κυρίως, στον τρόπο λειτουργίας των μεγάλων υδροηλεκτρικών από τη ΔΕΗ Α.Ε, ενώ οι υπόλοιπες ΑΠΕ έχουν μία σταθερά αυξανόμενη συμμετοχή που έφθασε το 2,5% το 2004 (*Πίνακας 1.5*).

% Συμμετοχή των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή (GWh)															
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Σύνολο ΑΠΕ	1999	3173	2397	2588	2679	3816	4542	4132	3936	4992	4562	3560	4240	6459	6450
Σύνολο χωρίς αντλητικά	1771	3101	2211	2329	2636	3563	4386	3918	3787	4755	4144	2932	3577	5893	5917
Σύνολο χωρίς μεγάλα Υ/Η και αντλητικά	62	78	57	130	141	130	164	185	216	332	617	970	927	1372	1548
Ακαθάριστη Κατανάλωση Ηλεκτρικής Ενέργειας	35714	36459	38016	39205	41006	42349	43917	45800	47939	49796	53832	56204	57504	60571	61630
Συμμετοχή ΑΠΕ εξαιρουμένων των αντλητικών Υ/Η στην Ακαθάριστη Κατανάλωση Ηλεκτρικής Ενέργειας	5,0%	8,5%	5,8%	5,9%	6,4%	8,4%	10,0%	8,6%	7,9%	9,5%	7,7%	5,2%	6,2%	9,7%	9,6%
Συμμετοχή ΑΠΕ εξαιρουμένων των αντλητικών και των μεγάλων Υ/Η στην Ακαθάριστη Κατανάλωση Ηλεκτρικής Ενέργειας	0,2%	0,2%	0,1%	0,3%	0,3%	0,3%	0,4%	0,4%	0,4%	0,7%	1,1%	1,7%	1,6%	2,3%	2,5%

**Πίνακας 1.5** Εξέλιξη της συμμετοχής των ΑΠΕ στην ακαθάριστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας

Σημειώνεται ότι το 10% του 2003-2004, δεν είναι αντιπροσωπευτικό για τους εξής λόγους:

1. Τα μεγάλα υδροηλεκτρικά στην Ελλάδα είναι σχεδόν αποκλειστικά τύπου φράγματος, χρησιμοποιούνται κυρίως για φορτία αιχμής και η παραγωγή τους εξαρτάται από την διαθεσιμότητα υδάτων στα φράγματα.
2. Το 2003-2004 έγινε αυξημένη χρήση των Μεγάλων Υδροηλεκτρικών, δεδομένου ότι ήταν χρονιές καλής υδραυλικότητας

### **1.5 Η αιολική ενέργεια σε παγκόσμιο επίπεδο**

Από πολλές απόψεις, η αιολική ενέργεια θεωρείται ως η μεγαλύτερη επιτυχία στην εξέλιξη των ανανεώσιμων πηγών. Η δικτυακά συνδεδεμένη αιολική ενέργεια από μεγάλες ανεμογεννήτριες (αιολικά πάρκα) έχει βιώσει γρήγορη ανάπτυξη στην αγορά στην περίοδο από το 1991 και μετά.

Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς, παγκοσμίως έχει αυξηθεί από 2GW σε παραπάνω από 20 GW (Wind Power Monthly 2001) και ο παράγοντας απόδοσης (παραγωγής ανά μονάδα απόδοσης εγκατάστασης) έχει επίσης βελτιωθεί. Η ιστορική τάση στην μείωση κόστους είναι παρόμοια εντυπωσιακή.

Κατά το έτος 2002, εγκαταστάθηκαν παγκοσμίως νέα αιολικά πάρκα συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 6.868 MW, μέγεθος το οποίο αποτελεί δείκτη της εξέλιξης του κλάδου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος κατά 28% παγκοσμίως σύμφωνα με τα στοιχεία που δημοσιεύτηκαν από τον AWEA<sub>1</sub> (American Wind Energy Association) και τον αντίστοιχο του στην Ευρώπη EWEA<sub>2</sub> (European Wind Energy Association). Η αξία της τεχνολογίας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη χρησιμοποίηση αιολικών γεννητριών ανήλθε στο ποσό των 6,8 δισεκατομμυρίων Ευρώ ( 7,3 δισεκατομμύρια \$) παγκοσμίως, έχοντας ως αποτέλεσμα την αύξηση της παγκόσμιας

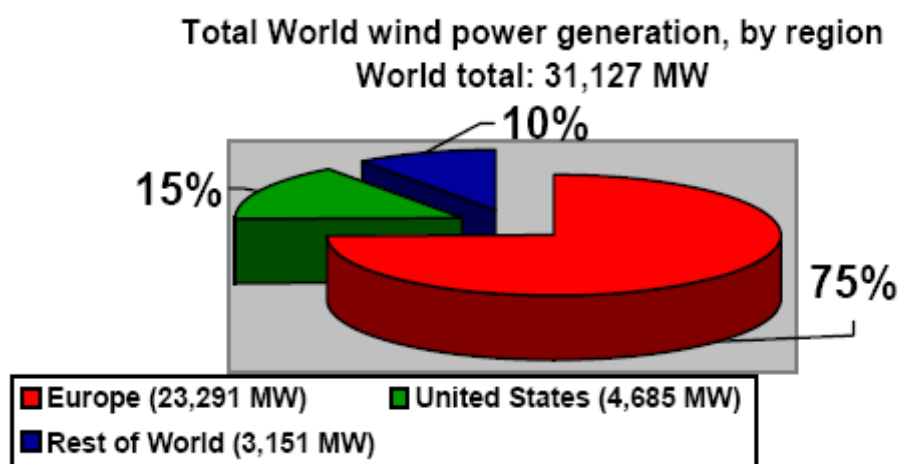
εγκατεστημένης ισχύος στα 31.000 MW, ικανών για την κάλυψη των αναγκών 7,5 εκατομμυρίων τυπικών μέσων αμερικανικών σπιτιών ή 16 εκατομμυρίων τυπικών μέσων ευρωπαϊκών σπιτιών.

Η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς αιολικών πάρκων τετραπλασιάστηκε μέσα στα προηγούμενα πέντε έτη, από 7.600MW το 1998 σε 31.000MW το 2002 – μία αύξηση της τάξεως των 23.400 MW- καθιστώντας την αιολική ενέργεια ως την ταχύτερα αναπτυσσόμενη μορφή παραγωγής ενέργειας παγκοσμίως με μέσο ρυθμό ανάπτυξης της εγκατεστημένης ισχύος της τάξεως του 32% ετησίως τα προηγούμενα πέντε έτη (1998-2002). Το 93% της επιπλέον εγκατεστημένης ισχύος κατά το έτος 2002 πραγματοποιήθηκε στην Ευρώπη και στις Η.Π.Α. ενώ το 90% της συνολικής παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος λειτουργεί σε αυτές τις δύο περιοχές του πλανήτη.

Πάνω από τα  $\frac{3}{4}$  της συνολικής παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος αιολικών πάρκων λειτουργεί στη περιοχή της Ευρώπης και είναι και η περιοχή στην οποία οφείλεται η ραγδαία ανάπτυξη των τελευταίων ετών – ένα επίτευγμα το οποίο απορρέει από την σταθερή δέσμευση για ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Κατά το έτος 2002 στις χώρες-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, εγκαταστάθηκαν νέα αιολικά πάρκα συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 5.871MW και συνολικής αξίας 5.8 δισεκατομμύρια Ευρώ ( 6.2 δισεκατομμύρια \$). Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς σ' αυτή την περιοχή αυξήθηκε κατά 33% και έφτασε τα 23.056MW. Ενώ στις Η.Π.Α., το έτος 2002, η νέα εγκατεστημένη ισχύς ανήλθε στα 410MW ( αύξηση κατά 10%) και στον Καναδά περίπου 40MW. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε ότι η Ισπανία παράγει περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια από την χρησιμοποίηση αιολικών πάρκων απ' ότι οι Η.Π.Α.

Στο Σχήμα 1.4 παρουσιάζεται η παγκόσμια κατανομή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανεμογεννήτριες, επιπλέον παρακάτω παρατίθενται σχετικά στοιχεία της εγκατεστημένης ισχύος ανά χώρα ( Πίνακας 1.6 ).



Σχήμα 1.4 Η παγκόσμια κατανομή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανεμογεννήτριες

	Χώρα της ΕΕ	Ολική Εγκατεστημένη Ισχύς στο τέλος του 2005 (MW)
1	Γερμανία	18.428
2	Ισπανία	10.027
3	Δανία	3.122
4	Ιταλία	1.717
5	Ηνωμένο Βασίλειο	1.353
6	Ολλανδία	1.219
7	Πορτογαλία	1.022
8	Αυστρία	819
9	Γαλλία	757
10	Ελλάδα	573
11	Ιρλανδία	495,5
12	Σουηδία	500
13	Βέλγιο	167
14	Φιλανδία	82
15	Πολωνία	73
16	Λουξεμβούργο	35
17	Εσθονία	30
18	Λετονία	27
19	Τσεχία	26
20	Ουγγαρία	17
21	Λιθουανία	7
22	Σλοβακία	5
23	Κύπρος	0
24	Μάλτα	0
25	Σλοβενία	0
	ΕΕ	40.504

Πηγή: European Wind Energy Association, «Wind Power Installed in Europe by end of 2005».

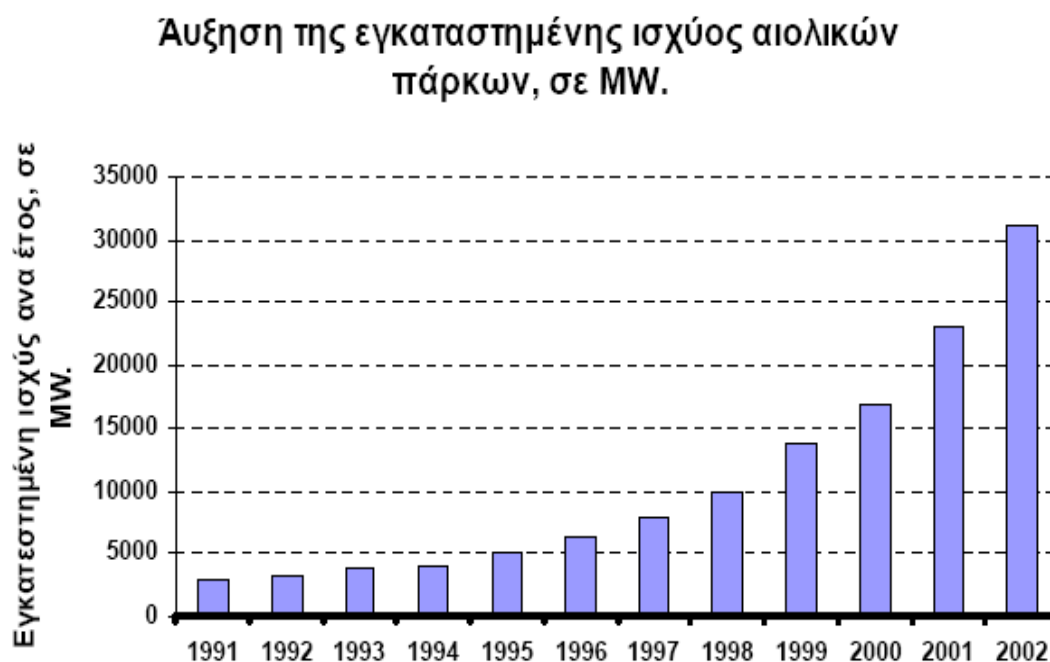
**Πίνακας 1.6 Εγκατεστημένη Ισχύς από Αιολικά στην Ευρωπαϊκή Ένωση**

Οι χώρες με την μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ είναι οι κάτωθι σε φθίνουσα σειρά:

1. Η Γερμανία, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ μεγαλύτερη από 18.000MW
2. Η Ισπανία.
3. Οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής.
4. Η Δανία.
5. Η Ινδία.

Σήμερα, τα αιολικά πάρκα ικανοποιούν περίπου το 0,4% της παγκόσμιας ζήτησης σε ηλεκτρική ενέργεια. Εάν υπάρξουν ισχυρότερες πολιτικές δεσμεύσεις, παγκοσμίως, τότε θα μπορούσαν να εγκατασταθούν περίπου 230.000MW μέχρι το 2010 και 1.2 εκατομμύρια MW μέχρι το 2020.

Στο Σχήμα 1.5 παρουσιάζεται η ανάπτυξη της εγκατεστημένης ισχύος αιολικών πάρκων ανά την υφήλιο.



Σχήμα 1.5 Η ανάπτυξη της εγκατεστημένης ισχύος αιολικών πάρκων ανά την υφήλιο

## 1.6 Ανακεφαλαίωση

Η πρώτη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανεμογεννήτρια επιτεύχθηκε γύρω στα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα. Η πρώτη μοντέρνα εναλλασσόμενου ρεύματος ανεμογεννήτρια κατασκευάστηκε στη Δανία στα τέλη της δεκαετίας του 1950. Η 200KW Gedser ανεμογεννήτρια ήταν 3 πτερυγίων, “upwind” μηχανή με μια ηλεκτρικής λειτουργίας εκτρεπόμενου μηχανισμού και ασυγχρόνιστης γεννήτριας. Αυτή η Δανέζικη ιδέα έγινε το προσχέδιο για πολλές ακόλουθες εξελίξεις στην ανεμογεννήτρια.

Η άνοδος στις τιμές πετρελαίου του OPEC του 1973 και 1979 διπλασίασαν το ενδιαφέρον στην αιολική ενέργεια. Οι μεγάλες αεροδιαστημικές και παροχής ηλεκτρισμού εταιρίες σχεδίασαν τουρμπίνες μεγάλα αλλά κανένα από αυτά τα ερευνητικά προγράμματα δεν κατέληξε σε εμπορικά βιώσιμες ιδέες. Περίπου το ίδιο διάστημα μικροί κατασκευαστές άρχισαν να εξελίσσουν και να κατασκευάζουν πολύ μικρότερες μηχανές βασισμένες στη Δανέζικη ιδέα. Αυτές άρχισαν να κυκλοφορούν εμπορικά στο 1980 και εξελίχθηκαν παράλληλα με την οδό της σταδιακής αύξησης μεγέθους στις υπάρχουσες εμπορικές μεγάλα τουρμπίνες. Μέσα σε αυτή την περίοδο έχουν υπάρξει αλματώδεις κατακτήσεις.

- Κατά τη διάρκεια των τελευταίων 15 ετών η ετήσια ενεργειακή παραγωγή ανά ανεμογεννήτρια έχει εκατονταπλασιαστεί.
- Η εγκατεστημένη ισχύς ανά ανεμογεννήτρια (για τις συνήθεις εμπορικές μηχανές) έχει αυξηθεί από 55kW σε 1MW ή και περισσότερο.
- Στα τελευταία 5 χρόνια το βάρος των ανεμογεννητριών ανά kW εγκατεστημένης ισχύος έχει μειωθεί στο μισό.
- Στα τελευταία 3 χρόνια το επίπεδο ήχου έχει μειωθεί στο μισό.
- Στα τελευταία 10 χρόνια η εγκατεστημένη ισχύς έχει δεκαπλασιαστεί.

Αυτοί οι παράγοντες έχουν διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στη μείωση του κόστους κεφαλαίου της αιολικής ενέργειας. Οι ανεμογεννήτριες έχουν καταστεί φθηνότερες στη παραγωγή τους, πιο επαρκής και πιο αξιόπιστες. Καθώς η βιομηχανία ωριμάζει, η τεχνογνωσία μείωσε το κόστος σε σχεδιασμό και εγκατάσταση και η ανάπτυξη της αγοράς έχει επιφέρει οικονομίες κλίμακας.

Το υπολογιζόμενο ρίσκο επένδυσης στην αιολική ενέργεια έχει επίσης μειωθεί, οδηγώντας σε χαμηλότερο κόστος για οικονομικό κεφάλαιο (ποσοστό έκπτωσης) και πιο μακροπρόθεσμες περιόδους χρεολυσίας (Wind Power Monthly, 2000).

Προοδευτικά, μεγαλύτερες μηχανές έχουν επιφέρει σημαντικές οικονομίες κλίμακας και όσον αφορά στο κόστος ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος «στο στρόβιλο» αλλά και ως προς την εξισορρόπηση της εργοστασιακής και ηλεκτρικής ολοκλήρωσης.

Μια 500KW μηχανή κοστίζει 5 φορές λιγότερο από μια 100KW μηχανή και το κόστος της γης, των ηλεκτρικών συνδέσεων, εγκατάστασης και απόδοσης αυξάνεται. Τα εργαλεία για βελτίωση των τοποθεσιών των ανεμογεννητριών έχουν βελτιωθεί επίσης.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>** **ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ**

### **2.1 Γενικά για μηχανές επαγωγής**

#### **2.1.1 Ηλεκτρική μηχανή ΕΡ**

Ηλεκτρική μηχανή είναι η συσκευή που μετατρέπει μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και αντίστροφα: όταν η συσκευή μετατρέπει μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ονομάζεται **γεννήτρια** ενώ όταν μετατρέπει την ηλεκτρική σε μηχανική ονομάζεται **κινητήρας**.

Οι ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος είναι γεννήτριες που μετατρέπουν μηχανική ενέργεια σε εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια και κινητήρες που μετατρέπουν εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Οι δυο βασικές κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται οι μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος είναι :

- **οι σύγχρονες μηχανές**
- **οι επαγωγικές (ασύγχρονες) μηχανές .**

Το ρεύμα διέγερσης των σύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών (γεννητριών και κινητήρων) παράγεται από ανεξάρτητες πηγές συνεχούς ρεύματος, ενώ το ρεύμα διέγερσης των επαγωγικών μηχανών παράγεται επαγωγικά (αρχή λειτουργίας του μετασχηματιστή) στα τυλίγματα διέγερσης τους.

Στις ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος το τύλιγμα του οπλισμού βρίσκεται σχεδόν πάντα τοποθετημένο στο στάτη ενώ το τύλιγμα διέγερσης τοποθετείται στο δρομέα. Το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του δρομέα μιας μηχανής εναλλασσόμενου ρεύματος επάγει τριφασικά εναλλασσόμενα ρεύματα στο τύλιγμα οπλισμού του στάτη.

Εντελώς ανάλογα, αν το τύλιγμα οπλισμού του στάτη της μηχανής τροφοδοτηθεί με ένα τριφασικό σύστημα ρευμάτων, στο εσωτερικό της αναπτύσσεται ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο το οποίο επιδρώντας στο πεδίο του δρομέα της μηχανής παράγει ροπή στον άξονα της. Τα δυο αυτά φαινόμενα αποτελούν τις εκδοχές της αρχής λειτουργίας της γεννήτριας και της αρχής λειτουργίας του κινητήρα.

#### **2.1.2 Ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες**

Στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης οι ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες επαγωγής είναι οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενοι καλύπτοντας ένα ευρύτατο φάσμα εφαρμογών με απαιτήσεις ισχύος που ξεκινούν από μερικά κλάσματα του Watt και φτάνουν μέχρι χιλιάδες ή εκατομμύρια Watts. Αυτό συμβαίνει διότι παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα όπως μικρό βάρος και όγκο, υψηλή αξιοπιστία και απόδοση και μεγάλη διάρκεια ζωής χωρίς ιδιαίτερες ανάγκες συντήρησης. Όλα τα ανωτέρω χαρακτηριστικά σε συνδυασμό με τους μοντέρνους αντιστροφείς και τις προηγμένες τεχνικές ελέγχου τους καθιστούν την ιδανική επιλογή για τα περισσότερα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης. Το ενδιαφέρον για νέες εφαρμογές αυξάνεται συνεχώς και ήδη υπάρχει η τάση αντικατάστασης των κινητήρων συνεχούς ρεύματος σε βιομηχανικό επίπεδο από τους πιο οικονομικούς και αξιόπιστους κινητήρες επαγωγής. Συνεπώς το

ερευνητικό ενδιαφέρον πάνω σε συστήματα ηλεκτρικής κίνησης με ασύγχρονους τριφασικούς κινητήρες επαγωγής είναι διαρκώς διογκούμενο καθώς τα αποτελέσματα έχουν μεγάλη πρακτική αξία

Υπάρχουν δυο είδη κινητήρων επαγωγής ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής του δρομέα :

- Ο πρώτος τύπος είναι ο κινητήρας τυλιγμένου δρομέα, ο δρομέας του οποίου εφοδιάζεται με τριφασικό τύλιγμα όμοιο με το αντίστοιχο του στατή (ίδιος αριθμός πόλων κλπ)
- Ο δεύτερος τύπος είναι ο κινητήρας με τύλιγμα κλωβού, ο δρομέας του οποίου αποτελείται από μεταλλικές μπάρες βραχυκύκλωνες στα άκρα.

**Η αρχή λειτουργίας της μηχανής επαγωγής είναι η ακόλουθη :**

*Το τύλιγμα του στάτη τροφοδοτείται με συμμετρικά τριφασικά εναλλασσόμενα ρεύματα. Το τύλιγμα του δρομέα αναπτύσσει ρεύματα εξ επαγωγής σε συχνότητα διαφορετική από τη συχνότητα του στάτη και συγκεκριμένα στη συχνότητα που αντιστοιχεί στη διαφορά ανάμεσα στη σύγχρονη ταχύτητα και την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα (συχνότητα ολισθήσεως).*

Έτσι το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που παράγουν τα ρεύματα εξ επαγωγής περιστρέφεται ως προς τον δρομέα με την ταχύτητα ολισθήσεως και έχει τελικά την ίδια ταχύτητα περιστροφής με το πεδίο του στάτη. Τα δυο πεδία παραμένουν λοιπόν ακίνητα το ένα ως προς το άλλο και έχουμε τις συνθήκες για ανάπτυξη σταθερής ροπής.

Τα τελευταία χρόνια οι μηχανές επαγωγής χρησιμοποιούνται με αυξανόμενο ρυθμό σαν γεννήτριες κυρίως σε αιολικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Επειδή η μηχανή επαγωγής δεν έχει ανεξάρτητη διέγερση, για να λειτουργήσει σαν γεννήτρια πρέπει να συνδεθεί με ένα τριφασικό σύστημα εναλλασσόμενης τάσεως, από το οποίο απορροφά άεργο ισχύ.

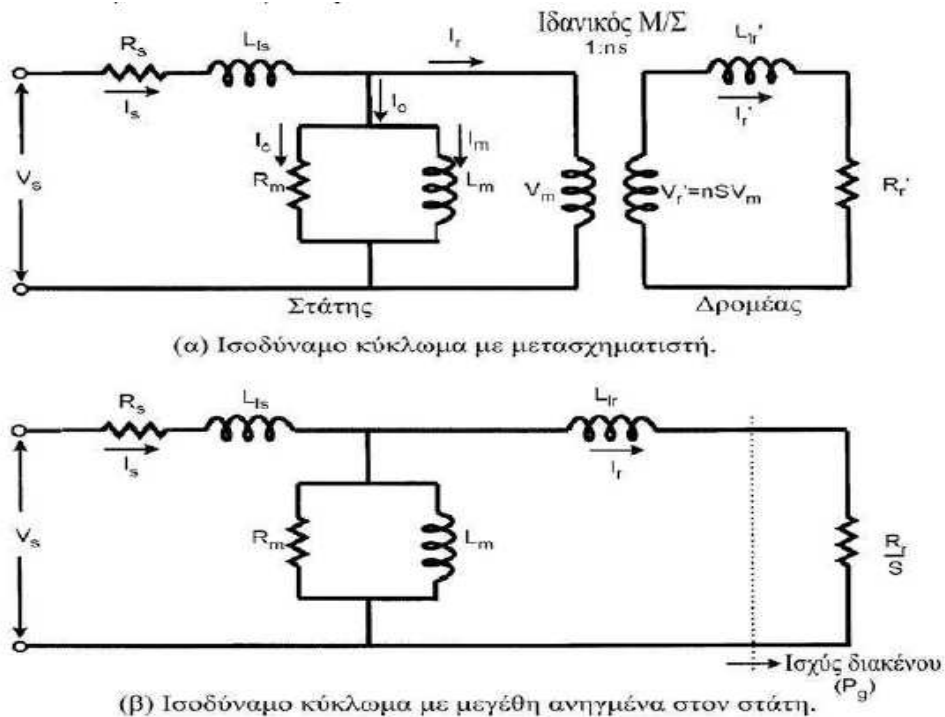
### 2.1.3 Ισοδύναμο κύκλωμα μηχανής επαγωγής

Στην ανάλυση και στο σχεδιασμό των μηχανών επαγωγής, το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα της μηχανής επαγωγής έχει ευρέως χρησιμοποιηθεί και φαίνεται στο σχήμα 2.1:

Στο κύκλωμα :

- $R_s$  και  $R_r$  είναι οι αντιστάσεις του στάτη και του δρομέα αντίστοιχα
- $L_m$  είναι η αλληλεπαγωγή των τυλιγμάτων στάτη-δρομέα ή επαγωγή μαγνήτισης (magnetizing inductance)
- $L_{l_s}$  και  $L_{l_r}$  είναι η αυτεπαγωγές σκεδάσεως του τυλίγματος του στάτη (stator leakage inductance) και του δρομέα (rotor leakage inductance) αντίστοιχα.
- $V_s$  τάση στάτη ή της πηγής (δίκτυο)
- $S$  η ολίσθηση





Σχήμα 2.1 Ισοδύναμο ανά φάση κύκλωμα της ασύγχρονης τριφασικής μηχανής επαγωγής στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Στον στάτη της μηχανής εφαρμόζεται η τάση  $V_s$  της πηγής (δίκτυο). Ανάλογα με το αν τα τριφασικά τυλίγματα της μηχανής είναι συνδεδεμένα κατ' αστέρα ή σε τρίγωνο η τάση αυτή είναι η φασική ή η πολική τάση του δικτύου αντίστοιχα. Το ανά φάση τύλιγμα του στάτη παρίσταται από μια ωμική αντίσταση  $R_s$  και μια επαγωγή  $L_{ls}$  (πηνίο). Η αντίσταση προσομοιώνει τις απώλειες Joule (θερμότητα) στο τύλιγμα λόγω της κυκλοφορίας ρεύματος σε αυτό, ενώ η επαγωγή προσομοιώνει τη σκέδαση (ροή που δημιουργείται από το τύλιγμα και εμπλέκει το ίδιο το τύλιγμα χωρίς να εμπλέκει άλλα τυλίγματα της μηχανής) του μαγνητικού πεδίου του τυλίγματος.

Η επαγωγή  $L_{ls}$  ονομάζεται και αυτεπαγωγή του τυλίγματος του στάτη (stator leakage inductance). Ο εγκάρσιος κλάδος που ακολουθεί και αποτελείται από μια ωμική αντίσταση παράλληλα με μια επαγωγή καλείται κλάδος μαγνήτισης. Ο κλάδος μαγνήτισης διαρρέεται από το ρεύμα πυρήνα ( $I_0$ ) το οποίο αποτελείται από δύο συνιστώσες: το ρεύμα απωλειών πυρήνα ( $I_c$ ) και από το ρεύμα μαγνήτισης ( $I_m$ ). Το ρεύμα απωλειών πυρήνα ( $I_c$ ) διαρρέει την αντίσταση  $R_m$ , η οποία συμβολίζει τις θερμικές απώλειες του σιδηρομαγνητικού πυρήνα από τον συνεχή επαναπροσανατολισμό των στοιχειωδών μαγνητικών δίπολων του μαγνητικού υλικού (υστέρηση) και από τα δινορρέυματα. Το ρεύμα μαγνήτισης ( $I_m$ ) διαρρέει την επαγωγή  $L_m$ , η οποία μοντελοποιεί το μαγνητικό πεδίο εντός της μηχανής που εμπλέκει τα τυλίγματα στάτη και δρομέα. Η επαγωγή  $L_m$  ονομάζεται και αλληλεπαγωγή τυλιγμάτων στάτη-δρομέα ή επαγωγή μαγνήτισης (magnetizing inductance).

Επιπλέον, στο ισοδύναμο αυτό κύκλωμα, όλες οι μεταβλητές και οι παράμετροι του δρομέα δεν είναι οι πραγματικές τους τιμές αλλά οι ποσότητες που είναι ανηγμένες στο στάτη.

Είναι επίσης γνωστό ότι οι μηχανές επαγωγής δεν στρέφονται σύγχρονα με την συχνότητα διέγερσης. Σε ονομαστικό φορτίο η ταχύτητα της μηχανής επαγωγής είναι ελαφρώς μικρότερη, κατά 2-7% από την σύγχρονη ταχύτητα.

Εάν

- $\omega_e$  (rad/s) είναι η σύγχρονη κυκλική συχνότητα
- $\omega_r$  (rad/s) είναι η πραγματική κυκλική συχνότητα περιστροφής της μηχανής (του δρομέα)
- $\omega_{slip}$  (rad/s) η κυκλική συχνότητα ολίσθησης

Τότε η ολίσθηση ορίζεται  $S = \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_e} = \frac{\omega_{slip}}{\omega_e}$

Με εύρος τιμών  $0 < S < 1$  αφού  $\omega_e > \omega_r$

Η επαγωγή του στάτη  $L_s$  και του δρομέα  $L_r$  ορίζονται ως εξής:

$$L_s = L_{ls} + L_m$$

$$L_r = L_{lr} + L_m$$

Όπου  $L_{ls}$  και  $L_{lr}$  είναι η αυτεπαγωγή του τυλίγματος του στάτη (stator leakage inductance) και του δρομέα (rotor leakage inductance) αντίστοιχα.

Η παραγόμενη ροπή δίνεται από τον τύπο :

$$T_e = \frac{P}{2\omega_e} i_r^2 \frac{R_r}{s}$$

Παρόλο που το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα είναι χρήσιμο στην ανάλυση και στην πρόβλεψη της μόνιμης κατάστασης δεν είναι ικανό να εξηγήσει την δυναμική απόδοση της μηχανής επαγωγής.

## 2.2 Δυναμικό μοντέλο μηχανής επαγωγής

Σε έναν πραγματικό κινητήρα τα τυλίγματα του δρομέα (rotor) διαφέρουν από τα τυλίγματα του στάτη (stator), δηλαδή ο αριθμός των σπειρών-ελιγμάτων των ανά φάση των τυλιγμάτων του δρομέα  $N_r$  δεν είναι ίσος με τον αριθμό  $N_s$  των ελιγμάτων των τυλιγμάτων του στάτη.

Οι εξισώσεις τάσης που περιγράφουν το κύκλωμα του στάτη και του δρομέα μπορούν να γραφούν στην παρακάτω μορφή πίνακα [21]:

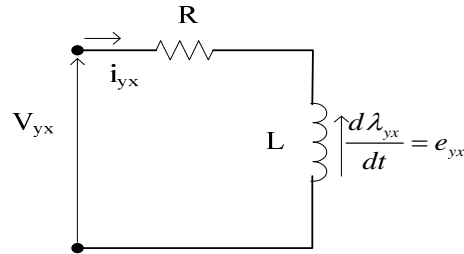
$$\begin{bmatrix} v_{abcs} = r_s i_{abcs} + p \lambda_{abcs} \\ v_{abcr} = r_r i_{abcr} + p \lambda_{abcr} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Όπου :

- $p$  αναπαριστά το διαφορικό  $\frac{d}{dt}$  και
- τα διανύσματα  $v_{abcx}$ ,  $i_{abcx}$  και  $\lambda_{abcx}$  ( $x = r$  ή  $s$ ) ορίζονται ως εξής :

$$v_{abcx} = \begin{pmatrix} v_{ax} \\ v_{bx} \\ v_{cx} \end{pmatrix} \quad i_{abcx} = \begin{pmatrix} i_{ax} \\ i_{bx} \\ i_{cx} \end{pmatrix} \quad \lambda_{abcx} = \begin{pmatrix} \lambda_{ax} \\ \lambda_{bx} \\ \lambda_{cx} \end{pmatrix}$$

Οι παραπάνω εξισώσεις τάσης προκύπτουν από την αναπαράσταση των ελιγμάτων του στάτη ή του δρομέα ως ένα απλό RL κύκλωμα όπου ο νόμος Faraday χρησιμοποιείται για να καθορίσει μια ηλεκτρεγερτική δύναμη  $e_{yx}$  επαγόμενη σε ένα πηνίο από μια χρονομεταβλητή ροή  $\lambda_{yx}$  [6]



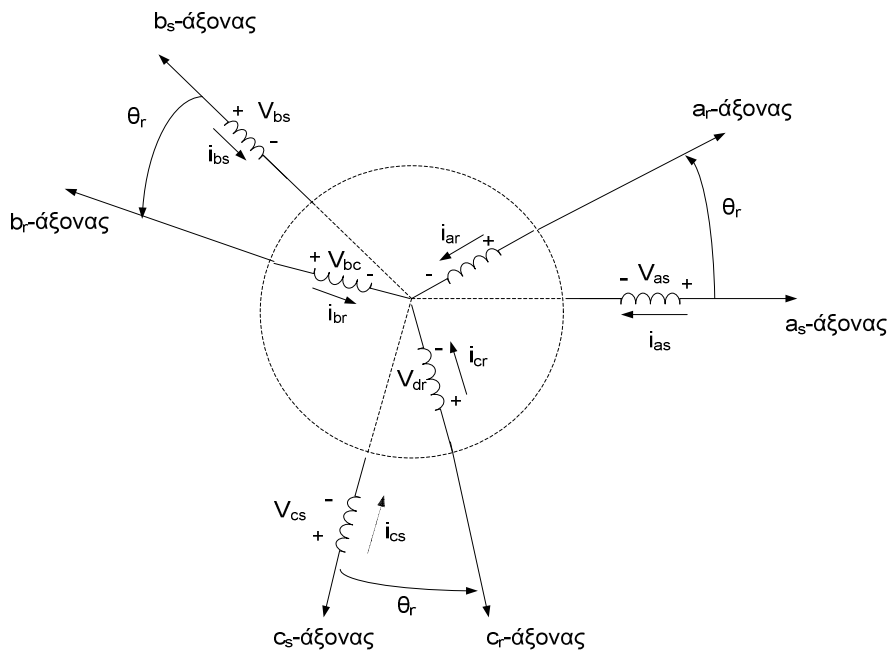
Σχήμα 2.2 R-L Κύκλωμα

Στο παραπάνω σχήμα ο δείκτης y αναφέρεται στα ελίγματα a, b ή c και ο δείκτης x χρησιμοποιείται για να καθορίσει τα ελίγματα του στάτη ή του δρομέα  $x = s$  ή  $x = r$ .

Γενικά, υπάρχει σύζευξη μεταξύ όλων των φάσεων του στάτη και του δρομέα όπως εξηγείται παρακάτω [21]:

Με το σχηματισμό των μαγνητικών αξόνων μιας τριφασικής επαγωγικής μηχανής όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3 και με τα τυλίγματα του στάτη να έχουν τον ίδιο αριθμό ελιγμάτων  $N_s$  και να είναι συμμετρικά τοποθετημένα ανά  $120^\circ$ , η αυτεπαγωγή των φάσεων του στάτη προκύπτει ως το άθροισμα της αυτεπαγωγής μαγνήτισης της κάθε μιας φάσης  $L_{ym}$  ( $y = a, b, c$ ) και της αυτεπαγωγής σκεδάσεως του τυλίγματος του στάτη  $L_{ls}$ .

$$\begin{aligned} L_{as} &= L_{ls} + L_{am} \\ L_{bs} &= L_{ls} + L_{bm} \\ L_{cs} &= L_{ls} + L_{cm} \end{aligned} \quad (2.2)$$



Σχήμα 2.3 Μαγνητικοί άξονες τριφασικής μηχανής επαγωγής

Λόγω συμμετρίας των τυλιγμάτων των φάσεων  $as, bs$  και  $cs$  είναι φανερό ότι οι αυτεπαγωγές μαγνήτισης αυτών των τυλιγμάτων είναι ίδιες, κάνοντας με αυτόν τον τρόπο τις αυτεπαγωγές των φάσεων του στάτη ίσες:

$$L_{as} = L_{bs} = L_{cs}$$

όπου  $L_{ms} = L_{am} = L_{bm} = L_{cm}$

Οι αλληλεπαγωγές μεταξύ των τυλιγμάτων των τριών φάσεων  $as-bs, bs-cs$  και  $cs-as$  δίνονται από

$$L_{abs} = L_{bcs} = L_{cas} = -\frac{L_{ms}}{2}$$

Οι πεπλεγμένες ροές των φάσεων  $as, bs$  και  $cs$ , που προκύπτουν από τα ρεύματα που διαρρέουν τα τυλίγματα του στάτη μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$\lambda_{abc_s(s)} = L_{s(s)} i_{abc_s} = \begin{pmatrix} L_{l_s} + L_{m_s} & -\frac{L_{m_s}}{2} & -\frac{L_{m_s}}{2} \\ -\frac{L_{m_s}}{2} & L_{l_s} + L_{m_s} & -\frac{L_{m_s}}{2} \\ -\frac{L_{m_s}}{2} & -\frac{L_{m_s}}{2} & L_{l_s} + L_{m_s} \end{pmatrix} i_{abc_s} \quad (2.3)$$

Από την άλλη πλευρά οι πεπλεγμένες ροές των φάσεων του στάτη εξαιτίας των ρευμάτων στο κύκλωμα του δρομέα μπορούν να εκφραστούν ως :

$$\lambda_{abc_s(r)} = N \cdot L_{s(r)} i_{abc_r} = N \cdot L_{ms} \begin{pmatrix} \cos \theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta_r \end{pmatrix} i_{abc_r} \quad (2.4)$$

Όπου  $N = \frac{Nr}{Ns}$  είναι ο λόγος του αριθμού των ελιγμάτων του δρομέα προς τον αριθμό των ελιγμάτων του στάτη.

Η ολική πεπλεγμένη ροή στα τυλίγματα του στάτη εξαιτίας και των δυο ρευμάτων , του στάτη και του δρομέα , δίνεται από:

$$\lambda_{abc_s} = \lambda_{abc_s(s)} + \lambda_{abc_s(r)} \quad (2.5)$$

Εντελώς ανάλογες εκφράσεις ορίζονται και για το τριφασικό τύλιγμα του δρομέα με μόνη διαφορά των αριθμό των ελιγμάτων  $N_r$  και προκύπτει ότι:

Η πεπλεγμένη ροή, στο κύκλωμα του δρομέα εξαιτίας των ρευμάτων του δρομέα, δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\lambda_{abc_r(r)} = L_{r(r)} \cdot i_{abc_r} = \begin{pmatrix} L_{l_r} + N^2 L_{ms} & -\frac{1}{2} N^2 L_{ms} & -\frac{1}{2} N^2 L_{ms} \\ -\frac{1}{2} N^2 L_{ms} & L_{l_r} + N^2 L_{ms} & -\frac{1}{2} N^2 L_{ms} \\ -\frac{1}{2} N^2 L_{ms} & -\frac{1}{2} N^2 L_{ms} & L_{l_r} + N^2 L_{ms} \end{pmatrix} i_{abc_r} \quad (2.6)$$

Όπου  $L_{l_r}$  είναι η αυτεπαγωγή σκεδάσεως του τυλίγματος του δρομέα.

Από την άλλη πλευρά η πεπλεγμένη ροή, στα τυλίγματα του δρομέα εξαιτίας των ρευμάτων στο κύκλωμα του στάτη, μπορεί να εκφρασθεί :

$$\lambda_{abc_r(s)} = N \cdot L_{r(s)} \cdot i_{abc_s} = N \cdot L_{ms} \begin{pmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r \end{pmatrix} i_{abc_s} \quad (2.7)$$

Η συνολική πεπλεγμένη ροή του δρομέα στα τυλίγματα του δρομέα εξαιτίας και των δυο ρευμάτων ,του στάτη και του δρομέα , δίνεται από την σχέση:

$$\lambda_{abc_r} = \lambda_{abc_r(r)} + \lambda_{abc_r(s)} \quad (2.8)$$

Ο λόγος των ελιγμάτων  $N = \frac{N_r}{N_s}$  εμφανίζονται καθώς ο επαγωγικός κινητήρας είναι απλά ένα είδος συζευγμένου μαγνητικού κυκλώματος. Μπορούμε να ξεφορτωθούμε την σαφή εξάρτηση των παραπάνω εκφράσεων από τον λόγο των ελιγμάτων  $N$ , εάν ανάγουμε το κύκλωμα του δρομέα στο κύκλωμα του στάτη με τον ίδιο ακριβώς τρόπο σαν να χρησιμοποιούσαμε μετασχηματιστή, σύμφωνα με τις σχέσεις :

$$i'_{abc_r} = N \cdot i_{abc_r} \quad v'_{abc_r} = \frac{1}{N} \cdot v_{abc_r} \quad \lambda'_{abc_r} = \frac{1}{N} \cdot \lambda_{abc_r}$$

$$r'_r = \frac{1}{N^2} \cdot r_r \quad L'_{l_r} = \frac{1}{N^2} \cdot L_{l_r} L'_{s(r)} = \frac{1}{N} \cdot L_{s(r)} L'_{r(s)} = \frac{1}{N} \cdot L_{r(s)}$$

Σαν αποτέλεσμα του παραπάνω μετασχηματισμού το πραγματικό τύλιγμα του ρότορα αντικαθίσταται από ένα ισοδύναμο τύλιγμα, με τον ίδιο αριθμό ελιγμάτων με το τύλιγμα του στάτη, ενώ παράλληλα διατηρούνται οι απώλειες στο τύλιγμα, η ηλεκτρική ισχύς εισόδου στο ρότορα και η αποθηκευμένη μαγνητική ενέργεια στις αυτεπαγωγές σκεδάσεως.

Η εξίσωση τάσης του δρομέα γίνεται :

$$v'_{abc_r} = r'_r i'_{abc_r} + p \lambda'_{abc_r} \quad (2.9)$$

Η συνολική πεπλεγμένη ροή στα τυλίγματα του στάτη γίνεται :

$$\lambda_{abc_s} = L_{s(s)} \cdot i_{abc_s} + L'_{s(r)} \cdot i'_{abc_r} \quad (2.10)$$

Η συνολική πεπλεγμένη ροή στα τυλίγματα του δρομέα γίνεται :

$$\lambda_{abcr} = L_{r(r)} \cdot i_{abcr} + L'_{r(s)} \cdot i'_{abcs} \quad (2.11)$$

Όπου

$$L_{r(r)} = \begin{pmatrix} L_{lr}' + L_{ms} & -\frac{L_{ms}}{2} & -\frac{L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}}{2} & L_{lr}' + L_{ms} & -\frac{L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}}{2} & -\frac{L_{ms}}{2} & L_{lr}' + L_{ms} \end{pmatrix}$$

Οι πεπλεγμένες ροές μπορούν τώρα να εκφραστούν ως :

$$\begin{pmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda_{abcr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{s(s)} & L'_{s(r)} \\ L'_{r(s)} & L'_{r(r)} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_{abcs} \\ i'_{abcr} \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

Και οι εξισώσεις τάσης εκφρασμένες με όρους μεταβλητών της μηχανής αναφερόμενες σε σταθερά τυλίγματα μπορούν να γραφούν :

$$\begin{pmatrix} v_{abcs} \\ v'_{abcr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_s + pL_{s(s)} & p \cdot L'_{s(r)} \\ p \cdot L'_{r(s)} & r_r' + p \cdot L'_{r(r)} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_{abcs} \\ i'_{abcr} \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

## 2.3 Μοντέλο μηχανής επαγωγής σε χωρικά διανύσματα

### 2.3.1 Εισαγωγή

Η έννοια του διανυσματικού ελέγχου έχει δώσει τη δυνατότητα οι μηχανές επαγωγής να ελεγχθούν έτσι ώστε να πετύχουν καλή δυναμική απόδοση όπως μια dc μηχανή.

Παρόλο που το κλασσικό ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα έχει κυρίως χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση μόνιμης κατάστασης (steady state analysis) και στο σχεδιασμό των μηχανών επαγωγής, δεν είναι το κατάλληλο για να προβλέψει την δυναμική απόδοση της μηχανής. Για να γίνει κατανοητός και να αναλυθεί ο διανυσματικός έλεγχος των μηχανών επαγωγής, είναι απαραίτητο το δυναμικό μοντέλο της μηχανής. Έχει αποδειχθεί ότι οι δυναμικές εξισώσεις του μοντέλου που αναπτύσσονται σε ένα περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς είναι καλύτερο να περιγράψουν τα χαρακτηριστικά των μηχανών επαγωγής.

Σκοπός του κεφαλαίου είναι να δείξει και να αναλύσει το μοντέλο της μηχανής επαγωγής χρησιμοποιώντας την έννοια των χωρικών διανυσμάτων και των d-q μεταβλητών. Δυσμενώς, οι εξισώσεις του δυναμικού μοντέλου είναι σύνθετες και υπάρχουν διαφορετικές περιπτώσεις του μοντέλου που εξαρτώνται από το σύστημα αναφοράς. Έχει όμως αποδειχθεί ότι όταν επιλεγούμε ένα σύγχρονο σύστημα αναφοράς με

τη ροή του δρομέα ευθυγραμμισμένη με τον d-άξονα, οι δυναμικές εξισώσεις απλοποιούνται και ο διανυσματικός έλεγχος γίνεται εφικτός.

Οι εξισώσεις τάσεως που περιγράφουν τη λειτουργία των ασύγχρονων τριφασικών μηχανών επαγωγής είναι διαφορικές εξισώσεις με συντελεστές που μεταβάλλονται στον χρόνο (χρονομεταβλητές), καθώς ο δρομέας της μηχανής περιστρέφεται. Επειδή η αναλυτική τους επίλυση είναι δύσκολη συνήθως επιχειρείται μια απλοποίηση της επίλυσής τους, μέσω κατάλληλων αλγεβρικών μετασχηματισμών (αλλαγή μεταβλητών), οι οποίοι τελικά θα τις μετατρέψουν σε συνήθεις διαφορικές εξισώσεις με σταθερούς στο χρόνο συντελεστές [7].

Γενικά, έχουν χρησιμοποιηθεί διάφοροι αλγεβρικοί μετασχηματισμοί οι οποίοι αποτελούσαν ειδικές περιπτώσεις ενός γενικού αλγεβρικού μετασχηματισμού που αναφέρεται στην αναγωγή όλων των μεταβλητών της μηχανής σε ένα πλαίσιο αναφοράς που περιστρέφεται με αυθαίρετη γωνιακή ταχύτητα (arbitrary reference frame). Όλες οι υπόλοιπες περιπτώσεις μετασχηματισμών που έχουν παρουσιαστεί εμπίπτουν στον γενικό αυτό μετασχηματισμό. Η μοναδική παράμετρος που τις διαφοροποιεί είναι η «αυθαίρετη» ταχύτητα περιστροφής του πλαισίου αναφοράς, η οποία για παράδειγμα μπορεί να είναι η σύγχρονη ταχύτητα, η μηδενική ταχύτητα –στατό πλαίσιο αναφοράς κτλ.

Στα τέλη του 1920, ο R.H. Park εισήγαγε μια νέα προσέγγιση στην ανάλυση των ηλεκτρικών μηχανών. Αντικατέστησε τις μεταβλητές (ρεύματα, τάσεις και πεπλεγμένες ροές) που σχετίζονταν με τα τυλίγματα του στάτη μιας σύγχρονης μηχανής σε μεταβλητές φανταστικών τυλιγμάτων που περιστρέφονταν μαζί με το δρομέα, εξαλείφοντας με αυτόν τον τρόπο όλες τις χρονομεταβλητές επαγωγές από τις εξισώσεις τάσης.

Στα τέλη του 1930, ο H.C. Stanley έδειξε ότι οι χρονομεταβλητές επαγωγές στις εξισώσεις τάσης μιας επαγωγικής μηχανής μπορούν να εξαλειφθούν εάν οι μεταβλητές του δρομέα μετασχηματιστούν σε μεταβλητές σε ένα σύστημα αναφοράς που περιστρέφεται μαζί με το στατή. (μηδενική ταχύτητα).

Ο G. Kron πρότεινε μια αλλαγή μεταβλητών όπου εξάλειψε τις χρονομεταβλητές αμοιβαίες επαγωγές μιας επαγωγικής μηχανής εάν μετασχηματίζονταν και οι μεταβλητές του δρομέα και του στάτη μαζί σε ένα σύστημα αναφοράς περιστρεφόμενο με τη σύγχρονη ταχύτητα του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου.

Τέλος, ο D.S Brereton, πρότεινε και πάλι για τις συμμετρικές ασύγχρονες μηχανές επαγωγής την αναγωγή όλων των μεταβλητών σε ένα πλαίσιο αναφοράς που περιστρέφεται με την ταχύτητα του δρομέα.

Όλοι οι παραπάνω μετασχηματισμοί, αν και φαίνονται εντελώς διαφορετικοί μεταξύ τους, αποτελούν ειδικές περιπτώσεις ενός γενικού αλγεβρικού μετασχηματισμού μεταβλητών, ο οποίος απαλείφει όλες τις χρονομεταβλητές επαγωγές με την ανάγωση όλων των μεταβλητών στάτη και δρομέα σε ένα κοινό πλαίσιο αναφοράς το οποίο μπορεί να περιστρέφεται με οποιαδήποτε αυθαίρετη ταχύτητα ή να παραμένει ακίνητο. Όλοι οι γνωστοί μετασχηματισμοί μπορούν να ληφθούν απλά επιλέγοντας την κατάλληλη ταχύτητα περιστροφής για αυτό το πλαίσιο αναφοράς που στρέφεται με αυθαίρετη ταχύτητα.

### **2.3.2 Θεωρία συστήματος αναφοράς**

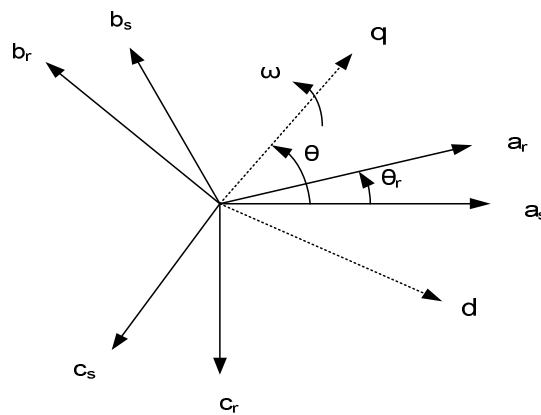
Εκτός από τη χρήση αλλαγής μεταβλητών στην ανάλυση των a.c. (εναλλασσόμενων) μηχανών για να εξαλειφθούν οι χρονομεταβλητές επαγωγές, οι μεταβλητές όλων των στοιχείων ενός γενικού ηλεκτρικού συστήματος μπορεί επίσης να αλλάξει κάτω από ένα

γενικό μετασχηματισμό που χρησιμοποιείται για τις μεταβλητές του δρομέα και του στάτη μιας επαγωγικής μηχανής.

Σε αυτό το σημείο είναι προτιμότερο να θεωρήσουμε μόνο τις μεταβλητές του στάτη και στη συνέχεια να τροποποιήσουμε την ανάλυση για τις μεταβλητές του δρομέα [21].

Οι εξισώσεις του μετασχηματισμού μπορούν να θεωρηθούν ως, καθώς οι άξονες  $d$  και  $q$  είναι ορθογώνιοι μεταξύ τους και περιστρέφονται με μια αυθαίρετη γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4. Επίσης φαίνεται από το σχήμα ότι οι άξονες αναφοράς ανταποκρίνονται στους μαγνητικούς άξονες των 3-φασικών κυκλωμάτων του στάτη και του δρομέα.

Η γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  και η γωνιακή μετατόπιση  $\theta$  του συστήματος αναφοράς σχετίζονται ως εξής:  $\omega = \frac{d\theta}{dt}$



Σχήμα 2.4 Σχηματική αναπαράσταση των αξόνων  $d$  και  $q$  πλαισίου αναφοράς με αυθαίρετη ταχύτητα περιστροφής

Θεωρώντας αρχικά μόνο τις μεταβλητές κατά μήκος των  $a$ ,  $b$  και  $c$  αξόνων του στάτη, μπορούν να αναχθούν στους άξονες  $d$ - $q$  μέσω των σχέσεων :

$$\begin{aligned} f_{qs} &= \frac{2}{3} \left( f_{as} \cos \theta + f_{bs} \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) + f_{cs} \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \\ f_{ds} &= \frac{2}{3} \left( f_{as} \sin \theta + f_{bs} \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) + f_{cs} \sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \end{aligned} \quad (2.14)$$

Όπου το σύμβολο  $f$  αναπαριστά μεταβλητές όπως τάση, ρεύμα ή πεπλεγμένη ροή και ο συντελεστής  $\frac{2}{3}$  έχει επιλεγεί έτσι ώστε να διατηρεί την ίδια τιμή της τάσης και του ρεύματος για ημιτονοειδή μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Με σκοπό να αποκτήσουμε ένα μοναδικό μετασχηματισμό είναι απαραίτητο να ορίσουμε μια τρίτη νέα μεταβλητή κάθετη στο επίπεδο  $d$ - $q$ , η οποία ορίζεται ως συνιστώσα μηδενικής ακολουθίας

$$f_{0s} = \frac{1}{3} (f_{as} + f_{bs} + f_{cs}) \quad (2.15)$$



Σημειώνουμε ότι σε πρακτικές εφαρμογές η μηχανή είναι συνδεδεμένη είτε σε δέλτα είτε σε αστέρα χωρίς ουδέτερο μονοπάτι και οι μεταβλητές των τριών φάσεων έχουν άθροισμα μηδέν.

Ο μετασχηματισμός των μεταβλητών του στάτη των τριών φάσεων σε ένα αυθαίρετο σύστημα αναφοράς μπορεί να γραφεί σε μορφή πίνακα ως:

$$f_{qd0s} = K_s \cdot f_{abcs} \quad (2.16)$$

Όπου

$$(f_{qd0s})^T = (f_{qs} \quad f_{ds} \quad f_{0s})$$

$$(f_{abcs})^T = (f_{as} \quad f_{bs} \quad f_{cs})$$

με μήτρα μετασχηματισμού

$$K_s = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix}$$

Μπορεί να αποδειχθεί ότι για τον αντίστροφο μετασχηματισμό ισχύει:

$$(K_s)^{-1} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{pmatrix}$$

Οι μεταβλητές  $f_{0s}$  δεν συσχετίζονται με το αυθαίρετο σύστημα αναφοράς αλλά συσχετίζονται αριθμητικά με τις μεταβλητές a,b,c, οι οποίες είναι στιγμιαίες ποσότητες και μπορούν να είναι οποιαδήποτε συνάρτηση του χρόνου.

Εάν η κατεύθυνση των  $f_{as} \quad f_{bs} \quad f_{cs}$  μπορεί να θεωρηθεί όπως η κατεύθυνση των μαγνητικών αξόνων των τυλιγμάτων του στάτη, τότε η κατεύθυνση των μεταβλητών  $f_{qs}$  και  $f_{ds}$  μπορεί να θεωρηθεί σαν την κατεύθυνση των μαγνητικών αξόνων των νέων τυλιγμάτων που προκύπτουν από την αλλαγή των μεταβλητών.

Εάν πολλαπλασιάσουμε με  $j$  την εξίσωση του παράγοντα  $f_{ds}$  και το αποτέλεσμα αφαιρεθεί από το  $f_{qs}$  παίρνουμε:

$$\underline{f}_{gds} = f_{qs} - j \cdot f_{ds} = \frac{2}{3} (f_{as} \cdot e^{-j\theta} + f_{bs} \cdot e^{-j(\theta - \frac{2\pi}{3})} + f_{cs} \cdot e^{-j(\theta + \frac{2\pi}{3})}) \quad (2.17)$$

Όπου έχει χρησιμοποιηθεί η εξίσωση του Euler :  $e^{j\theta} = \cos \theta + j \sin \theta$

Ορίζοντας  $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$

Η εξίσωση παίρνει τη μορφή :  $\underline{f}_{qds} = \frac{2}{3} e^{-j\theta} (f_{as} + a \cdot f_{bs} + a^2 \cdot f_{cs})$  (2.18)

Εάν ορίσουμε  $\underline{f}_{abcs} = \frac{2}{3} (f_{as} + a \cdot f_{bs} + a^2 \cdot f_{cs})$  (2.19)

Η εξίσωση γίνεται :  $\underline{f}_{qds} = e^{-j\theta} \cdot \underline{f}_{abcs}$  (2.20)

Οι ποσότητες  $\underline{f}_{abcs}$  που ορίσαμε παραπάνω, ονομάζονται χωρικά διανύσματα και όταν η συνιστώσα μηδενικής ακολουθίας είναι μηδέν, η εν λόγω ποσότητα περιγράφει απόλυτα το μετασχηματισμό.

Στην ανάλυση των μηχανών επαγωγής είναι επίσης επιθυμητό να μετασχηματιστούν οι μεταβλητές που σχετίζονται με τα συμμετρικά ελίγματα του δρομέα στο αυθαίρετο σύστημα αναφοράς. Σε αυτή την περίπτωση, ωστόσο, καθώς ο δρομέας ήδη περιστρέφεται από μόνος του, μια σχετική γωνία περιστροφής αντί της γωνίας  $\theta$  πρέπει να χρησιμοποιηθεί. Ο μετασχηματισμός μπορεί να γραφτεί σε μορφή πίνακα ως εξής:

$$\underline{f}_{qd0r} = K_r \cdot \underline{f}_{abcr} \quad (2.21)$$

Όπου

$$\left( \underline{f}_{qd0r} \right)^T = \left( f_{qr} \quad f_{dr} \quad f_{0r} \right)$$

$$\left( \underline{f}_{abcr} \right)^T = \left( f_{ar} \quad f_{br} \quad f_{cr} \right)$$

$$K_r = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & \cos(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta - \theta_r) & \sin(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix}$$

Μπορεί να αποδειχθεί ότι για τον αντίστροφο μετασχηματισμό ισχύει:

$$(K_r)^{-1} = \begin{pmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & \sin(\theta - \theta_r) & 1 \\ \cos(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{pmatrix}$$

Υπό τη μορφή χωρικών διανυσμάτων η εξίσωση μετασχηματισμού γίνεται :

$$\underline{f}_{abcr} = \frac{2}{3} (f_{ar} + a \cdot f_{br} + a^2 \cdot f_{cr}) \quad (2.22)$$

Εάν ορίσουμε

$$\underline{f}_{abcr} = \frac{2}{3} (f_{ar} + a \cdot f_{br} + a^2 \cdot f_{cr}) \quad (2.23)$$

Προκύπτει :

$$\underline{f}_{qdr} = e^{-j(\theta-\theta_r)} \cdot \underline{f}_{abcr} \quad (2.24)$$

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός για να βρεθούν οι φυσικές μεταβλητές του στάτη και του δρομέα από τα χωρικά διανύσματα μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\begin{aligned} \underline{f}_{qds} &= \frac{2}{3} e^{-j\theta} (f_{as} + a \cdot f_{bs} + a^2 \cdot f_{cs}) \\ &= \frac{2}{3} e^{-j\theta} \left( f_{as} - \frac{1}{3} \cdot (f_{as} + f_{bs} + f_{cs}) + j \frac{1}{\sqrt{3}} (f_{bs} - f_{cs}) \right) \\ &= \frac{2}{3} e^{-j\theta} \left( f_{as} - \frac{1}{2} \cdot f_{bs} - \frac{1}{2} \cdot f_{cs} + j \left( \frac{\sqrt{3}}{2} f_{bs} - \frac{\sqrt{3}}{2} f_{cs} \right) \right) \\ &= \frac{2}{3} e^{-j\theta} \left( f_{as} - \frac{1}{2} \cdot f_{bs} - \frac{1}{2} \cdot f_{cs} + j \left( \frac{\sqrt{3}}{2} f_{bs} - \frac{\sqrt{3}}{2} f_{cs} \right) \right) \end{aligned} \quad (2.25)$$

Με τον ίδιο τρόπο για τις μεταβλητές του δρομέα παίρνουμε:

$$\underline{f}_{qdr} = e^{-j(\theta-\theta_r)} \cdot \left( f_{ar} - \frac{1}{3} \cdot (f_{ar} + f_{br} + f_{cr}) + j \frac{1}{\sqrt{3}} (f_{br} - f_{cr}) \right) \quad (2.26)$$

Θεωρώντας ότι οι συνιστώσες μηδενικής ακολουθίας  $f_{0r}$  και  $f_{0s}$  είναι ίσες με το μηδέν, λαμβάνουμε ότι :

$$f_{ax} = \text{Re}[\underline{f}_{abcx}] f_{bx} = \text{Re}[a^2 \cdot \underline{f}_{abcx}] f_{cx} = \text{Re}[a \cdot \underline{f}_{abcx}] \quad \text{με } x = r \text{ ή } s \quad (2.27)$$

### 2.3.3 Δυναμικό μοντέλο μηχανών επαγωγής με χωρικά διανύσματα

Ο μετασχηματισμός του συστήματος εξισώσεων (2.1) των κυκλωμάτων του στάτη και του δρομέα της μηχανής επαγωγής με χωρικά διανύσματα οδηγεί στο παρακάτω σύστημα εξισώσεων [3],[21]:

$$\begin{cases} \underline{v}_{abcs} = r_s \underline{i}_{abcs} + p \underline{\lambda}_{abcs} \\ \underline{v}'_{abcr} = r_r \underline{i}'_{abcr} + p \underline{\lambda}'_{abcr} \end{cases} \quad (2.28)$$

Από την άλλη πλευρά το χωρικό διάνυσμα της πεπλεγμένης ροής των φάσεων του στάτη, εξαιτίας των ρευμάτων στα κυκλώματα του στάτη και του ρότορα, μπορούν να οριστούν από την πρώτη εξίσωση του συστήματος (2.12) ως εξής:

$$\underline{\lambda}_{\dot{a}bcs} = (L_{ls} + L_m) \cdot \underline{i}_{\dot{a}bcs} + L_m \cdot \underline{i}'_{\dot{a}bcr} \cdot e^{j\theta_r} \quad (2.29)$$

Κατά ανάλογο τρόπο το χωρικό διάνυσμα της πεπλεγμένης ροής των φάσεων του ρότορα, εξαιτίας των ρευμάτων στα κυκλώματα του στάτη και του ρότορα, μπορούν να οριστούν από την δεύτερη εξίσωση του συστήματος (12) ως εξής:

$$\underline{\lambda}_{\phi cr} = (L_{ls} + L_m) \cdot \underline{i}_{abcr} + L_m \cdot \underline{i}_{abcs} \cdot e^{-j\theta_r} \quad (2.30)$$

Στην παραπάνω διαδικασία εύρεσης των εξισώσεων (2.29) και (2.30) έχουμε ορίσει την μαγνητική επαγωγή  $L_m = \frac{3}{2} L_{ms}$

Από την αντικατάσταση των εξισώσεων (2.29) και (2.30) στο σύστημα εξισώσεων (2.28) και την εφαρμογή κανόνων παραγώγισης οι εξισώσεις της μηχανής επαγωγής παίρνουν την μορφή :

$$\underline{v}_{abcs} = r_s \cdot \underline{i}_{abcs} + (L_{ls} + L_m) \cdot p \cdot \underline{i}_{abcs} + L_m \cdot (p \cdot \underline{i}'_{abcr}) \cdot e^{j\theta_r} + j \cdot \omega_r \cdot L_m \cdot \underline{i}'_{abcr} \cdot e^{j\theta_r} \quad (2.31)$$

$$\underline{v}'_{abcr} = r'_r \cdot \underline{i}'_{abcr} + (L'_{lr} + L_m) \cdot p \cdot \underline{i}'_{abcr} + L_m \cdot (p \cdot \underline{i}_{abcs}) \cdot e^{-j\theta_r} - j \cdot \omega_r \cdot L_m \cdot \underline{i}_{abcs} \cdot e^{-j\theta_r} \quad (2.32)$$

$$\text{Όπου } \omega_r = p \cdot \theta_r = \frac{d\theta_r}{dt}$$

Αν οι σχέσεις (31) και (32) πολλαπλασιαστούν με τις ποσότητες  $\frac{2}{3} \cdot e^{-j\theta}$  και  $\frac{2}{3} \cdot e^{-j(\theta-\theta_r)}$  αντίστοιχα και κάνοντας χρήση των εξισώσεων (2.20) και (2.24), οι εξισώσεις των κυκλωμάτων του στάτη και του ρότορα της μηχανής επαγωγής, σε ένα πλαίσιο αναφοράς d-q το οποίο περιστρέφεται με ταχύτητα  $\omega$  και με την υπόθεση ότι οι συνιστώσες μηδενικής ακολουθίας είναι μηδέν, είναι οι εξής:

$$\underline{v}_{qds} = r_s \cdot \underline{i}_{qds} + (L_{ls} + L_m) \cdot p \cdot \underline{i}_{qds} + L_m \cdot p \cdot \underline{i}'_{qdr} + j \cdot \omega \cdot [(L_{ls} + L_m) \cdot \underline{i}_{qds} + L_m \cdot p \cdot \underline{i}'_{qdr}] \quad (33)$$

$$\underline{v}'_{qdr} = r'_r \cdot \underline{i}'_{qdr} + (L'_{lr} + L_m) \cdot p \cdot \underline{i}'_{qdr} + L_m \cdot p \cdot \underline{i}_{qds} + j \cdot (\omega - \omega_r) \cdot [(L'_{lr} + L_m) \cdot \underline{i}'_{qdr} + L_m \cdot \underline{i}_{qds}] \quad (34)$$

$$\text{Όπου } \omega = p \cdot \theta = \frac{d\theta}{dt}$$

$$\underline{\lambda}_{qds} = (L_{ls} + L_m) \cdot \underline{i}_{qds} + L_m \cdot \underline{i}'_{qdr} \quad (2.35)$$

$$\underline{\lambda}'_{qdr} = (L'_{lr} + L_m) \cdot \underline{i}'_{qdr} + L_m \cdot \underline{i}_{qds} \quad (2.36)$$

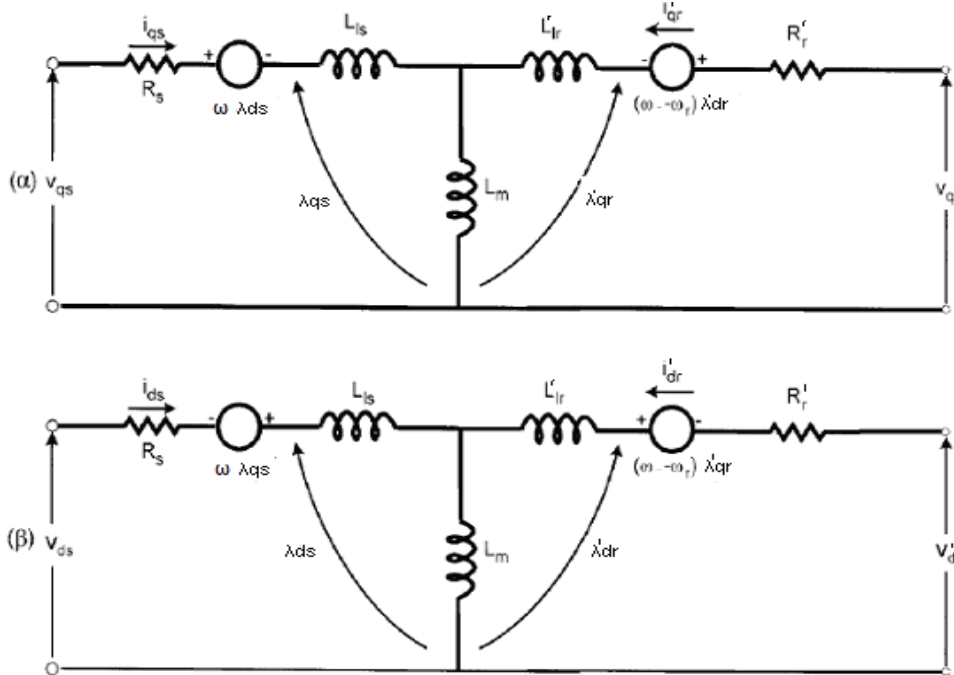
Αντικαθιστώντας με όπου  $p$  το  $\frac{d}{dt}$  και αναλύοντας στους d και q άξονες οι τελικές δυναμικές εξισώσεις περιγραφής μιας μηχανής επαγωγής σε ένα περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς είναι οι εξής :

$v_{ds} = r_s \cdot i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega \cdot \lambda_{qs} \quad (2.37)$	$\lambda_{ds} = L_{ls} \cdot i_{ds} + L_m \cdot (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (2.41)$
$v_{qs} = r_s \cdot i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega \cdot \lambda_{ds} \quad (2.38)$	$\lambda_{qs} = L_{ls} \cdot i_{qs} + L_m \cdot (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (2.42)$
$v'_{dr} = r'_r \cdot i'_{dr} + \frac{d\lambda'_{dr}}{dt} - (\omega - \omega_r) \cdot \lambda'_{qr} \quad (39)$	$\lambda'_{dr} = L'_{lr} \cdot i'_{dr} + L_m \cdot (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (2.43)$
$v'_{qr} = r'_r \cdot i'_{qr} + \frac{d\lambda'_{qr}}{dt} - (\omega - \omega_r) \cdot \lambda'_{dr} \quad (2.40)$	$\lambda'_{qr} = L'_{lr} \cdot i'_{qr} + L_m \cdot (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (2.44)$

Και σε μορφή πίνακα είναι :

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v'_{qr} \\ v'_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & \omega L_s & L_m p & \omega L_m \\ -\omega L_s & R_s + L_s p & -\omega L_m & L_m p \\ L_m p & (\omega - \omega_r) L_m & R'_r + L'_r p & (\omega - \omega_r) L'_r \\ -(\omega - \omega_r) L_m & L_m p & -(\omega - \omega_r) L'_r & R'_r + L'_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \end{bmatrix}$$

Στο σχήμα 2.5 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα του δυναμικού μοντέλου της μηχανής επαγωγής σε ένα πλαίσιο αναφοράς d-q περιστρεφόμενο με αυθαίρετη ταχύτητα  $\omega$ .



Σχήμα 2.5 Ισοδύναμο κύκλωμα για το δυναμικό μοντέλο της μηχανής σε περιστρεφόμενο πλαίσιο με αυθαίρετη ταχύτητα. Στο σχήμα φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα: (α) εγκάρσιου άξονα q και (β) ευθέως άξονα d.

**2.3.3.1 Δυναμικό μοντέλο σε στατό πλαίσιο αναφοράς (εξισώσεις Stanley)**

Για να περιγραφεί το δυναμικό αυτό μοντέλο της μηχανής επαγωγής θα πρέπει να ανάγουμε τις μεταβλητές του δρομέα και του στάτη σε ένα στατό πλαίσιο αναφοράς, που στρέφεται δηλαδή με μηδενική ταχύτητα  $\omega = 0$  [3],[7],[21].

Εξισώσεις για τις τάσεις του στάτη

Οι εξισώσεις για τις τάσεις του στάτη σε στατό πλαίσιο αναφοράς δίνονται από τη σχέση:

$$v_{qs}^s = R_s i_{qs}^s + \frac{d \lambda_{qs}^s}{dt}$$

$$v_{ds}^s = R_s i_{ds}^s + \frac{d \lambda_{ds}^s}{dt}$$

Εξισώσεις για τις τάσεις του δρομέα

Εάν ανάγουμε τις μεταβλητές του δρομέα σε στατό πλαίσιο (μηδενική ταχύτητα περιστροφής), οι εξισώσεις που προκύπτουν είναι οι εξής:

$$v_{qr}^s = R_r i_{qr}^s + \frac{d\lambda_{qr}^s}{dt} - \omega_r \lambda_{dr}^s$$

$$v_{dr}^s = R_r i_{dr}^s + \frac{d\lambda_{dr}^s}{dt} + \omega_r \lambda_{qr}^s$$

Στην περίπτωση που έχουμε κινητήρα επαγωγής βραχυκυκλωμένου δρομέα (λ.χ. τύπου κλωβού) οι τάσεις  $v_{qr}^s=0$  και  $v_{dr}^s=0$

Τελικά προκύπτει το δυναμικό μοντέλο της μηχανής σε μορφή πίνακα:

$$\begin{bmatrix} v_{qs}^s \\ v_{ds}^s \\ v_{qr}^s \\ v_{dr}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & 0 & L_m p & 0 \\ 0 & R_s + L_s p & -\omega_e L_m & L_m p \\ L_m p & -\omega_r L_m & R_r + L_r p & -\omega_r L_r \\ \omega_r L_m & L_m p & \omega_r L_r & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \\ i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix}$$

2.3.3.2 Δυναμικό μοντέλο σε σύγχρονα περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς (εξισώσεις Kron)**Σημείωση**

- Στη συνέχεια, για την παρουσίαση του δυναμικού μοντέλου της μηχανής, θεωρούμε ότι οι ποσότητες του δρομέα είναι ανοιγμένες στο στάτη και στις παραπάνω εξισώσεις παραλείπεται ο τόνος (') στις μεταβλητές του δρομέα.

Για να περιγραφεί το δυναμικό αυτό μοντέλο της μηχανής επαγωγής θα πρέπει να ανάγουμε τις μεταβλητές του δρομέα και του στάτη σε ένα πλαίσιο αναφοράς που στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα [3],[7],[21].

εξισώσεις για τις τάσεις του στάτη

Οι εξισώσεις για τις τάσεις του στάτη σε στατό πλαίσιο αναφοράς δίνονται από τη σχέση:

$$v_{qs}^s = R_s i_{qs}^s + \frac{d\lambda_{qs}^s}{dt}$$

$$v_{ds}^s = R_s i_{ds}^s + \frac{d\lambda_{ds}^s}{dt}$$

Όπου  $\lambda_{qs}^s$  και  $\lambda_{ds}^s$  οι πεπλεγμένες μαγνητικές ροές του στάτη τους άξονες q και d αντίστοιχα..

Με βάση τους μετασχηματισμούς που έχουν προαναφερθεί, οι μεταβλητές που αναφέρονται στο στατό πλαίσιο αναφοράς μετασχηματίζονται σε ισοδύναμες μεταβλητές που αναφέρονται σε ένα περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς με τη σύγχρονη ταχύτητα

Οι εξισώσεις των τάσεων του στάτη σε σύγχρονα περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς δίνονται:

$$v_{qs}^e = R_s i_{qs}^e + \frac{d\lambda_{qs}^e}{dt} + \omega_e \lambda_{ds}^e$$

$$v_{ds}^e = R_s i_{ds}^e + \frac{d\lambda_{ds}^e}{dt} - \omega_e \lambda_{qs}^e$$

#### εξισώσεις για τις τάσεις του δρομέα

Έστω ότι ο δρομέας της μηχανής κινείται με ταχύτητα  $\omega_r$ , οι εξισώσεις των τάσεων του δρομέα της μηχανής τυλιγμένου δρομέα που τροφοδοτείται και αυτός με τάση (μηχανή διπλής τροφοδοσίας – doubly-fed wound-rotor machine) στο σύστημα αναφοράς που περιστρέφεται μαζί με τον δρομέα (με την ταχύτητα του δρομέα) θα έχουν ως εξής:

$$v_{qr}^r = R_r i_{qr}^r + \frac{d\lambda_{qr}^r}{dt}$$

$$v_{dr}^r = R_r i_{dr}^r + \frac{d\lambda_{dr}^r}{dt}$$

στις οποίες όλες οι μεταβλητές είναι ανοιγμένες στον δρομέα.

Με βάση και πάλι τους μετασχηματισμούς που έχουν προαναφερθεί, οι μεταβλητές που αναφέρονται στο πλαίσιο αναφοράς που περιστρέφεται με την ταχύτητα του δρομέα μετασχηματίζονται σε ισοδύναμες μεταβλητές που αναφέρονται σε ένα περιστρεφόμενο με τη σύγχρονη ταχύτητα πλαίσιο αναφοράς.

Οι εξισώσεις των τάσεων του δρομέα σε σύγχρονα περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς δίνονται:

$$v_{qr}^e = R_r i_{qr}^e + \frac{d\lambda_{qr}^e}{dt} + (\omega_e - \omega_r) \lambda_{dr}^e$$

$$v_{dr}^e = R_r i_{dr}^e + \frac{d\lambda_{dr}^e}{dt} - (\omega_e - \omega_r) \lambda_{qr}^e$$

Στην περίπτωση που έχουμε κινητήρα επαγωγής βραχυκυκλωμένου δρομέα οι τάσεις  $v_{qr}^e$  και  $v_{dr}^e$  είναι μηδέν, δηλαδή  $v_{qr}^e = 0$  και  $v_{dr}^e = 0$ .

Από τα παραπάνω, τελικά προκύπτει το δυναμικό μοντέλο της μηχανής σε σύγχρονα περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς σε μορφή πίνακα:

$$\begin{bmatrix} v_{qs}^e \\ v_{ds}^e \\ v_{qr}^e \\ v_{dr}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & \omega_e L_s & L_m p & \omega_e L_m \\ -\omega_e L_s & R_s + L_s p & -\omega_e L_m & L_m p \\ L_m p & (\omega_e - \omega_r) L_m & R_r + L_r p & (\omega_e - \omega_r) L_r \\ -(\omega_e - \omega_r) L_m & L_m p & -(\omega_e - \omega_r) L_r & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^e \\ i_{ds}^e \\ i_{qr}^e \\ i_{dr}^e \end{bmatrix}$$

Θυμίζεται ότι για μηχανή επαγωγής βραχυκυκλωμένου δρομέα οι τάσεις του δρομέα είναι μηδενικές, δηλαδή  $v_{qr} = 0$  και  $v_{dr} = 0$ .

Από την εξίσωση φαίνεται ότι:

1. Γνωρίζοντας τις τάσεις του στάτη και την σύγχρονη ταχύτητα μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε τα ρεύματα του δρομέα και του στάτη της μηχανής
2. Αντιστρόφως, γνωρίζοντας τα ρεύματα του στάτη και τη σύγχρονη ταχύτητα μπορούμε να υπολογίσουμε τις τάσεις του στάτη και τα ρεύματα του δρομέα.

η ταχύτητα του δρομέα  $\omega_r$  δεν είναι σταθερή όμως, αλλά είναι ένα ηλεκτρομηχανικό μηχανικό μέγεθος και προκύπτει από τη σχέση:

$$T_e = T_L + J \frac{d\omega_m}{dt} = T_L + \frac{2}{P} J \frac{d\omega_r}{dt}$$

Όπου

- $T_L$  η ροπή του φορτίου
- $J$  η ροπή αδρανείας του συστήματος δρομέα –φορτίου
- $\omega_m$  η μηχανική ταχύτητα περιστροφής του δρομέα που μετατρέπεται σε ηλεκτρική με τη βοήθεια της σχέσης

$$\text{deg}_{(\eta\lambda\epsilon\kappa\tau\omicron)} = \frac{P}{2} \text{deg}_{(\mu\eta\chi\alpha\nu)}$$

### 2.3.4 Ροή ισχύος στο d-q ισοδύναμο κύκλωμα

Η ισχύς μιας τριφασικής μηχανής ισούται με το γινόμενο των στιγμιαίων τιμών των τάσεων και των ρευμάτων των φάσεων της μηχανής [2.21]. Στην περίπτωση μας η μηχανή επαγωγής αποτελείται από τρεις φάσεις στο κύκλωμα του στάτη και τρεις φάσεις στο κύκλωμα του δρομέα.

Στην ανάλυση που ακολουθεί σημειώνουμε ότι το σύμβολο (\*) παριστάνει συζυγείς μιγαδικούς.

$$\begin{aligned} \underline{v}_{abc} \cdot \underline{i}_{abc}^* &= \frac{2}{3} \cdot (v_{as} + \underline{a} \cdot v_{bs} + \underline{a}^2 \cdot v_{cs}) \cdot \frac{2}{3} \cdot (i_{as} + \underline{a}^2 \cdot i_{bs} + \underline{a} \cdot i_{cs}) \\ &= \frac{4}{9} \cdot \left\{ (v_{as} \cdot i_{as} + v_{bs} \cdot i_{bs} + v_{cs} \cdot i_{cs}) + \underline{a} \cdot (v_{bs} \cdot i_{as} + v_{as} \cdot i_{cs} + v_{cs} \cdot i_{bs}) + \underline{a}^2 \cdot (v_{as} \cdot i_{bs} + v_{cs} \cdot i_{as} + v_{bs} \cdot i_{cs}) \right\} \end{aligned}$$

(2.43)



Παίρνοντας το πραγματικό μέρος της παραπάνω ισότητας και με την υπόθεση ότι τα τρία ρεύματα έχουν άθροισμα μηδέν έχουμε:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}\left\{v_{abc}s \cdot i_{abc}^*\right\} &= \frac{4}{9} \cdot \left\{v_{as} \cdot i_{as} + v_{bs} \cdot i_{bs} + v_{cs} \cdot i_{cs}\right\} - \frac{1}{2} \cdot \left[v_{as} \cdot (i_{bs} + i_{cs}) + v_{bs} \cdot (i_{as} + i_{cs}) + v_{cs} \cdot (i_{as} + i_{bs})\right] \\ &= \frac{2}{3} \cdot \left\{v_{as} \cdot i_{as} + v_{bs} \cdot i_{bs} + v_{cs} \cdot i_{cs}\right\} \end{aligned} \quad (2.44)$$

Επομένως η ηλεκτρική ισχύς στη μηχανή μπορεί να γραφτεί :

$$P_e = \frac{3}{2} \left\{ \operatorname{Re}\left[v_{abc}s \cdot i_{abc}^*\right] + \operatorname{Re}\left[v'_{abc}s \cdot i_{abc}^{*'}\right] \right\} \quad (2.45)$$

Μετασηματίζοντας την παραπάνω σχέση σε d-q μεταβλητές προκύπτει ότι:

$$P_e = \frac{3}{2} \cdot \left\{ v_{qds} \cdot i_{qds}^* + v'_{qdr} \cdot i_{qdr}^{*'} \right\} = \frac{3}{2} \cdot (v_{ds} \cdot i_{ds} + v_{qs} \cdot i_{qs} + v'_{dr} \cdot i'_{dr} + v'_{qr} \cdot i'_{qr}) \quad (2.46)$$

Σημειώνουμε ότι ηλεκτρική ισχύς στα κυκλώματα d-q είναι ανεξάρτητη της ταχύτητας περιστροφής του πλαισίου d-q όπως προκύπτει από την παραπάνω εξίσωση.

### 2.3.5 Ηλεκτρομαγνητική ροπή

Με την αντικατάσταση των εξισώσεων περιγραφής της μηχανής επαγωγής (2.33) και (2.34) στην εξίσωση της ηλεκτρικής ισχύος (2.46) προκύπτει η σχέση [2.21]:

$$P_e = P_{e1} + P_{e2} + P_{e3} \quad (2.47)$$

Όπου :

$$P_{e1} = \frac{3}{2} \cdot r_s \cdot |i_{qds}|^2 + \frac{3}{2} \cdot r'_r \cdot |i'_{qdr}|^2 \quad (2.48)$$

$$P_{e2} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \left[ \frac{L_{ls}}{2} \cdot |i_{qds}|^2 + \frac{L'_{lr}}{2} \cdot |i'_{qdr}|^2 + L_m \cdot |i_{qds} + i'_{qdr}|^2 \right] \quad (2.49)$$

$$P_{e3} = \frac{3}{2} \cdot \operatorname{Re} \left\{ j \cdot \omega \left[ (L_{ls} + L_m) |i_{qds}|^2 + L_m \cdot i'_{qdr} \cdot i_{qds}^* \right] + j \cdot (\omega - \omega_r) \left[ (L'_{lr} + L_m) |i'_{qdr}|^2 + L_m \cdot i_{qds} \cdot i_{qdr}^{*'} \right] \right\}. \quad (2.50)$$

Ο πρώτος όρος  $P_{e1}$  αποτελεί την ισχύ η οποία δαπανάται στις ωμικές αντιστάσεις των κυκλωμάτων του στάτη και του ρότορα.

Ο δεύτερος όρος  $P_{e2}$  αντιστοιχεί στον ρυθμό μεταβολής της αποθηκευμένης μαγνητικής ενέργειας στις επαγωγές της μηχανής.

Τέλος, ο τρίτος όρος  $P_{e3}$  αποτελεί εκείνο το μέρος της ισχύος το οποίο μετατρέπεται από ηλεκτρική σε μηχανική ισχύ και το συμβολίζουμε με  $P_{em}$ .

Παρατηρώντας ότι ο πρώτος και ο τρίτος όρος της εκφράσεως για την ισχύ  $P_{em}$  έχουν μόνο μιγαδικές συνιστώσες και επομένως η μετατροπή ενέργειας ορίζεται από τον δεύτερο και τον τέταρτο όρο. Επομένως μπορούμε να γράψουμε ότι:

$$P_{em} = \frac{3}{2} \cdot \text{Re} \left\{ j \cdot \omega_r \cdot L_m \cdot (\underline{i}'_{qdr} \cdot \underline{i}^*_{qds} + \underline{i}_{qds} \cdot \underline{i}^*_{qdr}) - j \cdot \omega_r \cdot L_m \cdot \underline{i}_{qds} \cdot \underline{i}^*_{qdr} \right\} = \frac{3}{2} \cdot \text{Im} \left\{ j \cdot \omega_r \cdot L_m \cdot \underline{i}_{qds} \cdot \underline{i}^*_{qdr} \right\} \quad (2.51)$$

Η εναλλακτικά

$$P_{em} = \frac{3}{2} \cdot \omega_r \cdot L_m \cdot (i_{qs} \cdot i'_{dr} - i_{ds} \cdot i'_{qr}) \quad (2.52)$$

Συσχετίζοντας την ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα μιας διπολικής μηχανής  $\omega_r$  με την πραγματική μηχανική ταχύτητα περιστροφής μέσω του αριθμού των πόλων της μηχανής  $p$  σύμφωνα με την σχέση  $\omega_r = \frac{p}{2} \cdot \omega_m$  προκύπτει ότι η ηλεκτρομαγνητική ροπή στον άξονα της μηχανής δίνεται από την σχέση:

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{2} \cdot L_m \cdot \text{Im} \left\{ \underline{i}_{qds} \cdot \underline{i}^*_{qdr} \right\} = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{2} \cdot L_m \cdot (i_{qs} \cdot i'_{dr} - i_{ds} \cdot i'_{qr}) \quad (2.53)$$

Στο σημείο αυτό σημειώνουμε ότι η παραπάνω εξίσωση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής μπορεί να πάρει πολλές ισοδύναμες μορφές με τη χρήση των εξισώσεων περιγραφής των πεπλεγμένων ροών (2.39)-(2.42) της μηχανής επαγωγής.

Λύνοντας την εξίσωση (2.35) ως προς  $L_m \cdot \underline{i}'_{qdr}$  και αντικαθιστώντας στην (2.53) προκύπτει ότι:

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{2} \cdot \text{Im} \left\{ \underline{i}_{qds} \cdot \underline{\lambda}^*_{qds} \right\} = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{2} \cdot (\lambda_{ds} \cdot i_{qs} - \lambda_{qs} \cdot i_{ds})$$

Λύνοντας την εξίσωση (2.36) ως προς  $L_m \cdot \underline{i}_{qds}$  και αντικαθιστώντας στην (2.53) προκύπτει ότι:

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{2} \cdot \text{Im} \left\{ \underline{\lambda}'_{qdr} \cdot \underline{i}^*_{qdr} \right\} = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{2} \cdot (i_{dr} \cdot \lambda_{qr} - i_{qr} \cdot \lambda_{dr})$$

Αν ορίσουμε την μαγνητική ροή σκεδάσεως σύμφωνα με τη σχέση:  $\underline{\lambda}_{qdm} = L_m (\underline{i}_{qds} + \underline{i}'_{qdr})$  και κατόπιν λύσουμε ως προς  $L_m \cdot \underline{i}'_{qdr}$  και αντικαταστήσουμε στην (2.53) προκύπτει ότι:

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{2} \cdot \text{Im} \left\{ \underline{i}_{qds} \cdot \underline{\lambda}^*_{qdm} \right\} = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{2} \cdot (\lambda_{dm} \cdot i_{qs} - \lambda_{qm} \cdot i_{ds})$$

Τέλος λύνοντας την εξίσωση (2.36) ως προς  $\underline{i}'_{qdr} = \frac{1}{L'_r + L_m} \cdot \underline{\lambda}'_{qdr} - \frac{L_m}{L'_r + L_m} \underline{i}_{qds}$  και αντικαθιστώντας στην (2.53) προκύπτει ότι:

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{2} \cdot \frac{L_m}{L'_r + L_m} \cdot \text{Im} \left\{ \underline{i}_{qds} \cdot \underline{\lambda}^*_{qdr} \right\} = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{2} \cdot \frac{L_m}{L'_r + L_m} \cdot (\lambda_{dr} \cdot i_{qs} - \lambda_{qr} \cdot i_{ds})$$

## **2.4 Αρχές διανυσματικού ελέγχου**

### **2.4.1 Κατηγορίες ελέγχου μηχανών επαγωγής**

#### **A. Βαθμωτός έλεγχος**

Για να δημιουργήσουμε την υψηλότερη δυνατή ροπή, θα πρέπει να διατηρηθεί η ροή σταθερή και κοντά στην ονομαστική της τιμή, καθώς μεταβάλλονται οι λειτουργικές καταστάσεις του κινητήρα. Προκειμένου να λειτουργεί στο μέγιστο επίπεδο ροής, θα πρέπει να ρυθμιστούν οι δυο ελεγχόμενες παράμετροι, η τάση τροφοδοσίας του στάτη  $V_s$  και η συχνότητα  $\omega_s$  για κάθε κατάσταση λειτουργίας. Η σχέση ανάμεσα στην τάση τροφοδοσίας και στη συχνότητα είναι γραμμική εκτός από τις μικρές ταχύτητες. Μια ανύψωση τάσης παρέχεται σε χαμηλές ταχύτητες για να αντισταθμίσει την αντίσταση του στάτη. Αφού η συχνότητα εξαρτάται άμεσα από την ταχύτητα η μόνη μεταβλητή που είναι διαθέσιμη για έλεγχο είναι η  $V_s$  [6].

#### **B. Διανυσματικός έλεγχος**

Όπως είναι γνωστό, το πολύπλοκο μαθηματικό μοντέλο της ασύγχρονης μηχανής δεν ευνοεί την ανάπτυξη συμβατικών τεχνικών ελέγχου για τον έλεγχο της λόγω της μη γραμμικότητάς του και των επαγωγισμοτήτων της μηχανής, που μεταβάλλονται καθώς αυτή στρέφεται. Η θεωρία του διανυσματικού ελέγχου βασίζεται στην αξιοποίηση του μετασχηματισμού του Park με τον οποίο επιτυγχάνεται η απλοποίηση του μοντέλου της μηχανής σε ένα σύστημα εξισώσεων με σταθερούς συντελεστές. Στόχος του διανυσματικού ελέγχου είναι η διατήρηση γωνίας  $90^\circ$  μεταξύ των πεδίων του στάτη και του δρομέα του επαγωγικού κινητήρα, έτσι ώστε να διατηρείται σταθερή κατά μέτρο η ροή διακένου και η ροπή του κινητήρα να ελέγχεται με έλεγχο ταχύτητας με σταθερό λόγο  $V/F$  ανεξάρτητο τρόπο. Αν ο άξονας του σύγχρονα στρεφόμενου πλαισίου αναφοράς τοποθετηθεί ώστε να βρίσκεται σε κάθε χρονική στιγμή στην κατεύθυνση της στρεφόμενης με σύγχρονη ταχύτητα ροής του μαγνητικού πεδίου (στάτη, δρομέα ή διακένου), τότε η συνιστώσα  $q$  της ροής αυτής μηδενίζεται. Με άλλα λόγια, ο άξονας  $d$  του πλαισίου αναφοράς ορίζεται από τη θέση της μαγνητικής ροής στάτη, δρομέα ή διακένου, ανάλογα με την επιλογή της συγκεκριμένης εφαρμογής. Έτσι απαλείφεται η μια από τις μεταβλητές κατάστασης (η συνιστώσα  $q$  της μαγνητικής ροής) με αποτέλεσμα να απλοποιηθούν σημαντικά οι εξισώσεις που περιγράφουν τη λειτουργία του κινητήρα.

Με χρήση του μετασχηματισμού Park επιτυγχάνεται η ανάλυση του πραγματικού τριφασικού συστήματος σε δύο άξονες  $-d$  και  $-q$  κάθετους μεταξύ τους. Επιπλέον προκύπτει και ο τρίτος άξονας  $-0$  ο οποίος για συμμετρική λειτουργία έχει μηδενικές τιμές και παραλείπεται συνήθως στο διανυσματικό έλεγχο. Η γωνία  $\theta$  που φαίνεται στην παραπάνω εξίσωση είναι η γωνία που σχηματίζει ο άξονας  $-d$ , του νέου συστήματος αναφοράς, με τον άξονα  $-a$  του τριφασικού συστήματος. Για το διανυσματικό έλεγχο η  $\theta$  επιλέγεται πάντα έτσι ώστε το νέο σύστημα αναφοράς να περιστρέφεται με τη σύγχρονη

ταχύτητα. Το πλεονέκτημα που προκύπτει από την επιλογή αυτή είναι ότι τα εναλλασσόμενα μεγέθη του πραγματικού συστήματος μετασχηματίζονται σε συνεχείς ποσότητες στο προκύπτον σύστημα d-q κι έτσι είναι εύκολο πλέον να εφαρμοστούν για αυτές οι γνωστές τεχνικές του ελέγχου.

Στη βιβλιογραφία του διανυσματικού ελέγχου διακρίνουμε τρεις βασικούς τύπους ελέγχου, ανάλογα με τον προσανατολισμό του συστήματος αναφοράς [6],[23],[21]:

- α) Διανυσματικός έλεγχος με προσανατολισμό στο πεδίο του στάτη*
- β) Διανυσματικός έλεγχος με προσανατολισμό στο πεδίο του δρομέα*
- γ) Διανυσματικός έλεγχος με προσανατολισμό στο πεδίο του διακένου*

Ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζεται η μαγνητική ροή και γίνεται ο προσανατολισμός του συστήματος αναφοράς έχει μεγάλη σημασία στο διανυσματικό έλεγχο, διότι από την ακρίβεια με την οποία θα γίνει ο προσανατολισμός εξαρτάται και η ποιότητα του ελέγχου. Με βάση τον τρόπο με τον οποίο γίνεται ο προσανατολισμός του συστήματος αναφοράς διακρίνουμε δύο κατηγορίες διανυσματικού ελέγχου :

- 1) **άμεσος διανυσματικός έλεγχος**, όταν χρησιμοποιούνται αισθητήρες ή οι τερματικές ποσότητες της μηχανής σε συνδυασμό με το μαθηματικό μοντέλο της για να υπολογιστεί το διάνυσμα του πεδίου, με βάση το οποίο γίνεται ο προσανατολισμός του συστήματος αναφοράς.
- 2) **έμμεσος διανυσματικός έλεγχος**, όταν χρησιμοποιείται η συχνότητα ολίσθησης για να γίνει ο προσανατολισμός με το πεδίο.

Όπως φαίνεται καθαρά από τα παραπάνω, είναι δυνατό να διακρίνουμε έξι διαφορετικούς τύπους διανυσματικού ελέγχου. Κάποιοι από αυτούς χρησιμοποιούνται πιο συχνά στην πράξη εξαιτίας κυρίως του γεγονότος ότι παρουσιάζουν λιγότερες δυσκολίες στην υλοποίησή τους. Αυτοί είναι ο άμεσος έλεγχος με προσανατολισμό στο πεδίο του στάτη και ο έμμεσος έλεγχος με προσανατολισμό στο πεδίο του δρομέα.

Ο συνδυασμός της επιστήμης των ηλεκτρονικών ισχύος και του αυτομάτου ελέγχου, καθώς και η ραγδαία εξέλιξη της ψηφιακής τεχνολογίας, οδήγησε τα τελευταία χρόνια σε μια διαρκή βελτίωση της αξιοπιστίας των υπαρχουσών τεχνικών διανυσματικού ελέγχου. Με τη χρήση των τεχνικών αυτών αυξάνεται δραματικά η αξιοπιστία των ηλεκτροκινητήριων συστημάτων που χρησιμοποιούν ασύγχρονες μηχανές, με αποτέλεσμα να τείνουμε στην επικράτησή τους έναντι των κινητηρίων συστημάτων συνεχούς ρεύματος σε ένα ευρύτατο φάσμα εφαρμογών.

### **2.4.2 Θεωρία ελέγχου προσανατολισμένου πεδίου**

Γενικά ένας ηλεκτρικός κινητήρας μπορεί να θεωρηθεί ως ελεγχόμενη πηγή ροπής. Ακριβής έλεγχος της στιγμιαίας ροπής που παράγεται από ένα κινητήρα απαιτείται σε συστήματα για έλεγχο θέσης. Η ροπή που αναπτύσσεται στον κινητήρα είναι αποτέλεσμα αλληλεπίδρασης ανάμεσα στα ρεύματα στο τύλιγμα του δρομέα και στο μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τη μηχανή. Το πεδίο θα πρέπει να διατηρείται σε ένα βέβαιο βέλτιστο επίπεδο επαρκώς υψηλό για να αποφέρει μια υψηλή ροπή ανά μονάδα ampere, αλλά όχι τόσο μεγάλη ώστε να έχει ως αποτέλεσμα υπερβολικό κορεσμό του μαγνητικού κυκλώματος του κινητήρα. Με σταθερό πεδίο η ροπή είναι ανάλογη των ρευμάτων του δρομέα.

Ανεξάρτητος έλεγχος του πεδίου και των ρευμάτων δρομέα είναι εφικτός σε DC κινητήρα ξένης διέγερσης, όπου το ρεύμα στο πεδίο τυλίγματος στάτη προσδιορίζει το μαγνητικό πεδίο του κινητήρα όσο το ρεύμα στο τύλιγμα του ρότορα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως απευθείας μέσο ελέγχου της ροπής.

Με ένα παρόμοιο τρόπο με αυτόν στις μηχανές DC στους επαγωγικούς κινητήρες το τύλιγμα εξοπλισμού είναι επίσης στο δρομέα, ενώ το πεδίο παράγεται από ρεύματα στο τύλιγμα στάτη. Ωστόσο, το ρεύμα του δρομέα δεν είναι απευθείας προερχόμενο από εξωτερική πηγή αλλά από την ηλεκτρεγερτική δύναμη δημιουργημένη στα τυλίγματα των αγωγών του δρομέα λόγω σχετικής κίνησης σε σχέση με το πεδίο του στάτη. Με άλλα λόγια, το ρεύμα στάτη είναι η πηγή και του μαγνητικού πεδίου και του ρεύματος δρομέα. Στους πιο κοινά χρησιμοποιούμενους κινητήρες squirrel-cage (κλωβού) μόνο το ρεύμα στάτη μπορεί να ελεγχθεί απευθείας εφόσον του δρομέα δεν είναι προσβάσιμο. Βέλτιστες συνθήκες παραγωγής ροπής δεν υπάρχουν εξαιτίας της απουσίας ενός φυσικού διαχωρισμού των πεδίων στάτη και δρομέα. Η θεωρία προσανατολισμού πεδίου (F.O.P.) βρίσκει συνθήκες για το διαχωρισμό ελέγχου πεδίου από τον έλεγχο ροπής. Ένας επαγωγικός κινητήρας ελεγχόμενος με τη μέθοδο προσανατολισμού πεδίου μοιάζει με τον DC ξένης διέγερσης σε δύο βασικά χαρακτηριστικά :

- 1) Και το μαγνητικό πεδίο και η ροπή που αναπτύσσεται στον κινητήρα μπορούν να ελεγχθούν ανεξάρτητα.
- 2) Βέλτιστες συνθήκες παραγωγής ροπής που έχουν ως αποτέλεσμα μέγιστη ροπή ανά μονάδα ampere εμφανίζονται στον κινητήρα μαζί στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και σε μεταβατικές συνθήκες.

### **2.4.3 Βέλτιστες συνθήκες παραγωγής ροπής**

Βέλτιστες συνθήκες για παραγωγή ηλεκτρομαγνητικής ροπής υπάρχουν όταν το διάνυσμα του ρεύματος είναι κάθετο με το διάνυσμα  $\lambda$  της ροής που παράγεται από εξωτερική πηγή. Η ορθογωνιότητα των διανυσμάτων ρεύματος και ροής δίνει στη δύναμη

**F** μέγιστη επιρροή που επιφέρει μέγιστη ροπή. Στον DC κινητήρα λόγω της κατασκευής του, η αναπτυσσόμενη ροπή **T** είναι ανάλογη του ρεύματος δρομέα και της ροής [6] .

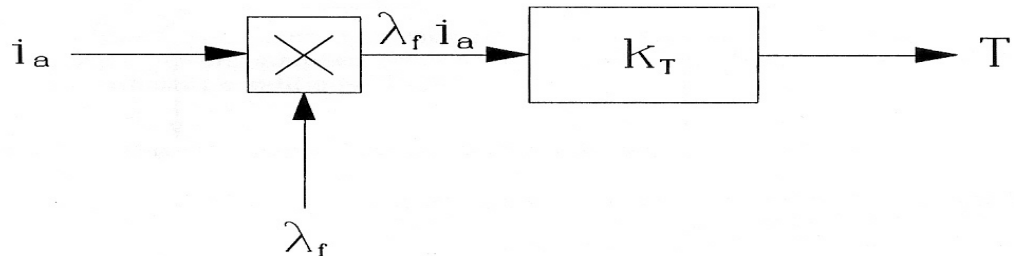
$$T = K I_a I_f$$

όπου k μια σταθερά της μηχανής,  $I_a$  το ρεύμα τυμπάνου και  $I_f$  το ρεύμα πεδίου διέγερσης, το οποίο δημιουργεί το μαγνητικό πεδίο στη μηχανή.

Στη μηχανή ξένης διέγερσης το ρεύμα του πεδίου διέγερσης δημιουργείται από ξεχωριστό ηλεκτρικό κύκλωμα και συνεπώς μπορεί να ελέγχεται ανεξάρτητα από το ρεύμα τυμπάνου. Η ανεξαρτησία μεταφράζεται διανυσματικά σε καθετότητα. Συνεπώς τα διανύσματα των ρευμάτων  $I_a$  και  $I_f$  καθώς και οι προκαλούμενες από αυτά μαγνητικές ροές  $\psi_a$  και  $\psi_f$  αντίστοιχα θα είναι στατικά και κάθετα μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει ότι η μεταβολή του ενός δεν επηρεάζει το άλλο (και επομένως ούτε την μαγνητική ροή του άλλου) και συνεπώς ο έλεγχός τους μπορεί να γίνει ανεξάρτητα, προσφέροντας ταχύτατη μεταβατική απόκριση και υψηλή τιμή ροπής ανά μονάδα ρεύματος.

Όσο σε ένα κινητήρα ξένης διέγερσης DC το ρεύμα του δρομέα  $i_a$  και η ροή πεδίου  $\lambda_f$  μπορούν να ελεγχθούν ανεξάρτητα, τότε ο κινητήρας μπορεί να υποτεθεί σαν ένας γραμμικός μετατροπέας ρεύματος-ροπής με προσαρμοζόμενο κέρδος. Η αναπαράσταση του μπλοκ διαγράμματος μιας τέτοιας μηχανής φαίνεται στο σχήμα 2.6

Αν και το διάγραμμα αυτό είναι ανάλογο με αυτό ενός επαγωγικού κινητήρα ελεγχόμενης ροπής, τα εμπλεκόμενα σήματα αναπαριστούν στιγμιαίες τιμές των μεταβλητών του κινητήρα, ενώ τα αντίστοιχα σήματα στο διάγραμμα του επαγωγικού κινητήρα, αναπαριστούν rms τιμές των μεταβλητών σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Ο σκοπός της θεωρίας προσανατολισμού πεδίου είναι να επεκτείνει μια τέτοια αναπαράσταση ενός επαγωγικού κινητήρα επίσης σε στιγμιαίες τιμές.



Σχήμα 2.6 Αναπαράσταση μπλοκ διαγράμματος ενός DC κινητήρα ξένης διέγερσης

#### 2.4.4 Δυναμικό μοντέλο

$$T = \frac{3}{4} P \frac{L_m}{L_r} (i_{qs} \lambda_{dr} - i_{ds} \lambda_{qr})$$

$$\lambda_{dr} = L_{lr} i_{dr} + L_m (i_{ds} + i_{dr}) = L_r i_{dr} + L_m i_{ds}$$

$$\lambda_{qr} = L_{lr} i_{qr} + L_m (i_{qs} + i_{qr}) = L_r i_{qr} + L_m i_{qs}$$

Οι εξισώσεις περιγράφουν το δυναμικό μοντέλο ενός κινητήρα επαγωγής. Η θεωρία προσανατολισμού πεδίου (F.O.P.) αναπαριστά μια ειδική περίπτωση μιας γνωστής μεθόδου μη γραμμικού διαχωρισμού που χρησιμοποιείται στον έλεγχο μη γραμμικών συστημάτων. Ο μη γραμμικός διαχωρισμός συνίσταται στο να ελεγχθούν επιλεγμένες μεταβλητές με τέτοιο τρόπο ώστε αυτές να είναι πάντα ίσες με μηδέν. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μερικά μέρη του μαθηματικού μοντέλου να αμελούνται και να μπορούν να μετακινηθούν από αυτό.

#### 2.4.5 Συνθήκες προσανατολισμένου πεδίου

Υποθέτοντας ότι η ροή του δρομέα συμπίπτει με τον περιστρεφόμενο d –άξονα ισχύει:

$$\lambda_{qr}^e = 0$$

Επομένως,

$$\lambda_r^e = \lambda_{qr}^e - j\lambda_{dr}^e = -j\lambda_{dr}^e$$

Εάν εφαρμοστούν αυτές οι συνθήκες στις εξισώσεις που περιγράφουν το δυναμικό μοντέλο της μηχανής σε σύγχρονα περιστρεφόμενο πλαίσιο παίρνουμε:

$$R_r i_{qr} + \omega_r \lambda_{dr} = 0$$

$$R_r i_{dr} + p \lambda_{dr} = 0$$

Και στη συνέχεια

$$i_{qr} = - \left( \frac{L_m}{L_r} \right) i_{qs}$$

$$i_{dr} = \frac{\lambda_{dr} - L_m i_{ds}}{L_r}$$

Ορίζοντας την σταθερά χρόνου του δρομέα  $\tau_r$  ως εξής :  $\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$

Προκύπτουν οι ακόλουθες εξισώσεις :

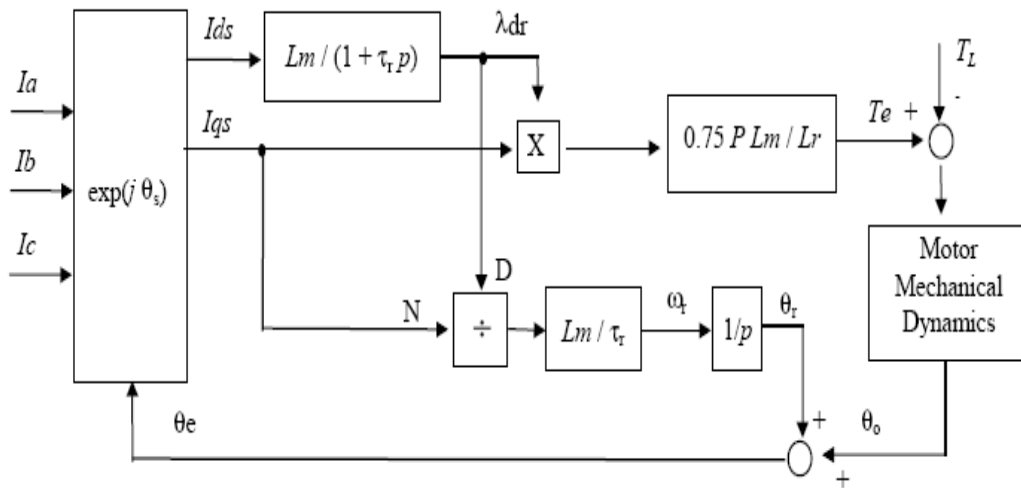
$$\omega_r = \frac{L_m}{\tau_r} \cdot \frac{i_{qs}}{\lambda_{dr}}$$

$$p\lambda_{dr} = \frac{1}{\tau_r} (-\lambda_{dr} + L_m i_{ds})$$

Η ροπή τελικά γίνεται :

$$T = \frac{3}{4} P \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr} i_{qs}$$

Με βάση τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει το μπλοκ διάγραμμα (σχήμα 2.7) ενός προσανατολισμένου πεδίου μηχανής επαγωγής :



Σχήμα 2.7 Μπλοκ διάγραμμα ενός προσανατολισμένου πεδίου μηχανής επαγωγής

Από το σχήμα 2.7 παρατηρούμε ότι η ροπή εξόδου είναι ευθέως ανάλογη με το  $i_{qs}$  χωρίς δυναμική καθώς υποβάλλεται σε μια πρώτης τάξεως δυναμική με σταθερά χρόνου  $\tau_r$  από το  $i_{ds}$ . Επιπρόσθετα, το  $\lambda_{dr}$  δεν επηρεάζεται με αλλαγή στο  $i_{qs}$  (αποσύζευξη). Επιπλέον παρατηρούμε ότι το  $i_{dr}$  υπάρχει μόνο όταν αλλάζει το  $\lambda_{dr}$  εξαιτίας αλλαγών στο  $i_{ds}$ .

**Ανεξάρτητος έλεγχος ροής και ροπής έχει πλέον κατορθωθεί**



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> ΑΙΟΛΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

### 3.1 Εισαγωγή

Σήμερα, στη γενική τους μορφή οι ανεμοκινητήρες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε άλλες πιο χρήσιμες μορφές ενέργειας.

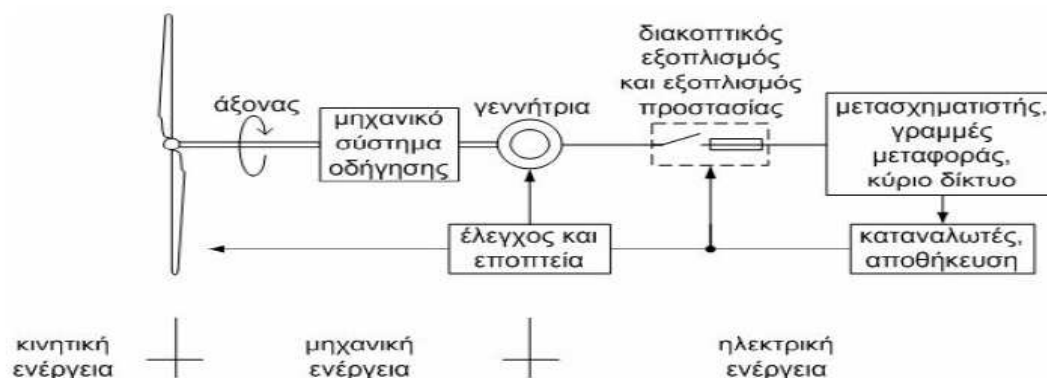
Ο άνεμος, όμως, είναι μια ανεξέλεγκτη και χρονικά μεταβαλλόμενη σε όλες της τις παραμέτρους πηγή ενέργειας. Η δέσμευση και χρησιμοποίηση της ενέργειας αυτής, είναι ως εκ τούτου μια πολύ δαπανηρή διαδικασία. Η σχεδίαση και η κατασκευή μιας αποδοτικής και παράλληλα οικονομικής ανεμομηχανής δεν είναι εύκολο. Παρόλα αυτά, οι σύγχρονες ανεμομηχανές (που η επιστημονική ονομασία τους είναι “συστήματα μετατροπής της αιολικής ενέργειας”, ή πιο απλά “ανεμοκινητήρες”, ή όταν παράγουν ηλεκτρική ενέργεια “ανεμογεννήτριες”, χρησιμοποιώντας τα πρόσφατα επιτεύγματα στην τεχνολογία των υλικών, στη μηχανολογία, στην ηλεκτρονική και στην αεροδυναμική, έχουν ανεβάσει σε υψηλά επίπεδα την απόδοσή τους, μειώνοντας συνεχώς το κόστος της παραγόμενης ενέργειας.

Η μελέτη ενός συστήματος ανεμογεννήτριας (Α/Γ), περιλαμβάνει την αεροδυναμική σχεδίαση και τη μελέτη εφαρμογής, στην οποία περιλαμβάνονται η μηχανολογική μελέτη και σχεδίαση, η μελέτη του ηλεκτρολογικού συστήματος και τα ηλεκτρολογικά συστήματα ελέγχου και ασφαλείας. Η αεροδυναμική σχεδίαση αποτελεί προϋπόθεση για τον σχεδιασμό ενός συστήματος δέσμευσης και μετατροπής της ενέργειας του ανέμου, ενώ η ηλεκτρομηχανολογική μελέτη είναι το αμέσως επόμενο και αναγκαίο στάδιο για την υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος, κατά τον αποδοτικότερο και πλέον συμφέροντα τεχνοοικονομικό τρόπο [8].

### 3.2 Μετατροπή ενέργειας από τον άνεμο

#### 3.2.1 Περιγραφή αιολικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Η γενική δομή ενός αιολικού σταθμού παραγωγής φαίνεται στο σχήμα 3.1 [8]:



Σχήμα 3.1 Σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο

Καθώς ο άνεμος περνάει από τον ανεμοκινητήρα, μέρος της κινητικής του ενέργειας δεσμεύεται από τα πτερύγια και μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια. Αυτή η ενέργεια διοχετεύεται, μέσω του μηχανικού συστήματος οδήγησης, στο ρότορα της γεννήτριας και μετατρέπεται τελικά σε ηλεκτρική. Η ηλεκτρική ενέργεια τροφοδοτείται στο κύριο ηλεκτρικό δίκτυο (κατευθείαν στους καταναλωτές ή σε κάποιο μέσο αποθήκευσης ενέργειας) μέσω διακοπτικού εξοπλισμού, εξοπλισμού προστασίας, μετασχηματιστών και γραμμών μεταφοράς. Ο σταθμός διαθέτει και ένα σύστημα εποπτείας και ελέγχου, ώστε να μπορεί να ανταπεξέλθει σε περιπτώσεις μεταβολών του ανέμου και αλλαγών στη δομή του κύριου δικτύου στο οποίο συνδέεται.

### 3.2.2. Βασικά δομικά στοιχεία γεννητριών

Σήμερα, οι πλέον ανεπτυγμένες ανεμογεννήτριες είναι οι οριζοντίου άξονα με δυο ή τρία πτερύγια.

*Μία ανεμογεννήτρια περιλαμβάνει συνήθως τα ακόλουθα μέρη [8]:*

**Δρομέας:** Τα πτερύγια του δρομέα σχεδιάζονται στην περιστροφή στον αέρα, που οδηγεί τη γεννήτρια στροβίλων. Μερικές φορές χρησιμοποιείται σύστημα γραναζιών για να αυξηθεί η συχνότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

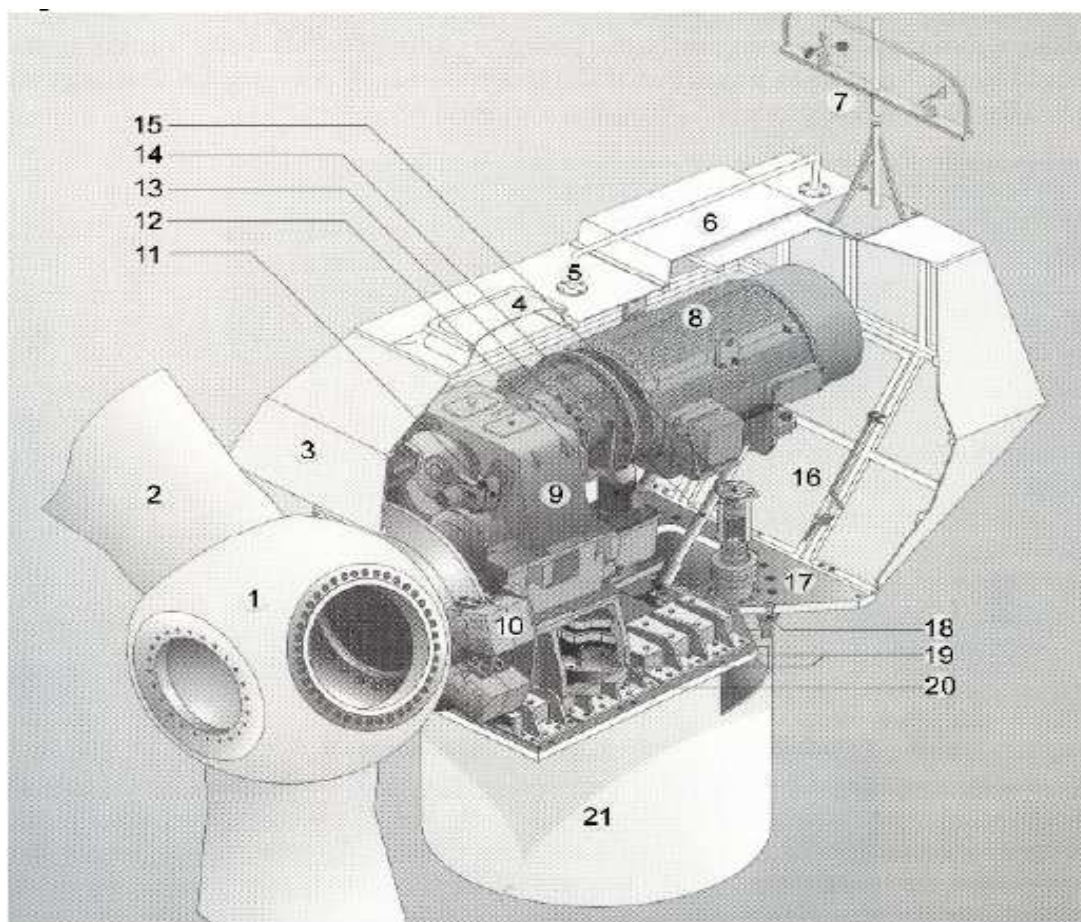
**Γεννήτρια:** Ο μηχανισμός αυτός παράγει την ηλεκτρική ενέργεια όταν υπάρχει ικανοποιητικός αέρας για να περιστρέψει τα πτερύγια. Η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται στο επόμενο στάδιο (είτε για αποθήκευση, είτε στο σύστημα διανομής, είτε για άμεση χρήση) χρησιμοποιώντας καλωδίωση.

**Κατευθυντήριο σύστημα:** Οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα απαιτούν έναν μηχανισμό που να τις τοποθετεί προς την κατεύθυνση του αέρα. Οι μικρές ανεμογεννήτριες έχουν συνήθως μια ουρά που τις περιστρέφει προς την σωστή κατεύθυνση. Οι μεγάλες μηχανές έχουν συνήθως έναν "σέρβο μηχανισμό" που τις προσανατολίζει στην κατεύθυνση της μέγιστης αιολικής δύναμης.

**Σύστημα προστασίας:** Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες είναι συνήθως εξοπλισμένες με μηχανισμούς για να αποτρέψουν κάποια ζημιά στους υπερβολικά υψηλούς ανέμους. Οι μεγάλες μηχανές μπορούν και έχουν σύνθετες ρυθμίσεις για να διακόψουν την παραγωγή με τις ταχύτητες υψηλού αέρα. Τα μικρότερα συστήματα αλλάζουν τον προσανατολισμό των λεπίδων έτσι ώστε να παρουσιάζουν μια μικρότερη επιφάνεια στον αέρα και με αυτόν τον τρόπο μειώνουν την ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων τους, ή χρησιμοποιούν μηχανικά φρένα.

**Πύργος:** Ο πύργος υψώνει την ανεμογεννήτρια αρκετά παραπάνω από τη δίνη του αέρα κοντά στο έδαφος και συλλαμβάνει τον αέρα ψιλότερα σε μεγαλύτερες ταχύτητες. Ο σχεδιασμός των πύργων είναι ιδιαίτερα κρίσιμος, καθώς πρέπει να είναι ψιλός, γερός, να επιτρέπει την πρόσβαση στην ανεμογεννήτρια για τη συντήρησή της, και όμως να μην επιβαρύνει το κόστος του συστήματος.

Στις ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα στην άτρακτο υπάρχει και το σύστημα προσανατολισμού τους, ανάλογα με τη διεύθυνση του ανέμου. Στο σχήμα 3.2 φαίνονται οι κύριες συνιστώσες μιας σύγχρονης άτρακτου



- |   |   |
|---|---|
| 1. Πλήμνη δρομέα                              | 12. Υδραυλικά                                   |
| 2. Πτερύγια δρομέα                            | 13. Ελαστικός σύνδεσμος                         |
| 3. Κάλυμμα ατράκτου                           | 14. Αναρτήσεις γεννήτριας                       |
| 4. Φωταγωγός                                  | 15. Σύστημα προσανατολισμού                     |
| 5. Ράβδος ασφαλείας                           | 16. Θυρίδα επισκόπησης                          |
| 6. Εξαγωγή αέρα                               | 17. Εξέδρα                                      |
| 7. Αλεξικέραυνο και μετρητής ταχύτητας ανέμου | 18. Στεφάνη ρουλεμάν συστήματος προσανατολισμού |
| 8. Γεννήτρια                                  | 19. Φρένο συστήματος προσανατολισμού            |
| 9. Κιβώτιο ταχυτήτων                          | 20. Αποξεύκτης θορύβου                          |
| 10. Δισκόφρενο δρομέα                         | 21. Πύργος                                      |
| 11. Εφεδρικό φρένο                            |   |

Σχήμα 3.2. Φωτογραφία του εσωτερικού της Α/Γ

### 3.2.3 Αεροδυναμικός έλεγχος ισχύος A/G

Για τον έλεγχο της παραγόμενης ισχύος, πέρα από τα ηλεκτρονικά ισχύος που χρησιμοποιούνται για την εξομάλυνση της παραγόμενης τάσης, ελέγχεται αεροδυναμικά η πτερωτή ώστε να «σπαταληθεί» η πλεονάζουσα ενέργεια αλλά και να προστατευθεί η ανεμογεννήτρια από μηχανικές καταπονήσεις.

Υπάρχουν τρεις κύριες κατηγορίες αεροδυναμικού ελέγχου [8],[25]:

- α) Έλεγχος κλίσης πτερυγίων (*Pitch Control*)
- β) Έλεγχος απώλειας στήριξης (*Stall Control*)
- γ) Έλεγχος διεύθυνσης (*Yaw Control*)

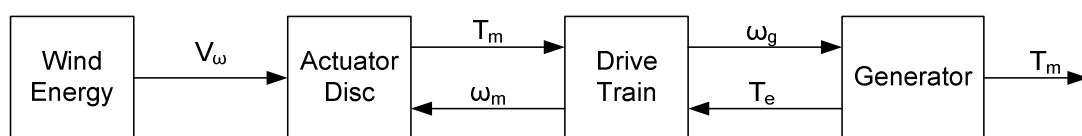
Στην εργασία μας εφαρμόζουμε αεροδυναμικό έλεγχο κλίσης πτερυγίων (*Pitch Control*) για τον έλεγχο της παραγόμενης ισχύος. Σε μια ανεμογεννήτρια με έλεγχο κλίσης πτερυγίων, η παραγόμενη ισχύς της γεννήτριας παρακολουθείται αρκετές φορές το δευτερόλεπτο. Όταν η ισχύς αρχίζει να γίνεται μεγάλη ο ελεγκτής στέλνει εντολή στο μηχανισμό κλίσης των πτερυγίων, ο οποίος αρχίζει και μειώνει τη γωνία προσβολής των πτερυγίων με τον άνεμο. Έτσι, η πτερωτή απορροφά ένα μικρότερο ποσοστό της ενέργειας του ανέμου. Μόλις η ταχύτητα του ανέμου επανέλθει στα κανονικά επίπεδα, ο ελεγκτής επαναφέρει τα πτερύγια στη σωστή τους κλίση.

Για να μπορεί να υπάρξει έλεγχος κλίσης, πρέπει τα πτερύγια να μπορούν να «γυρίζουν» γύρω από τον διαμήκη άξονα τους. Ο μηχανισμός που αλλάζει την κλίση, συνήθως είναι υδραυλικός. Αυτός ο έλεγχος ονομάζεται και έλεγχος “*pitch to feather*”. Με τον έλεγχο κλίσης, ο ελεγκτής τυπικά αλλάζει τη γωνία προσβολής ώστε να μεγιστοποιήσει την παραγόμενη ισχύ. Έτσι, αλλάζει συνεχώς την κλίση για να παρακολουθήσει την ταχύτητα του ανέμου.

### 3.2.3 Αεροδυναμική μετατροπή

Οι εξελιγμένες ανεμογεννήτριες (A/G) είναι ένα περίπλοκο σύστημα μηχανισμού αεροδυναμικά σχεδιασμένες και αποδοτικά εξαρτήματα παραγωγής ισχυος, μετάδοσης και ρύθμισης. Το μέγεθος των τουρμπίνων ποικίλλει από μερικά Watt έως αρκετά MW. Η καινούρια τάση στην βιομηχανία είναι να περάσει σε μεγαλύτερες μονάδες χωρητικότητας αρκετών MW καθώς με βελτιώσεις του συστήματος μπορεί να μειωθεί το κόστος των αιολικών μονάδων παραγωγής ενέργειας.

Η A/G είναι μια διάταξη για τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρισμό. Ο μετασχηματισμός σε μηχανική ροπή γίνεται από αεροδυναμικές δυνάμεις που δρουν στα πτερύγια/έλικα του δρομέα. Η A/G προκαλεί μετακίνηση της ενέργειας στη γεννήτρια η οποία είναι συνδεδεμένη με το ηλεκτρικό δίκτυο. Συνήθως υπάρχει ένα κιβώτιο ταχυτήτων ανάμεσα στον άξονα που περιστρέφεται πιο αργά και στον άξονα της τουρμπίνας που περιστρέφεται γρηγορότερα η διαδικασία περιγράφεται στο μοντέλο που φαίνεται στο σχήμα 3.3:



Σχήμα 3.3 Σχηματική αναπαράσταση μετατροπής αιολικής ενέργειας

Το ποσοστό της μηχανικής ισχύος του ανέμου που είναι διαθέσιμο προς εκμετάλλευση, εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου  $V_w$ , καθώς και από την ταχύτητα περιστροφής της έλικας  $\omega$ , την ακτίνα  $R$  και τη σχεδίαση της πτερωτής. Η παραγόμενη στον άξονα μηχανική ισχύς  $P_w$  για ορισμένη μέση ταχύτητα ανέμου  $V_w$  δίνεται από την εξίσωση

Η ενέργεια που αποσπάται από τον άνεμο (ισχύς εξόδου της τουρμπίνας) είναι [8],[28]:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho C_p A V_w^3 \quad (3.1)$$

Όπου

- $\rho$  είναι η πυκνότητα του αέρα ( $\text{kg/m}^3$ )
- $A = \pi R^2$  ( $\text{m}^2$ ) είναι το εμβαδόν του 'κυκλικού δίσκου' που διαγράφει η έλικα
- $V_w$  είναι η ταχύτητά του ανέμου ( $\text{m/s}$ )
- $C_p$  είναι ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος (μονόμετρο μέγεθος)

Η χαρακτηριστική παράμετρος για την αποδοτικότητα της  $A/\Gamma$  είναι ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος  $C_p$ , ο οποίος εκφράζει σε ποιο βαθμό μετατρέπεται η ενέργεια που περιέχεται στον άνεμο. Αυτός ο συντελεστής ισχύος είναι υψηλά εξαρτώμενος από την ταχύτητα του ανέμου  $V_w$ , την ταχύτητα περιστροφής της έλικας (δρομέα της  $A/\Gamma$ )  $\omega$ , τον τύπο της τουρμπίνας, το σχήμα και τη γωνία βήματος  $\beta$  των πτερυγίων. Ένα ανώτατο θεωρητικό όριο (γνωστό και ως όριο του Betz) για το  $C_p$ , είναι  $C_{p \max} = 0.593$ .

Ο συντελεστής ισχύος  $C_p$  εξαρτάται στο πόσο καλά η ταχύτητα περιστροφής του ακροπτερυγίου  $\lambda$  (tip speed ratio) προσαρμόζεται στην ταχύτητα του ανέμου.

Μια μέτρηση του  $\lambda$  είναι ο λόγος :

$$\lambda = \frac{V_{tip}}{V_w} = \frac{R \omega}{V_w} \quad (3.2)$$

Όπου

- $R$  είναι η ακτίνα του δρομέα της  $A/\Gamma$
- $\omega$  είναι η ταχύτητα περιστροφής της έλικας (δρομέα της  $A/\Gamma$ )

Με τον καθορισμό του  $\lambda$ , το  $C_p$  γίνεται συνάρτηση του  $\lambda$  και του  $\beta$ ,  $C_p(\lambda, \beta)$ .

Για τον καθορισμό του  $C_p$  για δοσμένες τιμές του  $\lambda$  και του  $\beta$ , χρησιμοποιούμε τον ακόλουθο γενικό προσεγγιστικό τύπο για διάφορους τύπους  $A/\Gamma$  :

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left( \frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{-\frac{C_5}{\lambda_i}} + C_6 \lambda \quad (3.3)$$

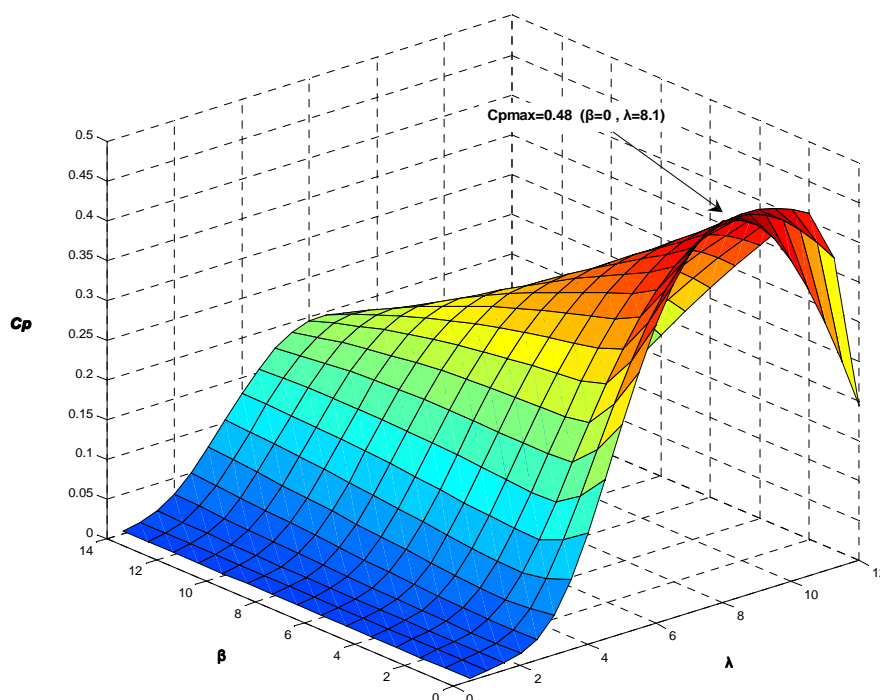
$$\text{όπου } \lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda - C_7 \beta} - \frac{C_8}{\beta^3 + 1}}$$

Οι διαφορές ανάμεσα στις καμπύλες διαφόρων τύπων  $A/\Gamma$  είναι πολύ μικρές και μπορούν να αμεληθούν σε δυναμικές προσομοιώσεις. Για αυτό το λόγο δεν είναι απαραίτητο να αναπτύξουμε διαφορετικές προσεγγίσεις για το  $C_p$ .

Οι συντελεστές  $C_1$  έως  $C_9$  έχουν καθοριστεί χρησιμοποιώντας μια αριθμητική βελτιστοποίηση ελαχιστοποιώντας το λάθος ανάμεσα στην καμπύλη ισχύος που προκύπτει από τις εξισώσεις και σε αυτές που δίνει ο κατασκευαστής και έχουν τις ακόλουθες τιμές :

- $C_1=0.5176$
- $C_2=116$
- $C_3=0.4$
- $C_4=5$
- $C_5=21$
- $C_6=0.0068$
- $C_7=0.08$
- $C_8=0.035$

Οι χαρακτηριστικές  $C_p(\lambda, \beta)$  για διάφορες τιμές της γωνίας βήματος  $\beta$  παρουσιάζονται παρακάτω:



Σχήμα 3.4\_Χαρακτηριστική  $C_p(\lambda, \beta)$  για διάφορες τιμές της γωνίας βήματος  $\beta$

### 3.3 Συστήματα ανεμογεννητριών (Α/Γ)

Σήμερα, η πρόοδος στην τεχνολογία των ηλεκτρονικών ισχύος, μας έχει προσφέρει τη δυνατότητα επιλογής ανάμεσα σε διαφορετικές τοπολογίες ελέγχου ισχύος των ανεμογεννητριών.

Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να λειτουργήσουν είτε με σταθερή είτε με μεταβλητή ταχύτητα. Επομένως, οι δύο κύριες κατηγορίες των τοπολογιών αυτών είναι: [8],[25].

- ανεμογεννήτριες **σταθερής ταχύτητας** (fixed speed wind turbines)
- ανεμογεννήτριες **μεταβλητής ταχύτητας** (variable speed wind turbines).

Τα τελευταία χρόνια επικρατεί η τοπολογία της λειτουργίας των ανεμογεννητριών με μεταβλητές στροφές λόγω των μειονεκτημάτων των ανεμογεννητριών σταθερής ταχύτητας ( έλλειψη ελέγχου της άεργου ισχύος, μηχανικές καταπονήσεις, προβλήματα ποιότητας ισχύος)

Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να περιέχουν διάφορους τύπους γεννητριών,

- σύγχρονες
- ασύγχρονες (επαγωγικές)

Δύο τύποι σύγχρονων μηχανών χρησιμοποιούνται σήμερα στις ανεμογεννήτριες:

- σύγχρονες γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα
- σύγχρονες γεννήτριες μονίμων μαγνητών.

Οι ασύγχρονες γεννήτριες μπορεί να είναι:

- βραχυκυκλωμένου κλωβού (squirrel cage)
- δακτυλιοφόρου δρομέα (wound rotor)

Οι κύριοι τύποι γεννητριών δακτυλιοφόρου δρομέα που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι

- οι γεννήτριες με **ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα** (σύστημα optislip)
- οι γεννήτριες **διπλής τροφοδότησης** (double fed).

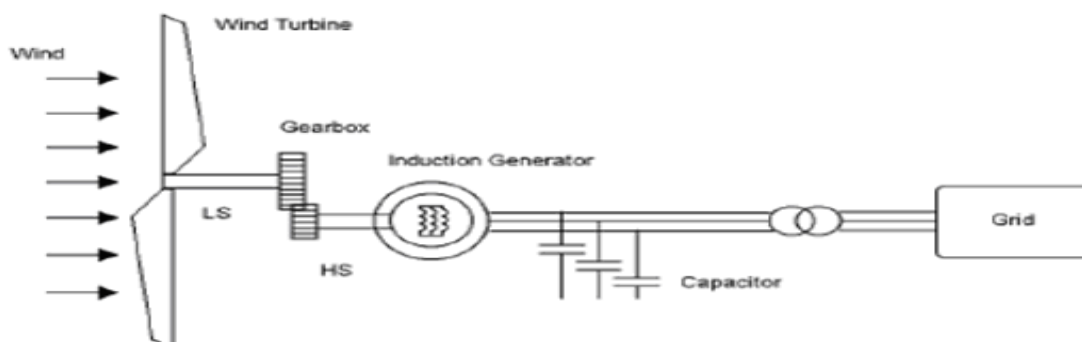
Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη ανεμογεννήτρια είναι η ασύγχρονη. Παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα, όπως στιβαρότητα, κατασκευαστική απλότητα και χαμηλό κόστος. Το κύριο μειονέκτημά της είναι ότι ο στάτης χρειάζεται ένα άεργο ρεύμα μαγνήτισης.

Συνοψίζοντας, οι Α/Γ μπορούν να διαχωριστούν, σύμφωνα με την λειτουργία και τις αρχές ελέγχου τους, ως

- a) η σταθερών στροφών Α/Γ εφοδιασμένη με γεννήτρια επαγωγής (no load compensated)
- b) η εν μέρει μεταβλητών στροφών Α/Γ εφοδιασμένη με γεννήτρια επαγωγής διπλής εξόδου με μεταβλητή αντίσταση δρομέα
- c) η μεταβλητών στροφών Α/Γ εφοδιασμένη με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης ελεγχόμενη από μετατροπέα (back-to-back)
- d) η μεταβλητών στροφών Α/Γ εφοδιασμένη με σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών συνδεδεμένη στο δίκτυο μέσω μετατροπέα συχνότητας.

### 3.3.1 Ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας ( fixed speed wind turbines)

Η μηχανή επαγωγής σε Α-Γ σταθερής ταχύτητας συνδέεται απευθείας στο ηλεκτρικό δίκτυο όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5 Α/Γ σταθερής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής (ασύγχρονη)



Στην περίπτωση των ανεμογεννητριών σταθερής ταχύτητας, ταχύτητας η γεννήτρια είναι απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο, με μια διάταξη ομαλής εκκίνησης (soft starter) και μια συστοιχία πυκνωτών για τη μείωση της κατανάλωσης άεργου ισχύος

Ανεξάρτητα από την ταχύτητα του ανέμου, η ταχύτητα του δρομέα είναι σταθερή και καθορίζεται από τη συχνότητα του συνδεδεμένου δικτύου, τη σχέση του κιβωτίου ταχυτήτων και το σχεδιασμό της γεννήτριας. Σχεδιάζονται ώστε να παρουσιάζουν βέλτιστη αεροδυναμική απόδοση αλλά σε μια συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου.

Το πλεονέκτημά τους είναι ότι είναι απλές κατασκευαστικά, στιβαρές, αξιόπιστες και το κόστος των ηλεκτρικών της μερών είναι χαμηλό.

Επειδή η ταχύτητα είναι σχεδόν σταθερή στην συχνότητα του δικτύου και μη ελέγξιμη, δεν είναι δυνατόν να απορροφήσει την παλλόμενη ενέργεια εξαιτίας του στροβιλισμού του ανέμου. Επομένως, (για ένα σύστημα σταθερής ταχύτητας) ο στροβιλισμός του ανέμου θα έχει ως αποτέλεσμα μια ταλαντευόμενη ροπή στη μηχανική ροπή η οποία θα έχει ως αποτέλεσμα η ισχύς του δικτύου να αυξομειώνεται με πιθανές διακυμάνσεις της τάσης σε ένα ασθενές δίκτυο.

### **3.3.2 Ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας (variable speed wind turbines)**

Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών σχεδιάζονται ώστε να επιτυγχάνουν βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς σε ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων του ανέμου.

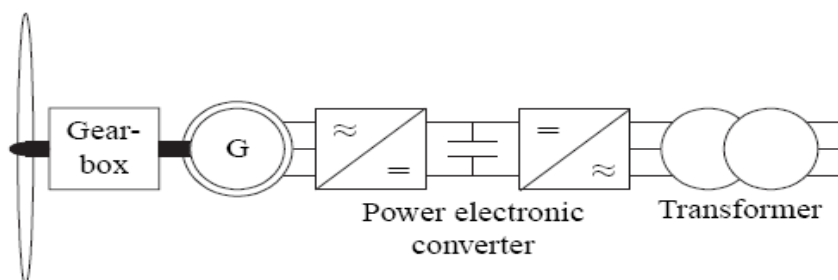
Μέσω της λειτουργίας με μεταβλητές στροφές γίνεται εφικτό να προσαρμόζεται η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα της ανεμογεννήτριας σε κάθε ταχύτητα ανέμου. Με αυτόν τον τρόπο, ο λόγος ταχύτητας ακροπερυγίου  $\lambda$  διατηρείται σταθερός σε μία προκαθορισμένη τιμή που αντιστοιχεί στον συντελεστή μέγιστης αεροδυναμικής απόδοσης (αρχή του αεροδυναμικού ελέγχου ισχύος (pitch control)).

Σε αντίθεση με τη διάταξη σταθερών στροφών, η διάταξη μεταβλητών στροφών διατηρεί τη ροπή της γεννήτριας σχεδόν σταθερή και οι διακυμάνσεις της ισχύος που προκαλούνται από μεταβολές του ανέμου αποσβένονται μέσω της αλλαγής της ταχύτητας του δρομέα.

Το ηλεκτρικό σύστημα μιας ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών είναι πιο πολύπλοκο από το αντίστοιχο των σταθερών στροφών. Συνήθως αποτελείται από μια επαγωγική ή σύγχρονη γεννήτρια, συνήθως επαγωγική, που συνδέεται στο δίκτυο μέσω ενός μετατροπέα ισχύος.

Τα πλεονεκτήματά αυτής της διάταξης είναι η αυξημένη απομάστευση ισχύος, η βελτιωμένη ποιότητα ισχύος και η μειωμένη καταπόνηση των μηχανικών μερών της ανεμογεννήτριας.

Τα μειονεκτήματά της είναι οι απώλειες στους μετατροπείς ισχύος, η πολυπλοκότητα και το αυξημένο κόστος.



Σχήμα 3.6. Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας με σύγχρονη / επαγωγής (ασύγχρονη) γεννήτρια



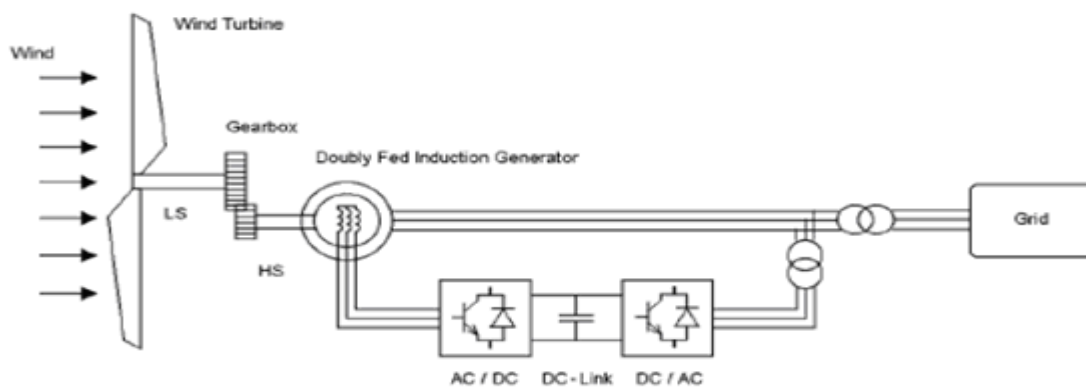
### 3.3.3 Ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας με ΓΕΔΤ

Η γεννήτρια διπλής τροφοδότησης κερδίζει συνεχώς έδαφος στη σημερινή αγορά. Αποτελείται από μια γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα με τα τυλίγματα του στάτη απευθείας συνδεδεμένα στο δίκτυο ΕΡ και τα τυλίγματα του ρότορα συνδεδεμένα σε μια διάταξη διασύνδεσης Εναλλασσόμενου Ρεύματος /Συνεχούς Ρεύματος /Εναλλασσόμενου Ρεύματος (ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ) με μετατροπείς πηγής τάσης. Ο όρος «διπλής τροφοδότησης» αναφέρεται στο γεγονός ότι η τάση στο στάτη εφαρμόζεται από το δίκτυο και η τάση στο ρότορα εφαρμόζεται από τον μετατροπέα ισχύος. Ο μετατροπέας αντισταθμίζει τη διαφορά ανάμεσα στη μηχανική και την ηλεκτρική συχνότητα εκχύνοντας στο ρότορα ένα ρεύμα με μεταβλητή συχνότητα. Έτσι, κατά την κανονική λειτουργία αλλά και κατά τη διάρκεια σφαλμάτων, η συμπεριφορά της γεννήτριας ελέγχεται από τον μετατροπέα ισχύος και τους ελεγκτές του.

Η διάταξη των μετατροπέων αποτελείται από δύο μετατροπείς πηγής τάσης, ο ένας στην πλευρά του ρότορα και ο άλλος στην πλευρά του δικτύου, οι οποίοι ελέγχονται ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο. Ο μετατροπέας που βρίσκεται στην πλευρά του ρότορα ελέγχει την πραγματική και την άεργο ισχύ ελέγχοντας τις συνιστώσες του ρεύματος του ρότορα, ενώ ο μετατροπέας από την πλευρά του δικτύου ελέγχει την τάση ΣΡ ώστε η άεργος ισχύς που απορροφάται από το δίκτυο να είναι ίση με μηδέν.

Ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας στο σύστημα οδήγησης, η ισχύς τροφοδοτείται στο ρότορα ή απορροφάται από αυτόν. Σε μια υπέρ-σύγχρονη κατάσταση λειτουργίας, η ισχύς οδηγείται από το ρότορα μέσω του μετατροπέα στο δίκτυο, ενώ στην υπο-σύγχρονη κατάσταση λειτουργίας η κατεύθυνση της ισχύος είναι από το δίκτυο προς το ρότορα. Και στις δύο καταστάσεις ο στάτης τροφοδοτεί με ενέργεια το δίκτυο [10].

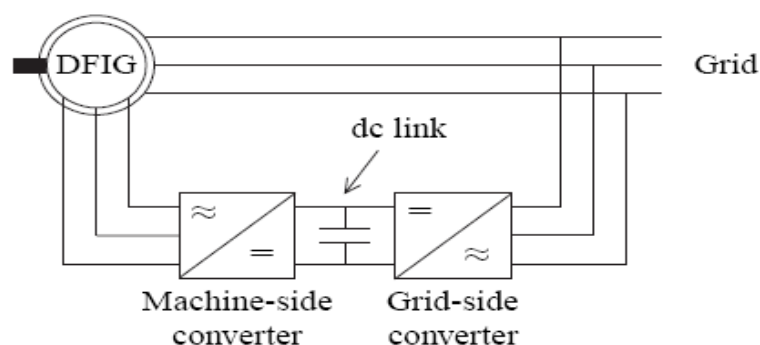
Η γεννήτρια διπλής τροφοδότησης παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα. Έχει την ιδιότητα να ελέγχει ανεξάρτητα την πραγματική από την άεργο ισχύ μέσω του ρεύματος στο ρότορα. Δεν είναι αναγκαίο να μαγνητιστεί από το δίκτυο, καθώς μπορεί να μαγνητιστεί και από το δίκτυο του ρότορα. Έχει επίσης την ικανότητα να παράγει άεργο ισχύ, η οποία τροφοδοτείται στο δίκτυο μέσω του μετατροπέα που βρίσκεται προς την πλευρά του δικτύου. Παρόλα αυτά αυτός ο μετατροπέας υπό κανονικές συνθήκες λειτουργεί υπό μοναδιαίο συντελεστή ισχύος και δεν εμπλέκεται σε ανταλλαγή άεργου ισχύος ανάμεσα στην ανεμογεννήτρια και το δίκτυο. Στην περίπτωση που το δίκτυο είναι ασθενές με διακυμάνσεις στην τάση, η γεννήτρια διπλής τροφοδότησης μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να παράγει ή να καταναλώνει ένα ποσό άεργου ισχύος με σκοπό τον έλεγχο της τάσης.



Σχήμα 3.7 Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης

### 3.4 Γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης για Α/Γ

Για συστήματα μεταβλητής ταχύτητας με περιορισμένο εύρος ( για παράδειγμα 30 % της σύγχρονης ταχύτητας) η ΓΕΔΤ μπορεί να είναι μια ενδιαφέρουσα λύση. Όπως προαναφέρθηκε νωρίτερα ο λόγος για αυτό είναι ότι ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος έχει μόνο να χειριστεί ένα μέρος (20-30%) της συνολικής ισχύος. Αυτό σημαίνει ότι οι απώλειες στον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος μπορούν να μειωθούν έναντι ενός συστήματος όπου ο μετατροπέας πρέπει να χειριστεί τη ολική ισχύ. Επιπλέον, το κόστος του μετατροπέα γίνεται χαμηλότερο. Το κύκλωμα του στάτη της ΓΕΔΤ συνδέεται με το δίκτυο ενώ το κύκλωμα του δρομέα συνδέεται με έναν μετατροπέα μέσω των δαχτυλιδιών ολίσθησης. Μια πιο λεπτομερής εικόνα του συστήματος της ΓΕΔΤ με back to back μετατροπείς φαίνεται στο σχήμα 3.8 :



**Σχήμα 3.8 Σύστημα ΓΕΔΤ με a back-to-back μετατροπέα .**

#### **Σημείωση :**

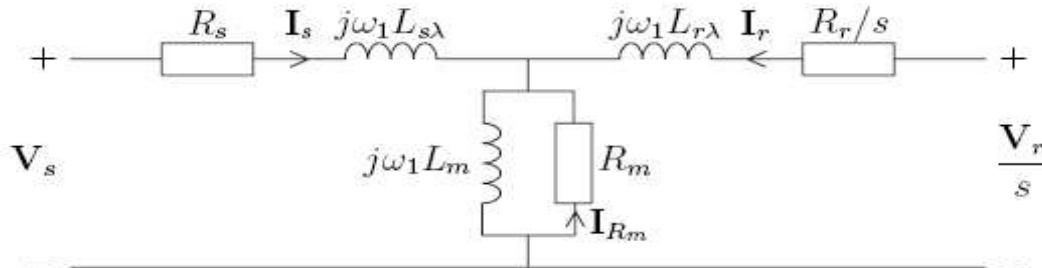
Ο μετατροπέας που συνδέεται μεταξύ δρομέα και τερματικό ζυγό της Α/Γ αποτελείται από δύο μετατροπείς, δηλ. το μετατροπέα στην πλευρά της μηχανής και το μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου, οι οποίοι συνδέονται μέσω της dc πλευράς τους. Στη διεθνή βιβλιογραφία το σχήμα αυτό των μετατροπέων είναι γνωστό ως back to back.

Ο back to back μετατροπέας αποτελείται από δύο μετατροπείς :έναν μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου (grid side converter) και έναν στην πλευρά του δρομέα (rotor side converter), οι οποίοι συνδέονται back to back. Μεταξύ των δύο μετατροπέων τοποθετείται ένας DC-link πυκνωτής, σαν αποθήκη ενέργειας, με στόχο να διατηρεί μικρές τις διακυμάνσεις (ή τον κυματισμό) της DC-link τάσης. Με τον μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα είναι δυνατό να ελεγχθεί η ροπή ή η ταχύτητα της ΓΕΔΤ και επίσης ο συντελεστής ισχύος στα τερματικά του στάτη, ενώ ο κύριος στόχος του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου (στάτη) είναι να κρατήσει την DC-link τάση σταθερή.

Μια συνήθης εφαρμογή για ΓΕΔΤ είναι οι Α/Γ καθώς αυτές λειτουργούν σε ένα περιορισμένο εύρος ταχύτητας περίπου  $\pm 30\%$  . Άλλες εφαρμογές ,πέρα από Α/Γ, είναι για παράδειγμα αυτόνομα συστήματα diesel συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, στρεφόμενοι μετατροπείς που τροφοδοτούν ένα δίκτυο σιδηροδρόμων από ένα δίκτυο σταθερής συχνότητας.

### 3.4.1 Ισοδύναμο κύκλωμα ΓΕΔΤ

Το ισοδύναμο κύκλωμα της ΓΕΔΤ, λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες μαγνήτισης, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 3.9 :



Σχήμα 3.9 Ισοδύναμο κύκλωμα της ΓΕΔΤ

Αυτό το ισοδύναμο κύκλωμα ισχύει για μια ισοδύναμη φάση σε Y και για υπολογισμούς μόνιμης κατάστασης. Στην περίπτωση που η ΓΕΔΤ είναι συνδεδεμένη κατά Δ, η μηχανή μπορεί ακόμα να εκφραστεί με το ισοδύναμο αυτό.

Σημειώνεται εδώ ότι, αν η τάση του δρομέα,  $V_r$  βραχυκυκλωθεί, το ισοδύναμο κύκλωμα για την ΓΕΔΤ μετατρέπεται στο τυπικό ισοδύναμο κύκλωμα για μια μηχανή επαγωγής βραχυκυκλωμένου δρομέα. Εφαρμόζοντας τον νόμο τάσης του Kirchhoff στο κύκλωμα προκύπτει :

$$\begin{aligned} V_s &= R_s I_s + j\omega_e L_{ls} I_s + j\omega_e L_m (I_s + I_r + I_{Rm}) \\ \frac{V_r}{s} &= \frac{R_r}{s} I_r + j\omega_e L_{lr} I_r + j\omega_e L_m (I_s + I_r + I_{Rm}) \\ 0 &= R_m I_{Rm} + j\omega_e L_m (I_s + I_r + I_{Rm}) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Επιπλέον, αν οριστούν η ροή διακένου, η ροή στάτη και δρομέα ως εξής:

$$\begin{aligned} \lambda_m &= L_m (I_s + I_r + I_{Rm}) \\ \lambda_s &= L_{ls} I_s + L_m (I_s + I_r + I_{Rm}) = L_{ls} I_s + \lambda_m \\ \lambda_r &= L_{lr} I_r + L_m (I_s + I_r + I_{Rm}) = L_{lr} I_r + \lambda_m \end{aligned} \quad (3.5)$$

Οι εξισώσεις που περιγράφουν το ισοδύναμο κύκλωμα μπορούν να ξαναγραφούν ως εξής:

$$\begin{aligned} V_s &= R_s I_s + j\omega_e \lambda_s \\ \frac{V_r}{s} &= \frac{R_r}{s} I_r + j\omega_e \lambda_r \\ 0 &= R_m I_{Rm} + j\omega_e \lambda_m \end{aligned} \quad (3.6)$$

Οι απώλειες στις ωμικές αντιστάσεις της μηχανής επαγωγής είναι :

$$P_{loss} = 3(R_s |I_s|^2 + R_r |I_r|^2 + R_m |I_m|^2) \quad (3.7)$$

ενώ είναι δυνατόν να εκφραστεί η ηλεκτρομηχανική ροπή,  $T_e$ , ως εξής

$$T_e = 3P \operatorname{Im} [\lambda_m I_r^*] = 3P \operatorname{Im} [\lambda_r I_r^*] \quad (3.8)$$

όπου  $P$  είναι ο αριθμός των ζευγών πόλων.

### 3.4.2 Ροή Ισχύος

Προκειμένου να ερευνηθεί η ροή ισχύος στο σύστημα της ΓΕΔΤ, η φαινόμενη ισχύς που παρέχεται στη ΓΕΔΤ μέσω του κυκλώματος του στάτη και του δρομέα πρέπει να καθοριστεί. Η φαινόμενη ισχύς  $S_s$  του στάτη και  $S_r$  του δρομέα μπορούν να βρεθούν ως εξής [2]:

$$\begin{aligned} S_s &= 3V_s I_s^* = 3R_s |I_s|^2 + j3\omega_e L_{ls} |I_s|^2 + j3\omega_e \lambda_m I_s^* \\ S_r &= 3V_r I_r^* = 3R_r |I_r|^2 + j3\omega_e L_{lr} |I_r|^2 + j3\omega_e s \lambda_m I_r^* \end{aligned} \quad (3.9)$$

Τώρα, η ενεργός ισχύς του δρομέα και του στάτη καθορίζονται απλά:

$$\begin{aligned} P_s &= \operatorname{Re}[S_s] = 3R_s |I_s|^2 + 3R_m |I_{Rm}|^2 + 3\omega_e \operatorname{Im} [\lambda_m I_r^*] \approx 3\omega_e \operatorname{Im} [\lambda_m I_r^*] \\ P_r &= \operatorname{Re}[S_r] = 3R_r |I_r|^2 - 3\omega_e s \operatorname{Im} [\lambda_m I_r^*] \approx -3\omega_e s \operatorname{Im} [\lambda_m I_r^*] \end{aligned} \quad (3.10)$$

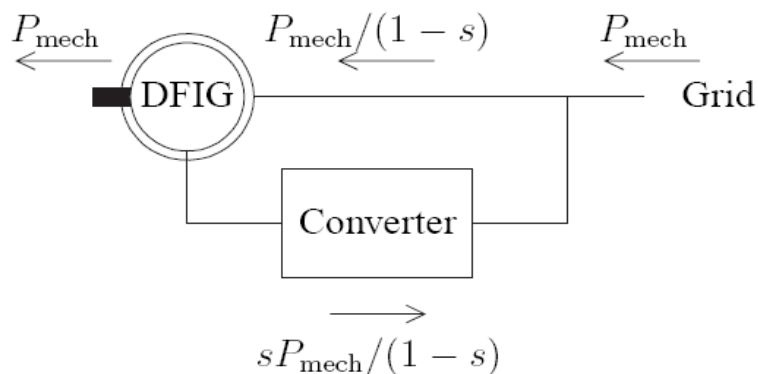
όπου οι προσεγγίσεις έχουν γίνει αμελώντας τις απώλειες στις αντιστάσεις και τις απώλειες μαγνήτισης. Από τις παραπάνω εξισώσεις η μηχανική ισχύς (ισχύς δικτύου) που παράγεται από την ΓΕΔΤ μπορεί να οριστεί ως το άθροισμα της ισχύος του στάτη και του δρομέα :

$$\begin{aligned} P_{mech} &= P_s + P_r \\ P_{mech} &= 3\omega_s \operatorname{Im} [\lambda_m I_r^*] - 3\omega_e s \operatorname{Im} [\lambda_m I_r^*] = 3 \operatorname{Im} [\lambda_m I_r^*] \omega_e (1-s) \\ P_{mech} &= 3 \operatorname{Im} [\lambda_m I_r^*] \omega_e \left(1 - \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_e}\right) = 3 \operatorname{Im} [\lambda_m I_r^*] \omega_r \end{aligned} \quad (3.11)$$

Διαιρώντας την  $P_{mech}$  με τη μηχανική ταχύτητα του δρομέα,  $\omega_m = \frac{\omega_r}{P}$ , η παραγόμενη ηλεκτρομηχανική ροπή δίνεται από τον τύπο που έχουμε παραθέσει παραπάνω.

Επιπλέον, αυτό σημαίνει ότι :

$$P_s \approx \frac{P_{mech}}{1-s} \quad \text{και} \quad P_r \approx -s \frac{P_{mech}}{1-s}$$



Σχήμα 3.10 Ροή ισχύος σε σύστημα ΓΕΔΤ χωρίς απώλειες

Στο σχήμα 3.10 φαίνεται η ροή ισχύος ενός συστήματος ΓΕΔΤ χωρίς απώλειες. Επίσης, στο σχήμα μπορεί να φανεί πώς η μηχανική ισχύς διαιρείται μεταξύ των κυκλωμάτων του στάτη και του δρομέα και ότι εξαρτάται από την ολίσθηση. Έτσι, η ισχύς του δρομέα είναι περίπου ίση με το αντίθετο της ισχύος του στάτη πολλαπλασιασμένη με την ολίσθηση, δηλαδή  $P_r \approx -sP_s$ . Ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας, η ισχύς τροφοδοτεί ή τροφοδοτείται από τον δρομέα: ρέει από το δίκτυο μέσω του μετατροπέα στο δρομέα ( $P_r < 0$ ) στην υπο-σύγχρονη κατάσταση ή αντίστροφα ( $P_r > 0$ ) στην υπέρ-σύγχρονη κατάσταση, όπως φαίνεται στο σχήμα. Και στις δυο περιπτώσεις ο στάτης τροφοδοτεί ενέργεια το δίκτυο ( $P_s > 0$ ).

Με αυτόν τον τρόπο καταλήγουμε στο γνωστό συμπέρασμα ότι ο μετατροπέας που συνδέεται στο δρομέα μπορεί να διαστασιοποιηθεί σαν κλάσμα της ονομαστικής ισχύος της ΓΕΔΤ αν η μέγιστη ολίσθηση είναι χαμηλή [10].



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>** **ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΕΛΕΓΧΟΥ**

### **4.1 Εισαγωγή**

Τα τελευταία χρόνια, οι ανεμογεννήτριες (Α/Γ) μεταβλητής ταχύτητας έχουν γίνει ο επικρατέστερος τύπος εγκατεστημένων ανεμογεννητριών ετησίως. Το αυξανόμενο ενδιαφέρον στις ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας οφείλεται στα χαρακτηριστικά τους: παρουσία μετατροπών ισχύος ταυτόχρονα και στο σύστημα ανεμογεννήτριας και στις δύσκολες απαιτήσεις του δικτύου. Από όλες τις διατάξεις ανεμογεννητριών μεταβλητής ταχύτητας, αυτή που ξεχωρίζει είναι η ανεμογεννήτρια με μηχανή επαγωγής διπλής τροφοδότησης (ΓΕΔΤ/DFIG). Το βασικό χαρακτηριστικό της ΓΕΔΤ είναι ότι η ισχύς που επεξεργάζεται από τον μετατροπέα ισχύος είναι μόνο ένα κλάσμα της συνολικής ισχύος και επομένως το μέγεθος, το κόστος και οι απώλειες είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με έναν πλήρη μετατροπέα ισχύος.

Σε αυτήν την εργασία, το ενδιαφέρον εστιάζεται στις στρατηγικές ελέγχου και αξιολόγηση της απόδοσης ανεμογεννητριών μεταβλητής ταχύτητας με ΓΕΔΤ. Καθώς οι μηχανικές και ηλεκτρικές δυναμικές σε μια Α/Γ είναι διαφορετικής κλίμακας του χρόνου (για παράδειγμα η ηλεκτρική δυναμική είναι πολύ πιο γρήγορη από τη μηχανική), δυο ιεραρχικά επίπεδα ελέγχου, συνδεδεμένα το ένα με το άλλο, μπορούν να διαχωριστούν στο συνολικό σύστημα ελέγχου [5]:

- Επίπεδο ελέγχου ΓΕΔΤ-περιέχει το γρήγορο ηλεκτρικό έλεγχο (μικρές σταθερές χρόνου) της ΓΕΔΤ και έχει ως σκοπό τον ανεξάρτητο έλεγχο της ενεργής και άεργης ισχύς της ΑΓ
- Επίπεδο ελέγχου ΑΓ-περιέχει τον έλεγχο της Α/Γ αυτής καθαυτής Εποπτεύει τον έλεγχο βήματος πτερυγίων καθώς και τον ηλεκτρικό έλεγχο της ΓΕΔΤ

Στην εργασία παρουσιάζονται οι στρατηγικές ελέγχου που εφαρμόζονται σε κάθε ιεραρχικό επίπεδο ελέγχου στην τουρμπίνα και η ακολουθία διασύνδεσης μεταξύ τους. Η μέθοδος ελέγχου σχεδιάζεται αρχικά για τις κανονικές συνεχείς λειτουργίες. Το ισχυρότερο χαρακτηριστικό γνώρισμα της εφαρμοσμένης μεθόδου ελέγχου είναι ότι επιτρέπει στην τουρμπίνα να λειτουργεί με τη βέλτιστη ισχύ εξόδου πέρα από ένα ευρύτερο φάσμα ταχυτήτων ανέμου. Επιπλέον, λόγω του σχεδιασμού αυτής της μεθόδου ελέγχου, η μετάβαση μεταξύ της λειτουργίας βελτιστοποίησης της ισχύος και της λειτουργίας περιορισμού της ισχύος δεν επηρεάζεται από τις μεγάλες διακυμάνσεις της ισχύος λόγω των μικρών αλλαγών στην ταχύτητα της γεννήτριας.

### **4.2 Περιγραφή συνολικού συστήματος ελέγχου Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας με ΓΕΔΤ**

Ο στόχος του συστήματος ελέγχου της Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας με ΓΕΔΤ είναι :

1. να ελέγχει την ισχύ που παρέχεται από την Α/Γ ώστε να βρει το βέλτιστο σημείο λειτουργίας,
2. να περιορίσει την ισχύ σε περίπτωση υψηλών ταχυτήτων ανέμου,
3. να ελέγχει την άεργη ισχύ που ανταλλάσσεται μεταξύ της Α/Γ και του δικτύου.

Κάθε ένα σύστημα της Α/Γ περιέχει υποσυστήματα (αεροδυναμικό, μηχανικό, ηλεκτρικό) με διαφορετικές τάξεις σταθερών χρόνου. Αυτή η διαφορά στις σταθερές χρόνου γίνεται ακόμα μεγαλύτερη στην περίπτωση Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας, λόγω του σύνθετου ηλεκτρικού συστήματος εξαιτίας του μετατροπέα ισχύος. Το πολύπλοκο ηλεκτρικό σύστημα απαιτεί ακόμα πιο πολύπλοκο σύστημα ελέγχου.

Στο σχήμα 4.1 φαίνεται το συνολικό σύστημα ελέγχου για Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας με ΓΕΔΤ το οποίο περιλαμβάνει [5], [1], [26]:

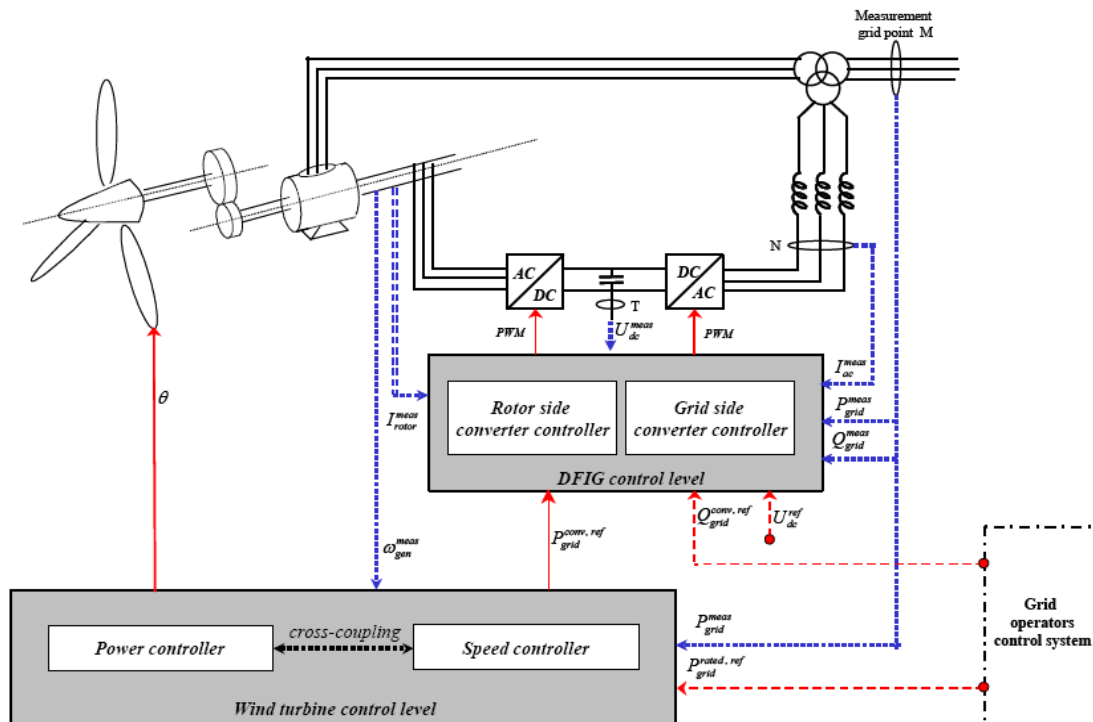
- Έλεγχος ΓΕΔΤ
- Έλεγχος Α/Γ

Ο έλεγχος της ΓΕΔΤ με γρήγορη δυναμική περιέχει τον ηλεκτρικό έλεγχο των μετατροπέων ισχύος και τον έλεγχο της ΓΕΔΤ.

Ο έλεγχος της Α/Γ με χαμηλή δυναμική επιβλέπει και το σύστημα βήματος της Α/Γ και το χαρακτηριστικό σημείο της ενεργής ισχύος της γεννήτριας επαγωγής. Παρέχει μια γωνία βήματος αναφοράς  $\theta$  ευθέως στον μηχανισμό κίνησης των πτερυγίων και ένα σήμα ισχύος αναφοράς  $P_{grid}^{conv.ref}$  για τον έλεγχο της ΓΕΔΤ.

Ο έλεγχος της ΓΕΔΤ περιέχει δυο ελεγκτές: έναν για τον μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα και έναν για τον μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου (στάτη). Ο έλεγχος της Α/Γ περιέχει δυο συζευγμένους ελεγκτές : έναν ελεγκτή ταχύτητας και έναν ελεγκτή που περιορίζει την ισχύ.

Το ονομαστικό σήμα αναφοράς της ενεργής ισχύος  $P_{grid}^{rated.ref}$  είναι κανονικά η ονομαστική ισχύς της Α/Γ. Σε ειδικές περιπτώσεις, το  $P_{grid}^{rated.ref}$  μπορεί εκτάκτως να επιβληθεί σε μια τιμή ισχύος χαμηλότερη από την ονομαστική ισχύ της Α/Γ (από τους χειριστές δικτύου).



Σχήμα 4.1 Συνολικό σύστημα ελέγχου για Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας με ΓΕΔΤ



### **4.3 Έλεγχος ανεμογεννήτριας (Α/Γ)**

#### **4.3.1 Αντικειμενικός σκοπός ελέγχου**

Οι κύριοι στόχοι του ελέγχου είναι ο περιορισμός της ισχύος και της ταχύτητας κάτω από συγκεκριμένες τιμές για την προστασία της τουρμπίνας από επικίνδυνη λειτουργία σε υψηλές τιμές του ανέμου. Καθώς οι ΑΓ αυξάνουν σε μέγεθος και ισχύ, οι προδιαγραφές του ελέγχου γίνονται πιο απαιτητικές και οι ρυθμιστικοί μηχανισμοί πιο πολύπλοκοι. Από τα συστήματα ελέγχου αναμένονται όχι μόνο να κρατήσουν την ΑΓ μέσα σε ασφαλή όρια λειτουργίας αλλά επίσης να βελτιώσουν την αποδοτικότητα και την ποιότητα της μετατροπής της ισχύος [9].

Ο έλεγχος της Α/Γ με χαμηλότερη δυναμική ανταπόκριση από τον έλεγχο της ΓΕΔΤ, ελέγχει την γωνία βήματος της Α/Γ και την ενεργή ισχύ αναφοράς για το επίπεδο ελέγχου της ΓΕΔΤ.

Η ανάπτυξη του συστήματος ελέγχου ΑΓ μπορεί να διαχωριστεί σε πολλά επίπεδα [9]. Το πρώτο είναι να ορίσει καθαρά το αντικείμενο του ελέγχου. Το δεύτερο είναι η επιλογή της κατάλληλης στρατηγικής ελέγχου, όπου καθορίζει το σημείο λειτουργίας της τουρμπίνας για κάθε ταχύτητα ανέμου. Το τρίτο είναι το πως η στρατηγική ελέγχου θα τεθεί σε λειτουργία. Περιγράφει την συλλογή των σχεδιαγραμμάτων ελέγχου, τις ελεγχόμενες μεταβλητές, τα σήματα αναφοράς, την διακοπτική λειτουργία ανάμεσα στους διάφορους ελεγκτές κτλ. Αυτό το επίπεδο συνήθως αναφέρεται ως εγκατάσταση ελεγκτή.

Η ΑΓ είναι ουσιαστικά μια διάταξη που αιχμαλωτίζει την ενέργεια του ανέμου και την μετατρέπει σε χρήσιμη μορφή. Γενικά τα συστήματα ελέγχου ΑΓ που συνδέονται σε ηλεκτρικά δίκτυα πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε να ελαχιστοποιούν το κόστος της παρεχόμενης ισχύος εξασφαλίζοντας ασφαλή λειτουργία, εκπομπές ήχου και ποιότητα ισχύος. Η ελαχιστοποίηση του κόστους της ενεργείας περιλαμβάνει την μεγιστοποίηση της ενεργείας που αποσπάται από τον άνεμο και ταυτόχρονα λαμβάνει υπόψη τους περιορισμούς για ασφαλή λειτουργία όπως ονομαστική ισχύ, ονομαστική ταχύτητα και ταχύτητα αποκοπής του ανέμου.

Για την ΑΓ, η χωρητικότητα παραγωγής καθορίζει πόσο ισχύ μπορεί να αποσπάσει από τον άνεμο λαμβάνοντας υπόψη ταυτόχρονα τα φυσικά και οικονομικά εμπόδια. Συνήθως παρουσιάζεται σε μια ιδεατή καμπύλη παραγόμενης ισχύος-ταχύτητα ανέμου. Η ιδανική καμπύλη ισχύος για μια ΑΓ φαίνεται στο σχήμα 4.2 παρατηρείται ότι το εύρος λειτουργίας των ταχυτήτων ανέμου οριοθετείται από την ταχύτητα έναυσης (στρέφονται τα πτερύγια)  $V_{min}$  (*cut in speed*) έως την ταχύτητα αποκοπής  $V_{max}$  (*cut out speed*). Η τουρμπίνα παραμένει εκτός λειτουργίας πέρα από αυτά τα όρια. Κάτω από την ταχύτητα έναυσης η διαθέσιμη ενέργεια από τον άνεμο είναι πολύ χαμηλή για να αντισταθμίσει το κόστος λειτουργίας και τις απώλειες. Η ταχύτητα έναυσης δεν πρέπει να συγχέεται με την ταχύτητα εκκίνησης όπου ο δρομέας ξεκινά να περιστρέφεται. Η ταχύτητα έναυσης ποικίλλει από τουρμπίνα σε τουρμπίνα και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά σχεδίασης. Ωστόσο, οι περισσότερες από τις εμπορικές ΑΓ έχουν ταχύτητα έναυσης ανάμεσα στα 3-5 m/s.

Όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει την ταχύτητα αποκοπής για να αποφευχθεί η υπερφόρτιση της ανεμογεννήτριας, διακόπτεται η λειτουργία της. Θα ήταν οικονομικά ασύμφορο η κατασκευή της ΑΓ να ήταν αρκετά στιβαρή για να υποστηρίξει τις ελλοχεύουσες μηχανικές πιέσεις σε υψηλές τιμές του ανέμου.

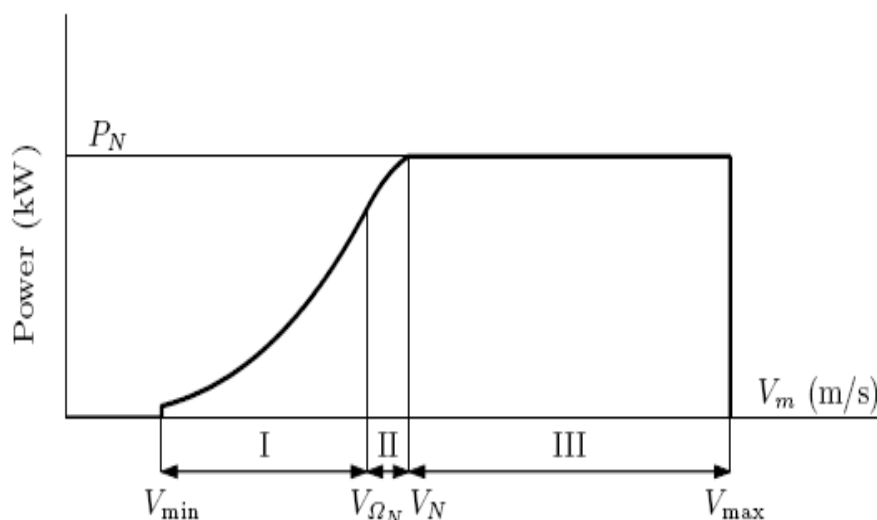
Στην πραγματικότητα, ακόμα κι αν οι ταχύτητες αέρα μεγαλύτερες από  $V_{max}$  περιέχουν τεράστια ενέργεια, η συμβολή τους στην ετήσια μέση ενέργεια είναι αμελητέα.

Αυτό επιβεβαιώνεται από το σχήμα 4.2 όπου περιγράφεται μια χαρακτηριστική λειτουργία πυκνότητας ισχύος επί ενός δεδομένου τόπου.

Παρατηρείται εκεί ότι η ενέργεια που αφήνεται για να συλληφθεί λόγω της κράτησης του στροβίλου σταματημένου πέρα από τα όρια ταχύτητας αέρα  $V_{min}$  και  $V_{max}$  είναι συγκριτικά χαμηλή. Μπορεί επίσης να σημειωθεί στο σχήμα 4.2 ότι η ιδανική καμπύλη ισχύος παραμένει σταθερή στην ονομαστική ισχύ  $P_N$  επάνω από την ταχύτητα  $V_N$  του ανέμου που ονομάζεται ονομαστική ταχύτητα  $V_N$  αέρα

Η εκτίμηση της τουρμπίνας προκύπτει από έναν συμβιβασμό μεταξύ της διαθέσιμης ενέργειας και του κόστους κατασκευής

Για παράδειγμα, ο σχεδιασμός της τουρμπίνας για να εξαγάγει όλη τη διαθέσιμη ενέργεια μέχρι την ταχύτητα αποκοπής θα οδηγούσε σε μια αύξηση στο κόστος ανά kW. Στην πραγματικότητα, οι ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες από το  $V_N$  δεν είναι αρκετά συχνές για να δικαιολογήσουν την πρόσθετη ταξινόμηση του στροβίλου που απαιτείται για να συλλάβει την ισχύ μεγαλύτερη από την ονομαστική [8], [9].



Σχήμα 4.2 Ιδανική καμπύλη ισχύος

Η ιδανική καμπύλη ισχύος παρουσιάζει τρεις διαφορετικές περιοχές με τους διακριτούς στόχους παραγωγής.

Σε χαμηλές ταχύτητες αέρα (περιοχή I), η διαθέσιμη ισχύς είναι χαμηλότερη από την ονομαστική ισχύ. Η διαθέσιμη ισχύς ορίζεται ως την ενέργεια στον αέρα που περνά μέσω της περιοχής του δρομέα πολλαπλασιαζόμενη με το μέγιστο συντελεστή ισχύος  $C_{p,max}$

Από την άλλη πλευρά, ο στόχος παραγωγής στην περιοχή με υψηλές ταχύτητες ανέμου (περιοχή III) είναι να περιορίσει την παραγομένη ισχύ κάτω από την ονομαστική της τιμή για να αποφευχθεί η υπερφόρτωση. Σε αυτήν την περιοχή η διαθέσιμη ισχύς υπερβαίνει την ονομαστική ισχύ και επομένως η τουρμπίνα πρέπει να χρησιμοποιηθεί με την αποδοτικά χαμηλότερη από  $C_{p,max}$

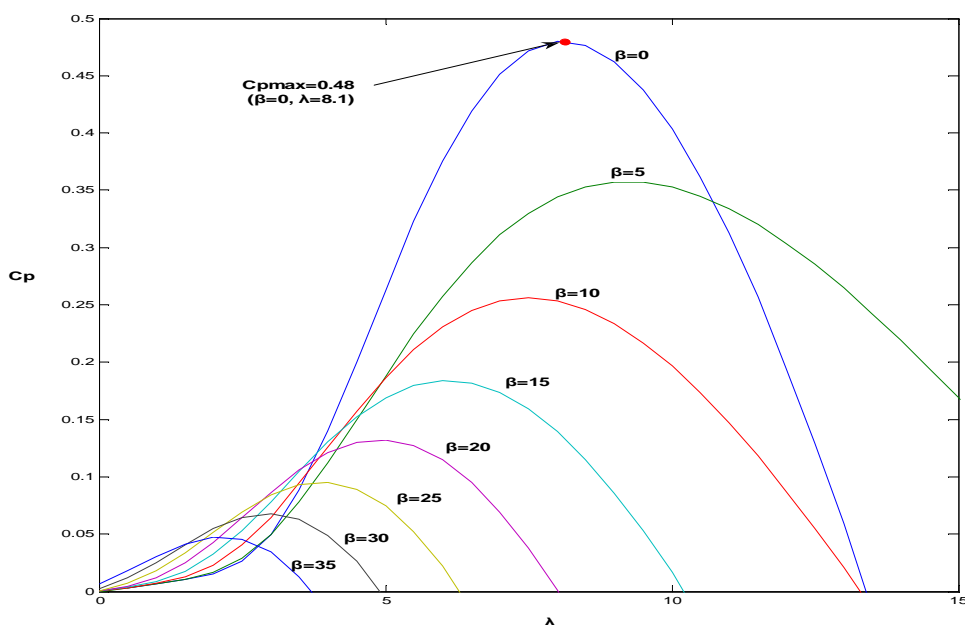
Τέλος, υπάρχει περιοχή II, η οποία είναι πραγματικά μια μετάβαση μεταξύ της βέλτιστης καμπύλης ισχύος της περιοχής I και της σταθερής γραμμής ισχύος της περιοχής III. Σε αυτήν την περιοχή, η ταχύτητα του δρομέα είναι περιορισμένη για να διατηρήσει την ακουστική εκπομπή θορύβου μέσα στα αποδεκτά επίπεδα και για να κρατήσει τις φυγοκεντρικές δυνάμεις κάτω από τις τιμές που είναι αποδεκτές από το δρομέα. Τελικά, στην περίπτωση που ένα τέτοιο όριο ταχύτητας δεν επιτυγχάνεται, η περιοχή II μπορεί να μην υπάρξει και η βέλτιστη καμπύλη ισχύος (δηλ., η περιοχή I) μπορεί να συνεχιστεί μέχρι να φτάσει στην ονομαστική ισχύ.

Η μετάβαση μεταξύ της μέγιστης ισχύς (περιοχή Ι) και ρύθμιση της ισχύος (περιοχή ΙΙΙ) και ο τρόπος που η ισχύς περιορίζεται στις επάνω από τις ονομαστικές ταχύτητες του ανέμου ασκούν άμεση επίδραση στα μεταβατικά φορτία που προκαλούνται από την αναταραχή. Οι ακατάλληλες στρατηγικές ελέγχου μπορούν αναπόφευκτα να οδηγήσουν στα ισχυρά μεταβατικά φορτία. Επομένως, ο προγραμματισμός της στρατηγικής ελέγχου πρέπει επίσης να τους λάβει υπόψη.

#### 4.3.2 Στρατηγική ελέγχου μεταβλητού-βήματος μεταβλητής-ταχύτητας

Οι στρατηγικές ελέγχου μεταβλητού-βήματος μεταβλητής-ταχύτητας εφαρμόζονται όλο και περισσότερο στις εμπορικές τουρμπίνες. Σε αυτή τη διάταξη, η τουρμπίνα είναι προγραμματισμένη για να λειτουργεί με μεταβλητή ταχύτητα και ένα σταθερό βήμα για ταχύτητες ανέμου μικρότερες από την ονομαστική και με μεταβλητό βήμα για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες από την ονομαστική.

Το πρωταρχικό κίνητρο για τουρμπίνες μεταβλητής ταχύτητας σε χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου είναι να ρυθμιστεί η ταχύτητα του δρομέα με τις μεταβαλλόμενες ταχύτητες ανέμου έτσι ώστε ο συντελεστής ισχύος  $C_p(\lambda, \beta)$  να διατηρείται πάντα στη μέγιστη τιμή του. Ο συντελεστής ισχύος  $C_p(\lambda, \beta)$  έχει ένα μέγιστο  $C_{p,opt}$  για έναν χαρακτηριστικό λόγο ταχύτητας ακροπερυγίων  $\lambda$  και τη γωνία βήματος  $\beta$  όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.3 (βλέπε και σχήμα 3.4) :



Σχήμα 4.3 Καμπύλη  $C_p$ - $\lambda$  για διάφορες τιμές της γωνίας βήματος  $\beta$

Ο μέγιστος συντελεστής ισχύος, είναι  $C_{p,opt} = C_{p,max} = 0.48$  και επιτυγχάνεται για  $\beta = 0^\circ$  και  $\lambda_{opt} = 8.1$

Για Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας, αυτό σημαίνει ότι για να εξαχθεί η μέγιστη ισχύς από μια συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου η στρατηγική ελέγχου πρέπει να αλλάξει την ταχύτητα του δρομέα της τουρμπίνας με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε το καταλληλότερο  $\lambda_{opt}$  να ακολουθεί πάντα τη σχέση :

$$\omega_m = \frac{\lambda_{opt} V_w}{R} \quad (4.1)$$

Αντικαθιστώντας το  $\lambda_{opt} = \frac{R\omega_m}{V_w}$  στην σχέση που περιγράφει την ισχύ εξόδου της Α/Γ, μιας και η ταχύτητα του ανέμου δεν είναι ικανοποιητική παράμετρος ελέγχου λόγω της ακανόνιστης φύσης της και τη χρονική καθυστέρηση στη μέτρηση της, η ισχύς εξόδου από μπορεί να εκφρασθεί ως εξής :

$$P_{w,opt} = \frac{1}{2} \rho C_{p,opt} A R^3 \frac{\omega_{t,opt}^3}{\lambda_{opt}^3} \quad (4.2)$$

Στόχος είναι η ιχνηλάτιση της μέγιστης ισχύος εφόσον η παραγομένη ισχύς είναι μικρότερη από την ονομαστική ισχύ σε ταχύτητες ανέμου υψηλότερες από την ονομαστική ταχύτητα αέρα. Η στρατηγική ελέγχου πρέπει να αλλάξει έτσι ώστε η τουρμπίνα να μην παράγει πλέον τη βέλτιστη ισχύ αλλά μόνο την ονομαστική ισχύ. Τα πτερύγια επομένως ρυθμίζονται έτσι ώστε να μειώσουν την αεροδυναμική αποδοτικότητα CP και με αυτόν τον τρόπο να διατηρήσει τη δύναμη στην ονομαστική της τιμή

Συνοψίζοντας, η συνολική στρατηγική ελέγχου της Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας αποτελείται από [8],[9]:

1. βελτιστοποίηση της ισχύος (κάτω από την ονομαστική ταχύτητα ανέμου) : όπου βελτιστοποιείται η ενέργεια που αποσπάται από τον άνεμο
2. περιορισμός της ισχύος (πάνω από την ονομαστική ταχύτητα ανέμου) : στόχος του ελεγκτή είναι να ακολουθήσει τις ονομαστικές τιμές της ισχύος

Οι παραπάνω στρατηγικές ελέγχου εφαρμόζονται στο εύρος ταχύτητας ανέμου  $[V_{w,cut-in} \quad V_{w,cut-out}]$  m/s. Για ταχύτητες ανέμου κάτω από την  $V_{w,cut-in}$  η παραγωγή ισχύος δεν είναι εφικτή ενώ για ταχύτητες ανέμου πάνω από την  $V_{w,cut-out}$  η Α/Γ πρέπει να διακόψει τη λειτουργία της για να διατηρήσει την ευστάθεια της .

Η Α/Γ που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία είναι αυτή που παρέχεται στην βιβλιοθήκη του Matlab/ SimPower Systems και έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά :

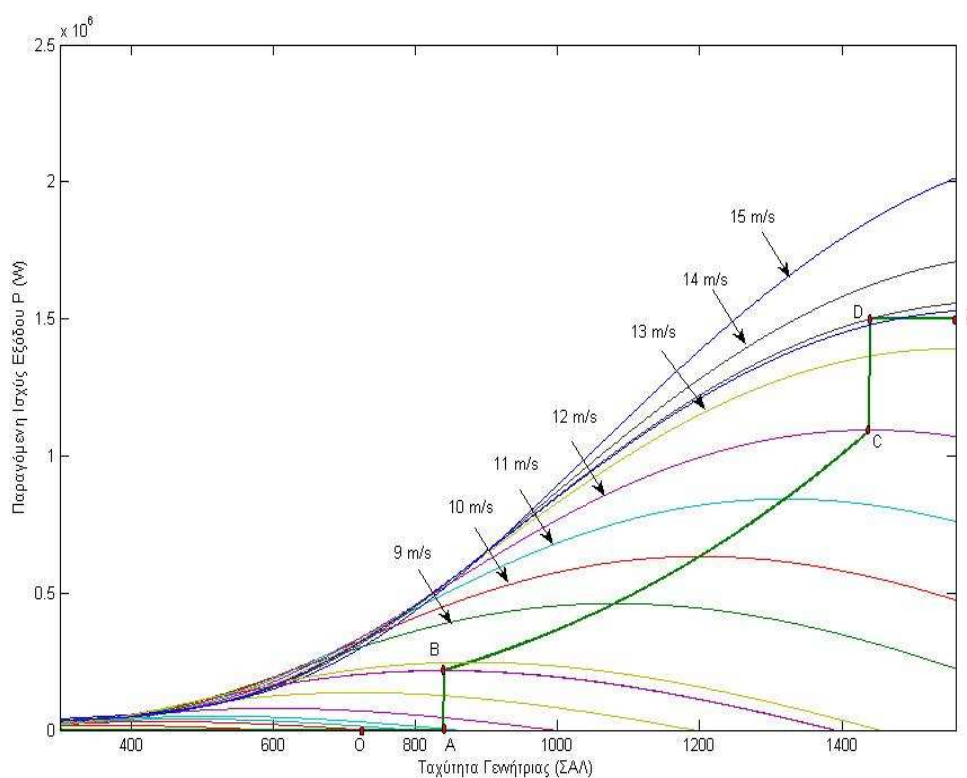
**Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά Ανεμογεννήτριας**

<b>ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΓ</b>	
Ακτίνα Πτερυγίου (R)	25.92 m
Επιφάνεια Δρομέα (A)	2110.7 m <sup>2</sup>
$V_{w,cut-in}$ (m/s)	3.67 m/sec
$V_{w,cut-out}$ (m/s)	25 m/s
Ταχύτητα βάσης ανέμου	12 m/s
Ονομαστική ισχύς	1.5 MW
Λόγος Κιβωτίου Ταχυτήτων	40.22

Στις περισσότερες περιπτώσεις, δεν είναι πραγματικά πρακτικό να διατηρηθεί το μέγιστο  $C_p$  από την  $V_{w,cut-in}$  έως την ονομαστική ταχύτητα ανέμου. Αν και μερικά συστήματα μεταβλητής-ταχύτητας μπορούν να λειτουργήσουν σε όλο το φάσμα ταχυτήτων περιστροφής του δρομέα, αυτό δεν ισχύει στην περίπτωση με συστήματα μεταβλητής-ταχύτητας βασισμένα στις γεννήτριες επαγωγής διπλής τροφοδότησης, οι οποίες είναι δημοφιλείς ειδικά σε μεγαλύτερες τουρμπίνες [9]. Αυτά τα συστήματα χρειάζονται μόνο έναν μετατροπέα ισχύος ικανό για να χειριστεί ένα μέρος της ισχύος της τουρμπίνας, πράγμα το οποίο σημαίνει σημαντική μείωση κόστους.

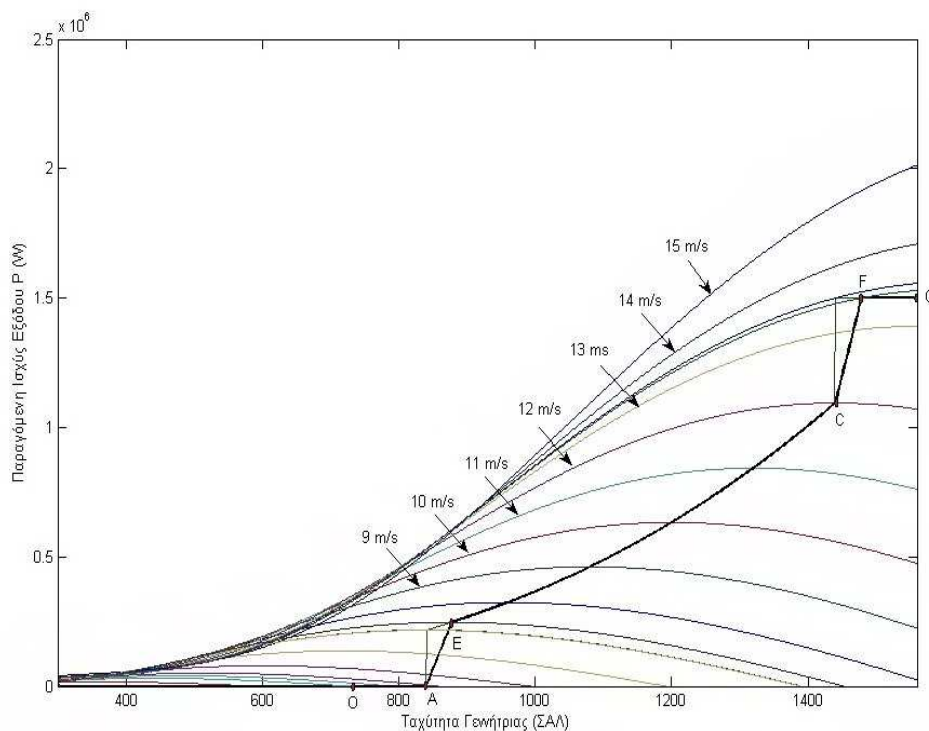
Αυτό σημαίνει ότι στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου, ακριβώς πάνω από την cut-in, μπορεί να είναι απαραίτητο να λειτουργήσει με μια σταθερή περιστροφική ταχύτητα, με το  $\lambda$  μεγαλύτερο από τη βέλτιστη τιμή του. Στο άλλο τέλος της σειράς, είναι συνηθισμένο να περιοριστεί η περιστροφική ταχύτητα σε κάποιο επίπεδο, που καθορίζεται συνήθως από τους αεροδυναμικούς περιορισμούς θορύβου, το οποίο επιτυγχάνεται με μια ταχύτητα ανέμου που είναι ακόμα κάτω από την ονομαστική. Είναι έπειτα οικονομικώς αποδοτικό να αυξηθεί η ζήτηση ροπής περαιτέρω, με τη σταθερή περιστροφική ταχύτητα, εφότου επιτυγχάνεται η ονομαστική ισχύς.

Η επιθυμητή σχέση παραγόμενης ισχύος-ταχύτητας μηχανής για την Α/Γ που χρησιμοποιείται στην εργασία φαίνεται στο σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4 Καμπύλη ισχύος εξόδου – ταχύτητα γεννήτριας

Η ταχύτητα της λειτουργίας περιορίζεται στο εύρος από 840 έως 1560 ΣΑΛ. Όταν η ταχύτητα ανέμου υπερβαίνει την τιμή της ταχύτητας cut in, το σύστημα επιτρέπεται να επιταχύνει εφότου η ταχύτητα των αξόνων της γεννήτριας φθάσει σε 840 ΣΑΛ. Το σύστημα συνδέεται με το δίκτυο σε αυτό το σημείο και ο έλεγχος στην πλευρά του δρομέα ενεργοποιείται.



Σχήμα 4.5 χαρακτηριστική ελέγχου ισχύος εξόδου – ταχύτητα γεννήτριας

Ο έλεγχος της ισχύς σύμφωνα με αυτό το χαρακτηριστικό ταχύτητας, εντούτοις, προκαλεί μερικά προβλήματα, επειδή η επιθυμητή ισχύς δεν καθορίζεται μεμονωμένα με τη μέγιστη και ελάχιστη ταχύτητα δρομέα και επειδή εάν μειωθεί η ταχύτητα δρομέα από λίγο επάνω από την ονομαστική ταχύτητα σε λίγο κάτω από την ονομαστική ταχύτητα ή από λίγο επάνω από την ελάχιστη ταχύτητα σε λίγο κάτω από την ελάχιστη ταχύτητα, η αλλαγή στην παραγόμενη ισχύ είναι πολύ μεγάλη [9]. Αυτό οδηγεί σε μεγάλες διακυμάνσεις της ισχύς όταν είναι η ταχύτητα του δρομέα είναι γύρω από την ονομαστική ή ελάχιστη τιμή της. Για να λυθούν αυτά τα προβλήματα, μια χαρακτηριστική ελέγχου που είναι παρόμοια με τη χαρακτηριστική που οδηγεί στη βέλτιστη ενέργεια που αποσπάται και λύνει τα προβλήματα που σχετίζονται με αυτό, θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία. Αυτή η χαρακτηριστική ελέγχου απεικονίζεται στο σχήμα 4.5

Ο κώδικας παραγωγής των χαρακτηριστικών των σχημάτων 4.4 και 4.5 έχει υλοποιηθεί στο πρόγραμμα Matlab .

### 4.3.3 Περιγραφή των Περιοχών Λειτουργίας

Στην παράγραφο αυτή περιγράφονται οι περιοχές λειτουργίας της Α/Γ [5] .

Περιοχή I	A-E	Πεδίο Τιμών
Ταχύτητα Ανέμου (m/s)		4.3 - 7.3
Ταχύτητα Δρομέα (rpm)		840- 877
Ισχύς Ανεμογεννήτριας (KW)		2 – 247.5
Γωνία Πτερυγίων (deg)		0

#### I. Μερική λειτουργία φορτίου με σταθερή ταχύτητα αναφοράς στο χαμηλό όριο

Αυτή η μέθοδος αντιστοιχεί στην κατάσταση όταν οι ταχύτητες ανέμου είναι τόσο μικρές που η ταχύτητα περιστροφής είναι μικρότερη από το κατώτερο όριο  $\omega_{rot} \leq \omega_{rot}^{\min}$  ( $n_{gen} \leq n_{gen}^{\min}$ )

Η ταχύτητα αναφοράς της τουρμπίνας είναι επομένως επιλεγμένη στην ελάχιστη τιμή

$\omega_{rot}^{ref} = \omega_{rot}^{\min}$  και  $\lambda(v) = \frac{\omega_{rot}^{\min} R}{v}$ . Ο δρομέας δεν μπορεί να λειτουργήσει με τη βέλτιστη

ταχύτητα πτερυγίων. Η βέλτιστη ισχύς επομένως επιτυγχάνεται με την κράτηση του βέλτιστου  $\beta$  και την ταχύτητα της τουρμπίνας στο χαμηλότερο όριο  $\omega_{rot}^{\min}$ .

Πίνακας 4.3 Περιγραφή της Περιοχής Λειτουργίας II

Περιοχή II E-C	Περιοχή Τιμών
Ταχύτητα Ανέμου (m/s)	7.3-12
Ταχύτητα Δρομέα (rpm)	877 - 1.440
Ισχύς Ανεμογεννήτριας (KW)	247.5 – 1.094
Γωνία Πτερυγίων (deg)	0

#### II. Μερική λειτουργία φορτίου με μεταβλητή ταχύτητα αναφοράς

Αυτή η μέθοδος αντιστοιχεί στην κατάσταση όταν η ταχύτητα περιστροφής είναι μεγαλύτερη από το κατώτερο όριο και μικρότερη από την ονομαστική ταχύτητα περιστροφής  $\omega_{rot}^{\min} \leq \omega_{rot} \leq \omega_{rot}^{nom}$  ( $n_{gen}^{\min} \leq n_{gen} \leq n_{gen}^{nom}$ ). Στόχος εδώ είναι να μεγιστοποιηθεί

η ενέργεια που λαμβάνεται ακολουθώντας τα μέγιστα της απόδοσης ισχύος  $C_p^{\max}$  στην καμπύλη.

Η τιμή της μέγιστης απόδοσης ισχύος  $C_p^{\max}$  αντιστοιχεί σε μια βέλτιστη γωνία βήματος  $\theta_{opt}$  και σε ένα βέλτιστο λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίων  $\lambda_{opt}$ . Η γωνία βήματος επομένως κρατείται σταθερή στην βέλτιστη τιμή  $\theta_{opt}$  ενώ το  $\lambda$  ρυθμίζεται στην βέλτιστη τιμή  $\lambda_{opt}$  πάνω σε διαφορετικές τιμές του ανέμου προσαρμόζοντας την ταχύτητα του δρομέα  $\omega_{rot}$  μέσω της σχέσης :

$$\omega_{rot}^{ref}(v) = \frac{\lambda_{opt} v}{R} \text{ (rad/s)}$$

Η μέγιστη μηχανική ισχύς τελικά επιτυγχάνεται :

$$P_{mec}^{\max}(v) = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{C_p^{\max}}{\lambda_{opt}^3} [\omega_{rot}^{ref}(v)]^3 \text{ (W)}$$

Πίνακας 4.4 Περιγραφή της Περιοχής Λειτουργίας III

<b>Περιοχή III C-F</b>	<b>Περιοχή Τιμών</b>
<b>Ταχύτητα Ανέμου (m/s)</b>	12 - 13.4
<b>Ταχύτητα Δρομέα (rpm)</b>	1.440 – 1.478
<b>Ισχύς Ανεμογεννήτριας (KW)</b>	1.094 – 1.500
<b>Γωνία Πτερυγίων (deg)</b>	0

### III. Μερική λειτουργία φορτίου με τη σταθερή ταχύτητα αναφοράς στο υψηλό όριο

Αυτή η μέθοδος αντιστοιχεί στην κατάσταση όταν η ταχύτητα της τουρμπίνας περιορίζεται στην ονομαστική τιμή  $\omega_{rot}^{ref} = \omega_{rot}^{nom}$  και όταν η παραγομένη ισχύος είναι μικρότερη από την ονομαστική τιμή ( $P_{mec} < P_{mec}^{rated}$ ). Για κάθε καθορισμένο  $\lambda$ , η βέλτιστη τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος  $C_p^{opt}(\lambda)$  και επομένως η αντίστοιχη γωνία βήματος  $\beta$  βρίσκονται στον πίνακα τιμών  $C_p(\beta, \lambda)$ . Σε αυτήν την περίπτωση, η υψηλότερη απόδοση επιτυγχάνεται με την τουρμπίνα να λειτουργεί στην ονομαστική ταχύτητα  $\omega_{rot}^{nom}$ .



Πίνακας 4.5 Περιγραφή της Περιοχής Λειτουργίας IV

<i>Περιοχή IV F-Vcut-out</i>	<i>Περιοχή Τιμών</i>
<b>Ταχύτητα Ανέμου (m/s)</b>	13.4 – 20
<b>Ταχύτητα Δρομέα (rpm)</b>	1.478 - 1560
<b>Ισχύς Ανεμογεννήτριας (KW)</b>	1.500
<b>Γωνία Πτερυγίων (deg)</b>	0 – 45°

#### IV. Λειτουργία πλήρους φορτίου

Αυτή η μέθοδος αντιστοιχεί στην κατάσταση όπου οι ταχύτητες του ανέμου είναι υψηλότερες από την ονομαστική του ταχύτητα. Η αναφορική έξοδος ισχύος είναι η ονομαστική μηχανική ισχύς  $P_{mec}^{ref} = P_{mec}^{rated}$  καθώς η ταχύτητα αναφοράς του δρομέα είναι η ονομαστική ταχύτητα του δρομέα  $\omega_{rot}^{ref} = \omega_{rot}^{nom}$ . Έτσι, για κάθε ταχύτητα ανέμου  $v$  το  $C_p(\lambda)$  δίνεται από τον τύπο :

$$C_p(\lambda) = \frac{2 P_{mec}^{ref} \lambda^3 (v)}{\rho \pi R^5 [\omega_{rot}^{nom}]^3}$$

Καθώς το  $C_p(\lambda)$  υπολογίζεται και το  $\lambda_v = \frac{\omega_{rot}^{nom} R}{v}$  είναι γνωστό, η στατική γωνία βήματος  $\beta$  μπορεί να βρεθεί από παρεμβολή στον πίνακα  $C_p(\beta, \lambda)$ .

#### 4.3.4 Σύστημα ελεγκτή βήματος κλίσης πτερυγίων (pitch controller system)

Η γωνία βήματος κρατείται σταθερή στο μηδέν έως ότου η ταχύτητα φτάσει την ταχύτητα του σημείου F της χαρακτηριστικής ισχύος. Πέρα από το σημείο F η γωνία βήματος είναι ανάλογη με την απόκλιση της ταχύτητας από την ταχύτητα του σημείου F. Το σύστημα ελέγχου παρουσιάζεται στο παράρτημα Γ.

Ο κρισιμότερος παράγοντας για την ρύθμιση είναι η δυνατότητά του να αποκριθεί γρήγορα στις μεταβολές της ροπής που παράγεται από τον αέρα. Αυτό βάζει υψηλή ζήτηση ειδικά στον ενεργοποιητή της γωνίας βήματος (σερβομηχανισμό) που συντονίζει τις γωνίες των πτερυγίων στην επιθυμητή θέση. Στην πράξη όλοι οι ενεργοποιητές έχουν μια περιορισμένη ικανότητα να αλλάξουν τις γωνίες βήματος των πτερυγίων του δρομέα. Προκειμένου να αποκτηθεί μια ρεαλιστική απάντηση στο σύστημα ελέγχου γωνίας βήματος, το πρότυπο μοντέλο σερβομηχανισμών αποτελεί έναν περιορισμό και της γωνίας βήματος και της κλίσης του. Η έξοδος είναι η βέλτιστη γωνία βήματος των πτερυγίων ( $\beta$ ).

Το κέρδος του ελεγκτή βήματος που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία είναι  $K_p=500$ , η μέγιστη γωνία βήματος είναι  $\beta_{max}=45$  και η μέγιστη αλλαγή της γωνίας βήματος είναι

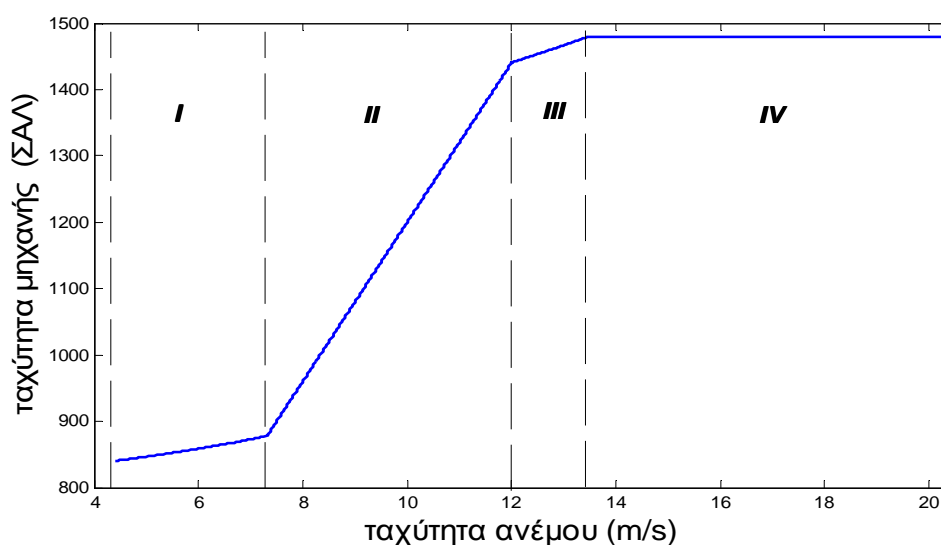
$$\frac{d}{dt} \beta_{max} = 2$$

### 4.3.5 Χαρακτηριστικές μεγεθών A/G

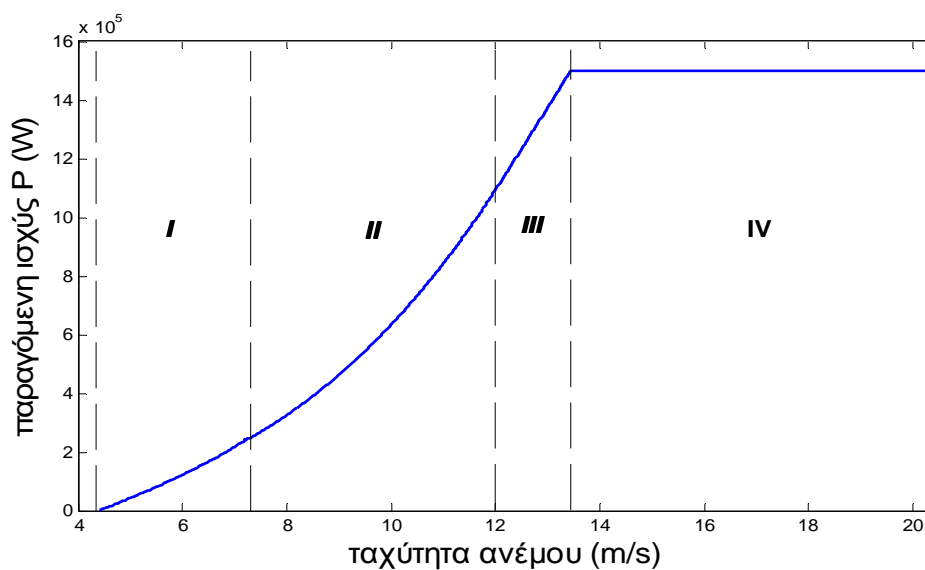
Παρακάτω παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές των βασικών μεγεθών

- ταχύτητα μηχανής  $n_m$
- παραγόμενη ισχύς  $P$
- γωνία βήματος  $\beta$
- αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος  $C_p$
- ο λόγος  $\lambda$  (tip speed ratio)
- ροπή  $T_{el}$

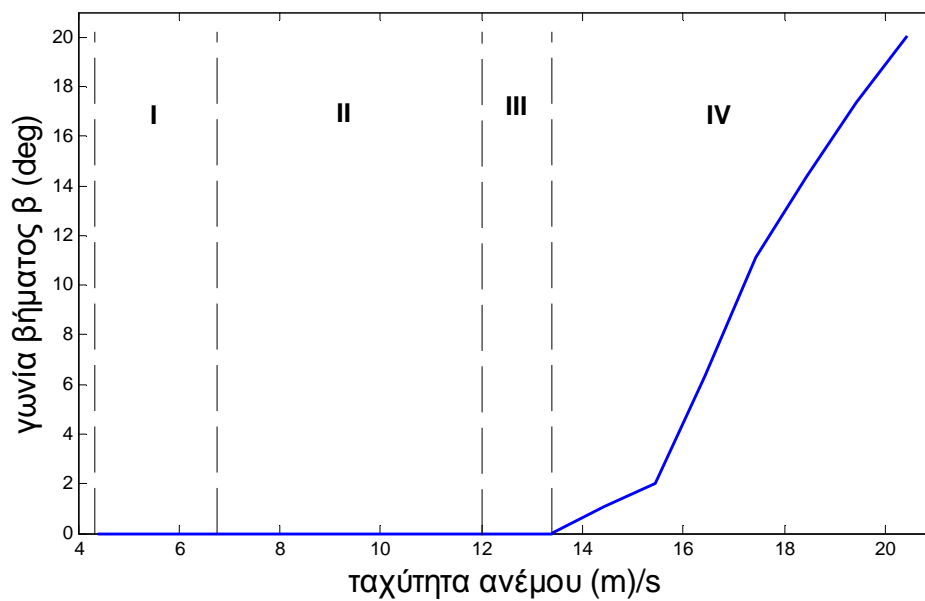
της A/G σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου. Επίσης σε κάθε σχήμα σημειώνεται και η αντίστοιχη περιοχή λειτουργίας (I, II, III, IV).



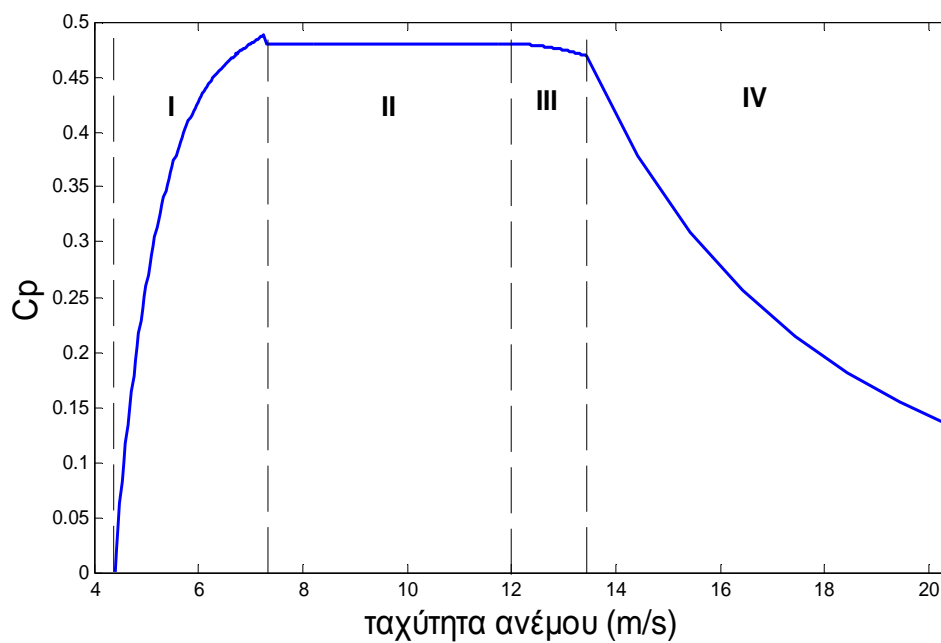
Σχήμα 4.6 χαρακτηριστική ταχύτητας ανέμου – ταχύτητας μηχανής



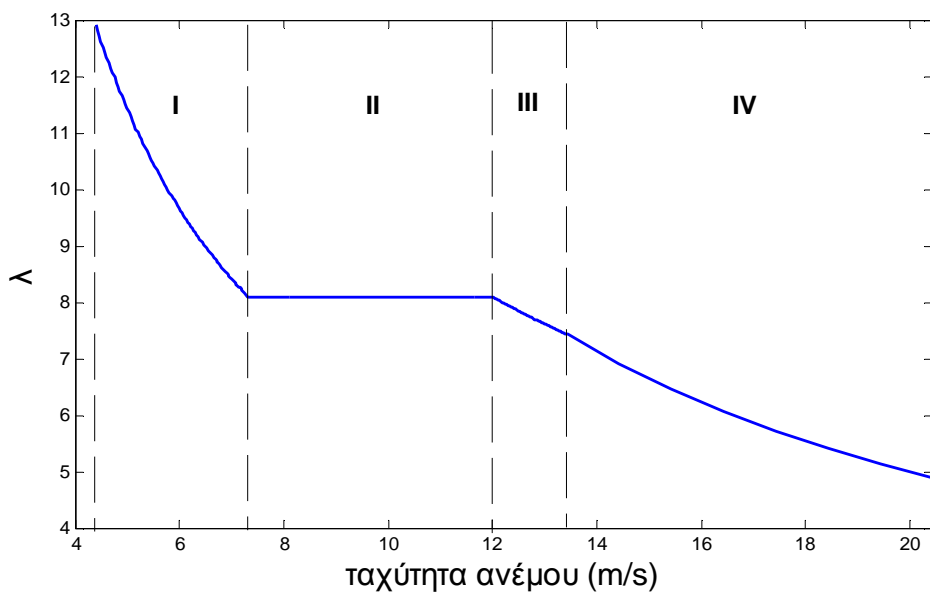
Σχήμα 4.7 χαρακτηριστική ταχύτητας ανέμου – παραγόμενης ισχύος



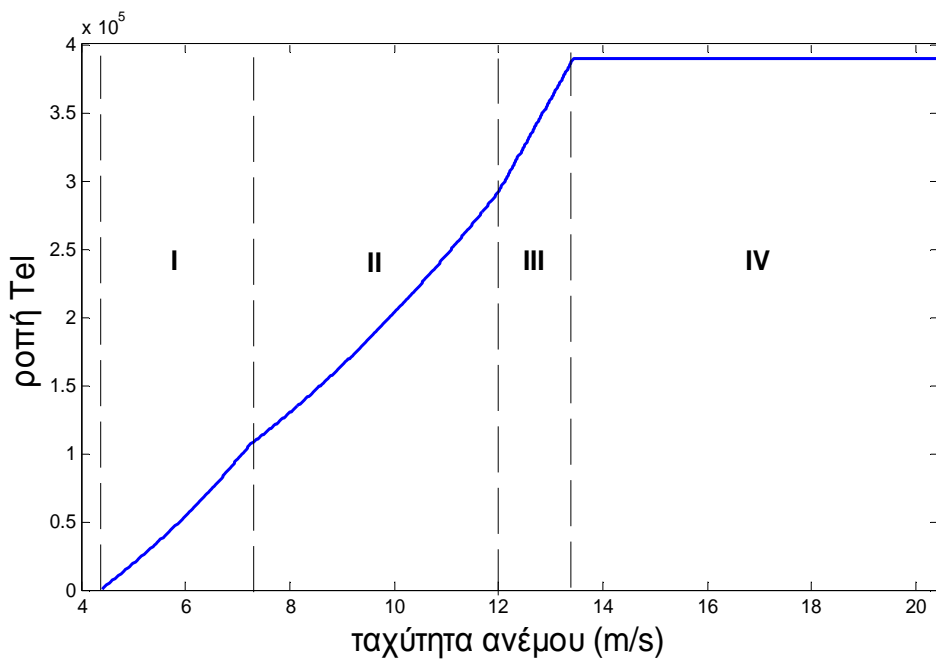
Σχήμα 4.8 χαρακτηριστική ταχύτητας ανέμου – γωνίας βήματος



Σχήμα 4.9 χαρακτηριστική ταχύτητας ανέμου – αεροδυναμικού συντελεστή  $C_p$



Σχήμα 4.10 χαρακτηριστική ταχύτητας ανέμου –  $\lambda$



Σχήμα 4.11 χαρακτηριστική ταχύτητας ανέμου – ροπής

#### **4.4 ΕΛΕΓΧΟΣ ΓΕΔΤ**

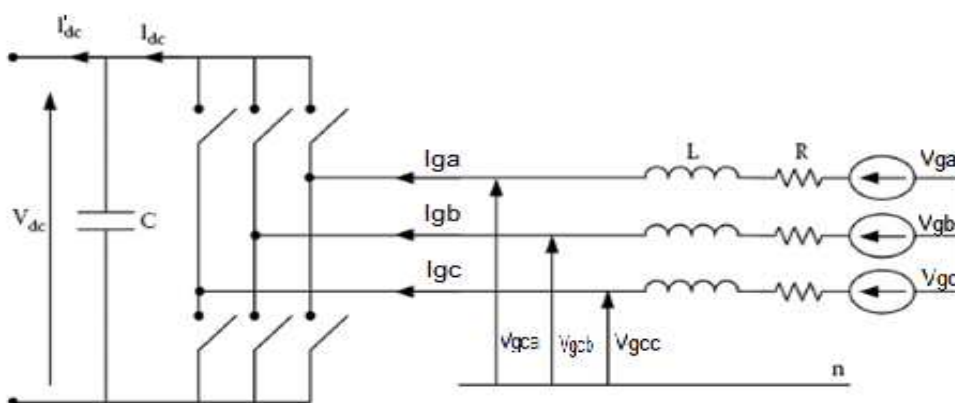
Ο έλεγχος της ΓΕΔΤ περιέχει το γρήγορο ηλεκτρικό έλεγχο της ΓΕΔΤ. Εν συντομία, οι διανυσματικές τεχνικές ελέγχου επιτρέπουν την απόξευξη ελέγχου της ενεργής και άεργης ισχύς. Αυτές οι τεχνικές βασίζονται στην έννοια του ελέγχου d-q σε διαφορετικά πλαίσια αναφοράς, όπου η τάση και το ρεύμα αλληλεπιδρούν στα διακριτά στοιχεία που σχετίζονται με την ενεργή και άεργη ισχύ. Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιείται ο έλεγχος ρευμάτων δρομέα προσανατολισμένος προς τη ροή του στάτη με αποσυζευμένο έλεγχο της ενεργής και άεργης ισχύς [1], [2], [5], [15], [26].

Στις παραγράφους περιγραφής της διαδικασίας ελέγχου της ΓΕΔΤ που ακολουθούν, σημειώνεται ότι:

- Οι ποσότητες του δρομέα είναι ανοιγμένοι στο στάτη και στις παραπάνω εξισώσεις παραλείπεται ο τόνος (') στις μεταβλητές του δρομέα.
- Ο μετασχηματισμός του Clarke σε στατό σύστημα αναφοράς συμβολίζεται με  $\alpha\beta\theta$  αντί  $dq\theta$ .
- Στις εξισώσεις περιγραφής της ΓΕΔΤ σε σύστημα αναφοράς που περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα ο δείκτης  $e$  παραλείπεται.

##### **4.4.1 -Έλεγχος μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου**

Ο μετατροπέας τάσης στην πλευρά του δικτύου χρησιμοποιεί ένα φίλτρο ισχύος με σκοπό να μειώσει τις αρμονικές ρεύματος όπως φαίνεται στο σχήμα 4.12 [19].



Σχήμα 4.12 Σχηματικό διάγραμμα μετατροπέα ισχύος στη μεριά του δικτύου

Στόχος του μετατροπέα στην πλευρά του στάτη είναι να κρατήσει την dc-link τάση σε μια τιμή άσχετα με την ποσότητα και την κατεύθυνση της ισχύος του δρομέα και να εγγραφεί μια λειτουργία του μετατροπέα μηδενική άεργη ισχύς. Αυτό σημαίνει ότι ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου ανταλλάσσει ενεργή ισχύ μόνο με το δίκτυο και επομένως η μετάδοση της άεργης ισχύς από την ΓΕΔΤ στο δίκτυο γίνεται μόνο μέσω του στάτη. Η dc τάση και η άεργη ισχύς ελέγχονται έμμεσα από τον έλεγχο του ρεύματος του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου.

Ο σκοπός του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου είναι να διατηρήσει την DC-link τάση σταθερή ανεξάρτητα από το μέγεθος και την κατεύθυνση της ροής ισχύος του

δρομα. Μια προσέγγιση διανυσματικού ελέγχου χρησιμοποιείται ,με ένα σύστημα αναφοράς προσανατολισμένο σύμφωνα με την διανυσματική θέση της τάσης του στάτη (ή παροχής), επιτρέποντας έτσι ανεξάρτητο έλεγχο της ενεργής και άεργης ισχύος. Ο PWM μετατροπέας ελέγχεται από ρεύμα , με τον ευθύ άξονα ρεύματος να χρησιμοποιείται για να ελέγξει την DC-link τάση και το quadrature axis current component χρησιμοποιείται για να ρυθμίσει την άεργη ισχύ.

Οι εξισώσεις τάσεων κατά μήκος των στοιχείων L και R είναι :

$$\begin{pmatrix} v_{ga} \\ v_{gb} \\ v_{gc} \end{pmatrix} = R \cdot \begin{pmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{pmatrix} + L \cdot \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_{gca} \\ v_{gcb} \\ v_{gcc} \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

Οι εξισώσεις αυτές μετασχηματίζονται σε ένα σύστημα αναφοράς το οποίο περιστρέφεται με την σύγχρονη ταχύτητα  $\omega_g$  :

$$\begin{aligned} v_{gd} &= R \cdot i_{gd} + L \cdot \frac{di_{gd}}{dt} - \omega_e L i_{gd} + v_{gcd} \\ v_{gq} &= R \cdot i_{gq} + L \cdot \frac{di_{gq}}{dt} - \omega_e L i_{gd} + v_{gcq} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Αμελώντας τις απώλειες λόγω της διακοπτικής λειτουργίας του μετατροπέα, καθώς επίσης και τις απώλειες της μηχανής και του ίδιου του μετατροπέα , η εξίσωση εξισορρόπησης της ενεργού ισχύος είναι:

$$P_g = v_{dc} \cdot i_{dc} = \frac{3}{2} (v_{gd} \cdot i_{gd} + v_{gq} \cdot i_{gq}) \quad (4.5)$$

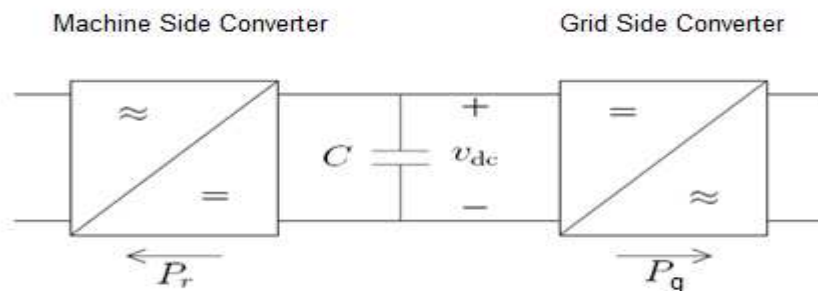
Με τον άξονα d του περιστρεφόμενου με την σύγχρονη ταχύτητα πλαισίου αναφοράς προσανατολισμένο με την τάση  $v_{gd}$  , η τάση  $v_{gq}$  είναι μηδέν και μιας και το πλάτος της τάσεως τροφοδοσίας είναι σταθερό θα είναι σταθερή και η τάση  $v_{gd}$ . Κάτω από αυτές τις συνθήκες θα ισχύει για την ισχύ η σχέση :

$$P_g = v_{dc} \cdot i_{dc} = \frac{3}{2} \cdot v_{gd} \cdot i_{gd} \quad (4.6)$$

Από την άλλη μεριά, και με βάση το μοντέλο της DC –link τάσης που φαίνεται στο σχήμα 4.14 Η ενέργεια η οποία αποθηκεύεται στον πυκνωτή C είναι :

$$W_{dc} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot v_{dc}^2 \quad (4.7)$$

Όπου  $v_{dc}$  είναι η συνεχής τάση διασύνδεσης.



Σχήμα 4.13 Σχηματικό διάγραμμα τάσεως dc-link

Επιπλέον, εάν οι απώλειες του μετατροπέα μπορεί να θεωρηθούν μικρές και επομένως να αμεληθούν, η ενέργεια στον πυκνωτή C βασίζεται στην ισχύ η οποία μεταφέρεται προς το δίκτυο  $P_g$  αλλά και την ισχύ  $P_r$  η οποία μεταφέρεται προς το κύκλωμα του δρομέα της επαγωγικής γεννήτριας διπλής τροφοδότησης σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{dW_{dc}}{dt} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \frac{d}{dt} v_{dc}^2 = -P_g - P_r \quad (4.8)$$

Αυτό σημαίνει ότι η dc τάση θα μεταβάλλεται σύμφωνα με την παραπάνω σχέση από όπου προκύπτει ότι για μια σταθερή dc τάση θα ισχύει

$$P_g = -P_r \Rightarrow \frac{3}{2} \cdot (v_{gd} \cdot i_{gd}) = -P_r \quad (4.9)$$

Αν με  $m_1$  συμβολίσουμε το δείκτη διαμόρφωσης του εύρους παλμών προκύπτει όπως είναι γνωστό ότι:

$$v_{gd} = \frac{m_1}{2\sqrt{2}} v_{dc} \Rightarrow i_{dc} = \frac{3m_1}{4\sqrt{2}} i_{gd} \quad (4.10)$$

Από την εξίσωση των ρευμάτων στην dc διασύνδεση προκύπτει ότι:

$$C \frac{dv_{dc}}{dt} = i_{dc} - i'_{dc} \Rightarrow C \frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{3 \cdot m_1 \cdot i_{gd}}{4\sqrt{2}} - i'_{dc} \quad (4.11)$$

Από την παραπάνω σχέση είναι προφανές ότι η dc τάση  $v_{dc}$  μπορεί να ελεγχθεί μέσω του ρεύματος  $i_{gd}$ .

Υπό τις ίδιες συνθήκες του διανυσματικού ελέγχου η άεργος ισχύς δίνεται από την σχέση:

$$Q_g = \frac{3}{2} (v_{gd} \cdot i_{gq} + v_{gq} \cdot i_{gd}) \quad v_{gq}=0 \Rightarrow Q_g = \frac{3}{2} (v_{gd} \cdot i_{gq}) \quad (4.12)$$

Από όπου προκύπτει ότι η άεργος ισχύς μπορεί να ελεγχθεί μέσω του ρεύματος  $i_{gq}$ .

Η γωνιακή θέση της τάσης τροφοδοσίας υπολογίζεται ως:  $\theta_e = \int \omega_e dt = \tan^{-1} \frac{v_\beta}{v_\alpha}$

Όπου  $V_\alpha$  και  $V_\beta$  είναι α και β συνιστώσες της τάσης στο στατικό σύστημα αναφοράς.

Η στρατηγική ελέγχου φαίνεται στο σχήμα 4.14:

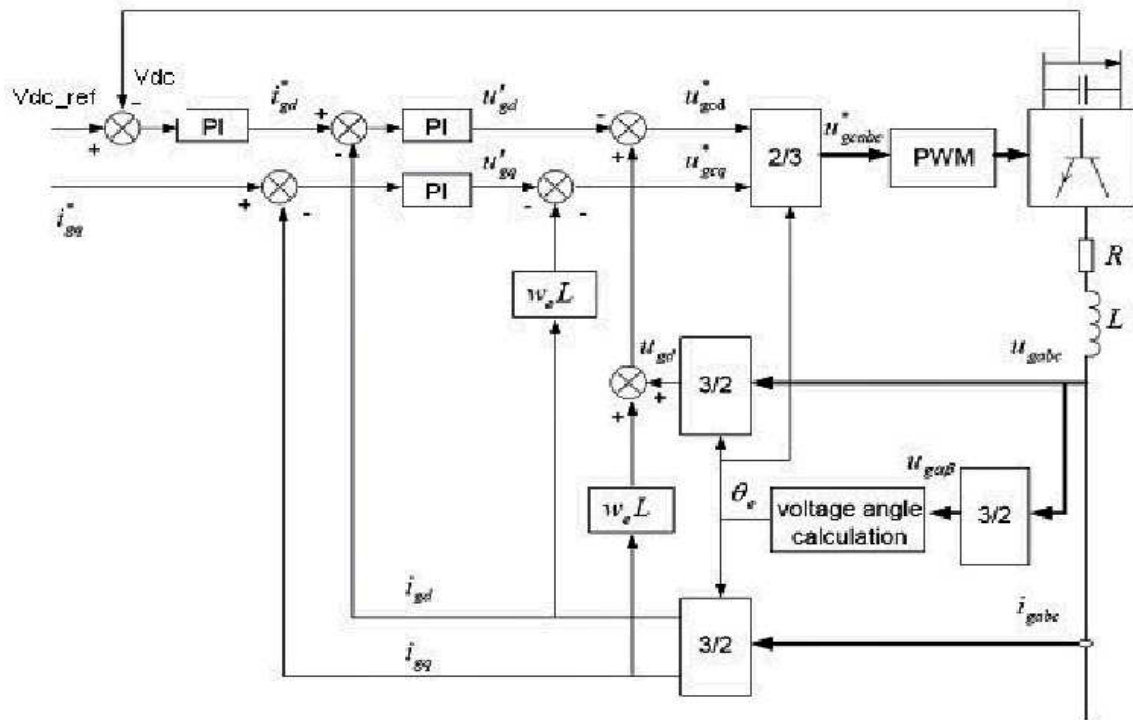
Αν και τα ρεύματα  $i_{gq}$  και  $i_{gd}$  είναι οι μεταβλητές οι οποίες πρέπει να ελεγχθούν με σκοπό να πραγματοποιηθεί η τεχνική του διανυσματικού ελέγχου, αυτό μπορεί να γίνει και με έμμεσο τρόπο ελέγχοντας τις τάσεις, αρκεί οι εξισώσεις των τάσεων να είναι αποσυζευγμένες ώστε να μπορεί να επιτευχθεί ανεξάρτητος έλεγχος των ρευμάτων.

Επομένως από τις εξισώσεις των τάσεων και με την προϋπόθεση ότι ο διανυσματικός έλεγχος επιτυγχάνεται, τα επιθυμητά σήματα των τάσεων στην εισόδου του μετατροπέα

(inverter) προκύπτουν από τις εξισώσεις περιγραφής των τάσεων του συστήματος και είναι τα εξής :

$$\begin{aligned} v_{gcd}^* &= -v'_{gd} - \omega_e \cdot L \cdot i_{gq} + v_{gd} \\ v_{gcq}^* &= -v'_{gq} - \omega_e \cdot L \cdot i_{gd} \end{aligned} \quad (4.13)$$

Όπου  $v'_{gd}$  και  $v'_{gq}$  είναι οι έξοδοι, των βρόχου ανατροφοδότησης των ρευμάτων. Η υλοποίηση των εξισώσεων αυτών στο πρόγραμμα Simulink φαίνεται στο παράρτημα Γ.



Σχήμα 4.14 Σχηματικό διάγραμμα του διανυσματικού ελέγχου στην πλευρά του δικτύου

Ο ελεγκτής της συνεχούς τάσης που χρησιμοποιήθηκε είναι ένας αναλογικός-ολοκληρωτικός PI ελεγκτής, οι παράμετροι  $K_p$  και  $K_i$  του οποίου, επιλέχθηκαν έτσι ώστε κατά τις μεταβολές του ανέμου οι διακυμάνσεις της συνεχούς τάσης να είναι οι μικρότερες δυνατές με προσομοίωση.

#### 4.4.2 Έλεγχος μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα

Στόχος του μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα είναι να ελέγξει ανεξάρτητα την της ενεργή και άεργη ισχύ. Η ενεργή και άεργη ισχύς δεν ελέγχονται ευθέως αλλά έμμεσα ελέγχοντας το impressed ρεύμα του δρομέα. Ο μετατροπέας στην πλευρά του δρομέα λειτουργεί σε ένα d-q σύστημα αναφοράς προσανατολισμένο προς τη ροή του στάτη, όπου το ρεύμα του δρομέα διαιρείται σε μια παράλληλη και μια κάθετη συνιστώσα στη ροή του στάτη αντίστοιχα. Ένας πολύ γρήγορος εσωτερικός βρόχος ελέγχου ρυθμίζει την ενεργή και άεργη συνιστώσα του ρεύματος του δρομέα. Τα καθορισμένα σημεία του ρεύματος



καθορίζονται από έναν πιο αργό εξωτερικό βρόχο ελέγχου που ρυθμίζει την ενεργή και άεργη ισχύ.

Η μηχανή επαγωγής ελέγχεται σε ένα σύγχρονα περιστρεφόμενο d-q άξονα αναφοράς όπου ο d άξονας είναι προσανατολισμένος με τη διανυσματική θέση της ροής του στάτη. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ένας ανεξάρτητος έλεγχος ανάμεσα στην ηλεκτρική ροπή και στο διεγερμένο ρεύμα του δρομέα. Ο PWM μετατροπέας στην πλευρά του δρομέα παρέχει την ώθηση και ο έλεγχος απαιτεί τη μέτρηση των ρευμάτων του στάτη και του δρομέα, την τάση του στάτη και τη θέση του δρομέα. Δεν χρειάζεται η γνώση της EMF του δρομέα καθώς είναι η περίπτωση όπου οι μετατροπείς επικοινωνούν φυσικά. Οι εξισώσεις του κυκλώματος του στάτη σε ένα πλαίσιο αναφοράς που περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα είναι οι εξής:

$$\underline{v}_{qds} = r_s \cdot \underline{i}_{qds} + (L_{ls} + L_m) \cdot p \cdot \underline{i}_{qds} + L_m \cdot p \cdot \underline{i}_{qdr} + j \cdot \omega_e \cdot [(L_{ls} + L_m) \cdot \underline{i}_{qds} + L_m \cdot p \cdot \underline{i}_{qdr}] \quad (4.14)$$

$$\underline{\lambda}_{qds} = (L_{ls} + L_m) \cdot \underline{i}_{qds} + L_m \cdot \underline{i}_{qdr} = L_s \cdot \underline{i}_{qds} + L_m \cdot \underline{i}_{qdr} \quad (4.15)$$

Λόγω του ότι οι τάσεις στον στάτη είναι σταθερές όσον αφορά το πλάτος, τη συχνότητα και τη φάση και επομένως η μαγνητική ροή  $\underline{\lambda}_{qds}$  είναι σχεδόν σταθερή, ο διανυσματικός έλεγχος στην πλευρά της μηχανής πραγματοποιείται με τον άξονα d του περιστρεφόμενου με την σύγχρονη ταχύτητα πλαισίου αναφοράς, προσανατολισμένο με την μαγνητική ροή του στάτη  $\underline{\lambda}_{qds}$ . Στην περίπτωση ισχύει:

$$\lambda_{qs} = 0 \quad ; \quad \frac{d \lambda_{qs}}{dt} = 0 \quad \rightarrow \quad \underline{\lambda}_{qds} = \lambda_{ds}$$

Οι εξισώσεις του στάτη στους d και q άξονες υπό αυτές τις συνθήκες γράφονται ως εξής :

$$\begin{aligned} v_{qs} &= r_s \cdot i_{qs} + \omega_e \cdot \lambda_{ds} \\ v_{ds} &= r_s \cdot i_{ds} + \frac{d \lambda_{ds}}{dt} \end{aligned} \quad (4.16)$$

Λόγω του ότι η μαγνητική ροή  $\lambda_{ds}$  δεν μεταβάλλεται πολύ θα ισχύει :  $\frac{d \lambda_{qs}}{dt} = 0$  και με την υπόθεση ότι  $r_s \approx 0$  προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} v_{ds} &= 0 \\ v_{qs} &= \omega_e \cdot \lambda_{ds} \end{aligned} \quad (4.17)$$

Η ενεργή και η άεργη ισχύ υπολογίζονται από τις σχέσεις :

$$\begin{aligned} P_s &= \frac{3}{2} (v_{ds} \cdot i_{ds} + v_{qs} \cdot i_{qs}) = \frac{3}{2} (v_{qs} \cdot i_{qs}) = \frac{3}{2} \omega_e \cdot \lambda_{qs} \cdot i_{qs} \\ Q_s &= \frac{3}{2} (v_{ds} \cdot i_{qs} + v_{qs} \cdot i_{ds}) = \frac{3}{2} (v_{qs} \cdot i_{ds}) = \frac{3}{2} \omega_e \cdot \lambda_{ds} \cdot i_{qs} \end{aligned} \quad (4.18)$$

Όμως από την εξίσωση της ροής και με τις συνθήκες του διανυσματικού ελέγχου προκύπτει ότι :

$$i_{qr} = \frac{1}{L_m} (\lambda_{qs} - L_s \cdot i_{qs}) \quad \stackrel{\lambda_{qs}=0}{\Rightarrow} \quad i_{qr} \cdot L_m = -L_s \cdot i_{qs}$$

$$i_{dr} = \frac{1}{L_m} (\lambda_{ds} - L_s \cdot i_{ds}) \quad \Rightarrow \quad i_{ds} \cdot L_s = \lambda_{ds} - L_m \cdot i_{dr}$$

Οι εξισώσεις της ενεργής και άεργης ισχύος παίρνουν την μορφή :

$$P_s = \frac{3}{2} \cdot \omega_e \cdot \lambda_{ds} \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot i_{qr}$$

$$Q_s = \frac{3}{2} \cdot \omega_e \cdot \lambda_{ds} \cdot \frac{1}{L_s} (\lambda_{ds} - i_{dr} \cdot L_m) \quad (4.19)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι η ενεργός ισχύ που στέλνεται (ή απορροφάται) από το κύκλωμα του στάτη μπορεί να ρυθμιστεί μέσω του ρεύματος  $i_{qr}$  του ρότορα, ενώ η άεργος ισχύς ελέγχεται μέσω του ρεύματος  $i_{dr}$  του ρότορα.

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή δίνεται από την σχέση :

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot L_m \cdot \text{Im} \{ i_{qds} \cdot i_{qdr}^* \} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot L_m \cdot (i_{qs} \cdot i_{dr} - i_{ds} \cdot i_{qr}) \quad (4.20)$$

Και με χρήση των σχέσεων :

$$i_{qr} = \frac{1}{L_m} (\lambda_{qs} - L_s \cdot i_{qs}) \quad (4.21)$$

$$i_{dr} = \frac{1}{L_m} (\lambda_{ds} - L_s \cdot i_{ds})$$

Παίρνει την μορφή :

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot (i_{qs} \cdot \lambda_{ds} - i_{ds} \cdot \lambda_{qs}) \quad (4.22)$$

Ο έλεγχος των ρευμάτων  $i_{qr}$  και  $i_{dr}$  επιτυγχάνεται έμμεσα μέσω των τάσεων  $v_{qr}$  και  $v_{dr}$  αντίστοιχα, όπως και στην περίπτωση του ελέγχου στην πλευρά του δικτύου και τα επιθυμητά σήματα των τάσεων προκύπτουν με βάση την ανάλυση που ακολουθεί:

Το πρώτο βήμα για τον προσδιορισμό των τάσεων είναι να εκφράσουμε τις εξισώσεις του δρομέα

$$v_{qr} = r_r \cdot i_{qr} + p \cdot \lambda_{qr} - (\omega - \omega_r) \cdot \lambda_{dr}$$

$$v_{dr} = r_r \cdot i_{dr} + p \cdot \lambda_{dr} - (\omega - \omega_r) \cdot \lambda_{qr} \quad (4.23)$$

ως προς την ροή του στάτη.

Για το σκοπό αυτό, από τις συνθήκες του διανυσματικού ελέγχου όπως περιγράφηκε πιο πάνω ισχύει ότι :

$$i_{ds} = \frac{1}{L_s} (\lambda_{ds} - i_{dr} \cdot L_m)$$

$$i_{qs} = -\frac{L_m}{L_s} i_{qr} \quad (4.24)$$

Και αντικαθιστώντας τα ρεύματα αυτά στις σχέσεις των μαγνητικών ροών του ρότορα :

$$\begin{aligned}\lambda_{dr} &= L_{lr} \cdot i_{dr} + L_m (i_{ds} + i_{dr}) \\ \lambda_{qr} &= L_{lr} \cdot i_{qr} + L_m (i_{qs} + i_{qr})\end{aligned}\quad (4.25)$$

Προκύπτουν οι σχέσεις :

$$\begin{aligned}\lambda_{qr} &= \sigma \cdot L_r \cdot i_{qr} \\ \lambda_{dr} &= \sigma \cdot L_r \cdot i_{dr} + \frac{L_m}{L_s} \lambda_{ds}\end{aligned}\quad (4.26)$$

όπου  $\sigma$  είναι ο συνολικός παράγοντας σκέδασης  $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s \cdot L_r}$

Οι τελικές εξισώσεις των τάσεων του ρότορα παίρνουν την μορφή :

$$\begin{aligned}v_{qr} &= r_r \cdot i_{qr} + \sigma \cdot L_r \cdot p \cdot i_{qr} + \omega_{slip} \left( \sigma \cdot L_r \cdot i_{dr} + \frac{L_m}{L_s} \lambda_{ds} \right) \\ v_{dr} &= r_r \cdot i_{dr} + \sigma \cdot L_r \cdot p \cdot i_{dr} - \omega_{slip} \cdot \sigma \cdot L_r \cdot i_{qr}\end{aligned}\quad (4.27)$$

Όπου έχει γίνει χρήση της συνθήκης  $\frac{d\lambda_{ds}}{dt} = 0$

Επομένως από τις εξισώσεις των τάσεων και με την προϋπόθεση ότι ο διανυσματικός έλεγχος επιτυγχάνεται, τα επιθυμητά σήματα των τάσεων στην εισόδου του μετατροπέα (inverter) προκύπτουν από τις εξισώσεις περιγραφής των τάσεων του συστήματος και είναι τα εξής :

$$\begin{aligned}v_{qr}^* &= v_{qr}' + \omega_{slip} \left( \sigma \cdot L_r \cdot i_{dr} + \frac{L_m}{L_s} \lambda_{ds} \right) \\ v_{dr}^* &= v_{dr}' - \omega_{slip} \cdot \sigma \cdot L_r \cdot i_{qr}\end{aligned}\quad (4.28)$$

Όπου  $v_{qr}'$  και  $v_{dr}'$  είναι οι έξοδοι, των βρόχου ανατροφοδότησης των ρευμάτων. Η υλοποίηση των εξισώσεων αυτών στο πρόγραμμα Simulink φαίνεται στο παράρτημα Γ.

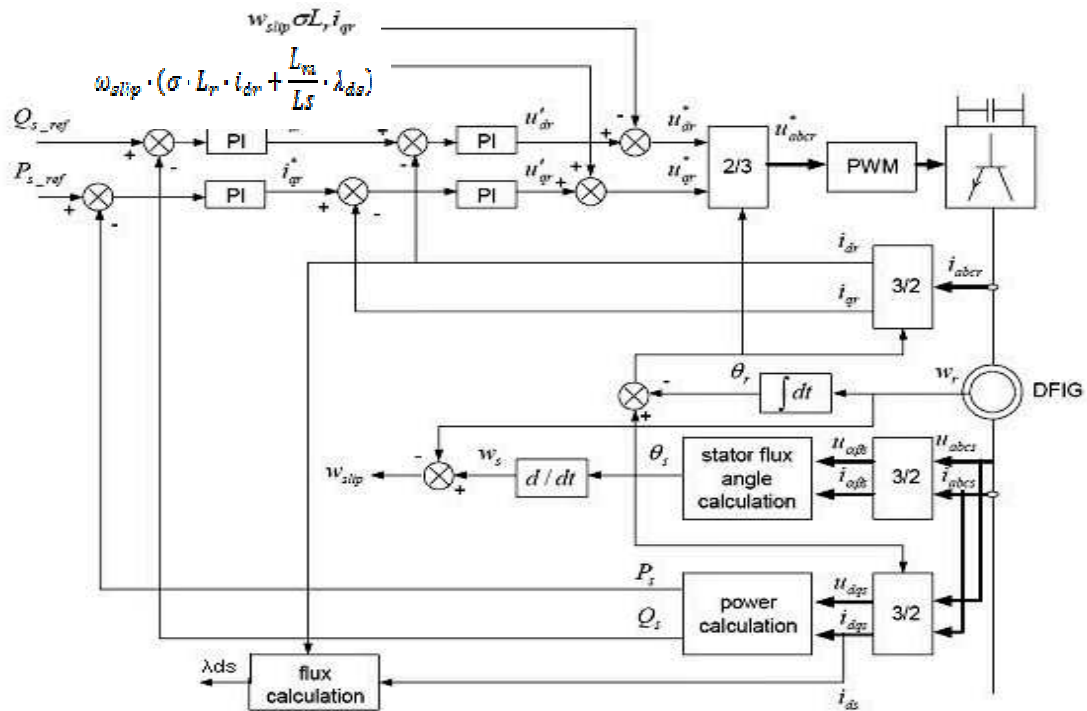
Η γωνία της ροής του στάτη υπολογίζεται :

$$\begin{aligned}\lambda_{as} &= \int (v_{as} - R_s i_{as}) dt \\ \lambda_{\beta s} &= \int (v_{\beta s} - R_s i_{\beta s}) dt \\ \theta_s &= \tan^{-1} \frac{\lambda_{as}}{\lambda_{\beta s}}\end{aligned}\quad (4.29)$$

Όπου  $\theta_s$  είναι η διανυσματική θέση της ροής του στάτη.

Υποθέτοντας ότι η συνολική άεργη ισχύ στη μηχανή παρέχεται μέσω του στάτη, το  $i_{dr}^* i_{dr}^*$  μπορεί να ρυθμιστεί μηδέν. ( $i_{dr}^* = 0$ )

Το σχήμα 4.15 δείχνει το μπλοκ διάγραμμα για τον έλεγχο της μηχανής. Το ρεύμα αναφοράς του q άξονα του δρομέα μπορεί να αποκτηθεί είτε από ένα εξωτερικό βρόχο ελέγχου της ταχύτητας είτε από μια ροπή αναφοράς επιβαλλομένη στη μηχανή.



Σχήμα 4.15 . Σχηματικό διάγραμμα του διανυσματικού ελέγχου στην πλευρά του δρομέα

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>** **ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ**

### **5.1 Εισαγωγή**

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από προσομοιώσεις που έγιναν με τη χρήση του μοντέλου της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης που αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια της εργασίας.

Οι προσομοιώσεις έγιναν με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab/Simulink.

Τα παρακάτω αποτελέσματα προέκυψαν με την προσομοίωση του μοντέλου της Α/Γ με δεδομένα που παρουσιάζονται στους Πίνακες στο παράρτημα.

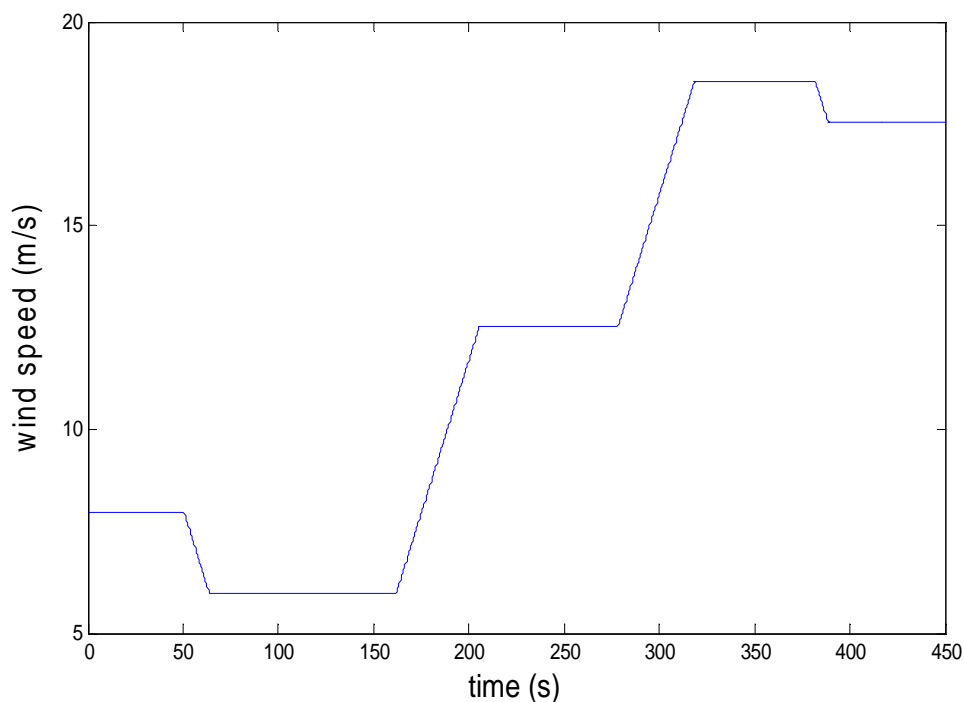
Η Α/Γ χρησιμοποιεί μια γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης (ΓΕΔΤ) αποτελούμενη από γεννήτρια επαγωγής wound rotor και έναν AC/DC/AC IGBT PWM μετατροπέα. Τα τυλίγματα του στάτη είναι κατευθείαν συνδεδεμένα στο δίκτυο (60Hz) ενώ ο δρομέας τροφοδοτείται με μεταβλητή συχνότητα μέσω του AC/DC/AC μετατροπέα. Η τεχνολογία της ΓΕΔΤ επιτρέπει την μέγιστη απορρόφηση ενέργειας από τον άνεμο για χαμηλές ταχύτητες ανέμου βελτιστοποιώντας την ταχύτητα της μηχανής και ελαχιστοποιώντας τις μηχανικές πιέσεις που δέχεται η μηχανή από τον άνεμο. Η βέλτιστη ταχύτητα της μηχανής που παράγει μέγιστη μηχανική ενέργεια για μια δοσμένη ταχύτητα ανέμου είναι ανάλογη της ταχύτητας του ανέμου. Για ταχύτητες ανέμου κάτω από 10 m/s ο δρομέας τρέχει στην υπό-σύγχρονη ταχύτητα ενώ σε υψηλές ταχύτητες ανέμου δρομέας τρέχει στην υπέρ-σύγχρονη ταχύτητα.

### **5.2 Απόκριση συστήματος σε μεταβολές του ανέμου.**

#### **5.2.1 Απόκριση του συστήματος σε μεταβολές (βηματικές) του ανέμου**

Στα σχεδιαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι αποκρίσεις των βασικών μεγεθών της Α/Γ (παραγόμενη ενεργός (P) και άεργος (Q) ισχύς,γωνιακή ταχύτητα περιστροφής  $\omega_r$  δρομέα της Α/Γ,η συνεχής τάση Vdc και η γωνία αλλαγής κλίσης πτερυγίων ( $\beta$ )).

Η ταχύτητα του ανέμου ακολουθεί τις μεταβολές που παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα :



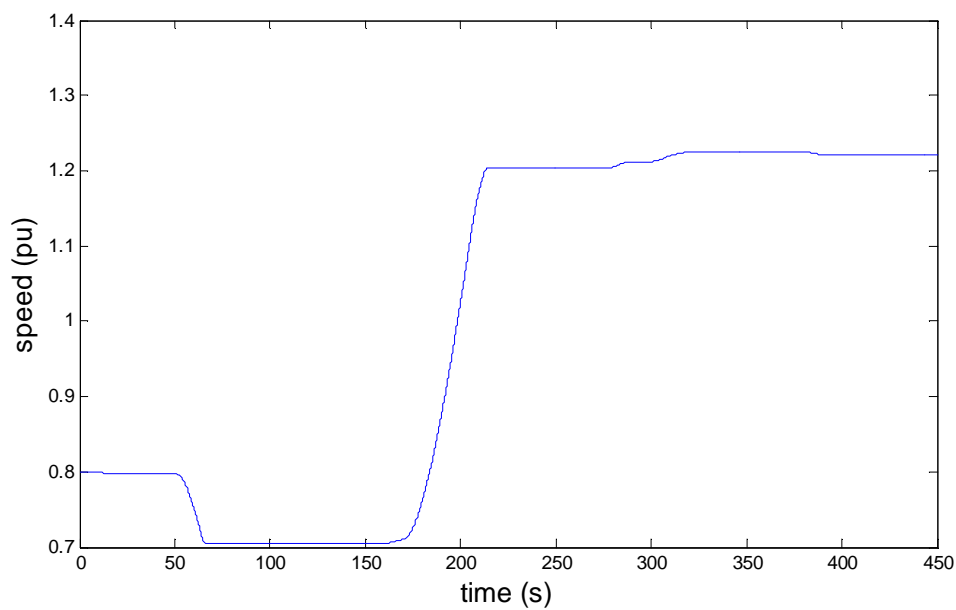
Σχήμα 5.1 ταχύτητα ανέμου  $V_w$  (m/s)

Οι μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου, όπως προκύπτει από την καμπύλη, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα και σημειώνεται επιπλέον σε κάθε χρονικό διάστημα οι περιοχές λειτουργίας της Α/Γ :

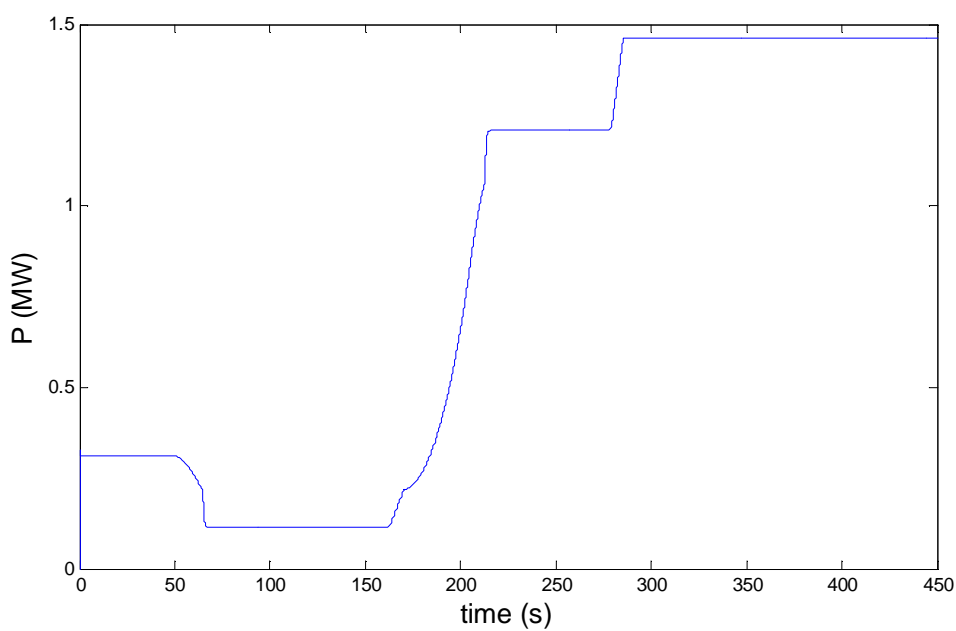
<i>Χρονικό Διάστημα <math>t</math> (s)</i>	<i>Μεταβολή Ταχύτητας Ανέμου (m/s)</i>	<i>Περιοχή Λειτουργίας Α/Γ</i>
0-50	8 m/s – σταθερή	III
50-64	Μείωση	I και I I
64-162	6 m/s – σταθερή	I
162-205	Αύξηση	I, I I και III
205-278	12,5 m/s – σταθερή	III
278-318	Αύξηση	III και IV
318-382	18,5 m/s – σταθερή	IV
382-388	Μείωση	IV
388-450	17,5 m/s – σταθερή	IV

Πίνακας 5.1 Μεταβολές ταχύτητας ανέμου  $V_w$

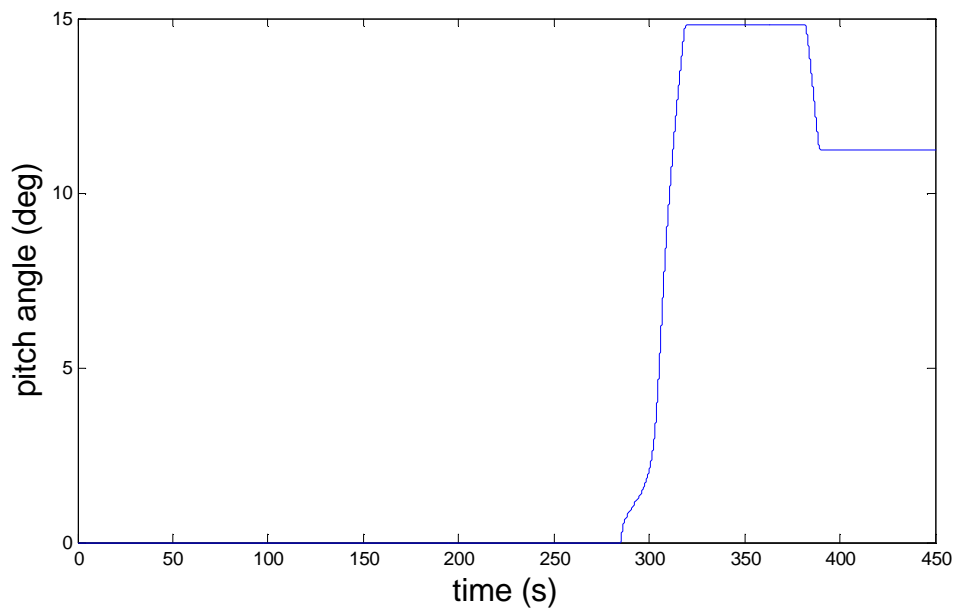
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι αποκρίσεις των βασικών μεγεθών της Α/Γ :



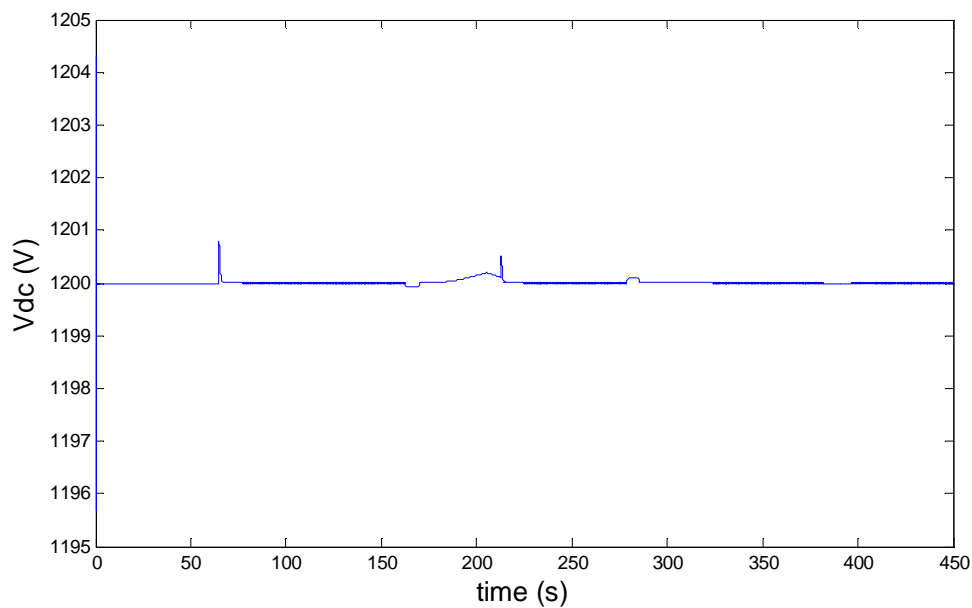
Σχήμα 5.2 Απόκριση ταχύτητας (δρομέα) μηχανής  $wr$  (pu)



Σχήμα 5.3 Απόκριση παραγόμενης ενεργού ισχύος  $P$  (MW)

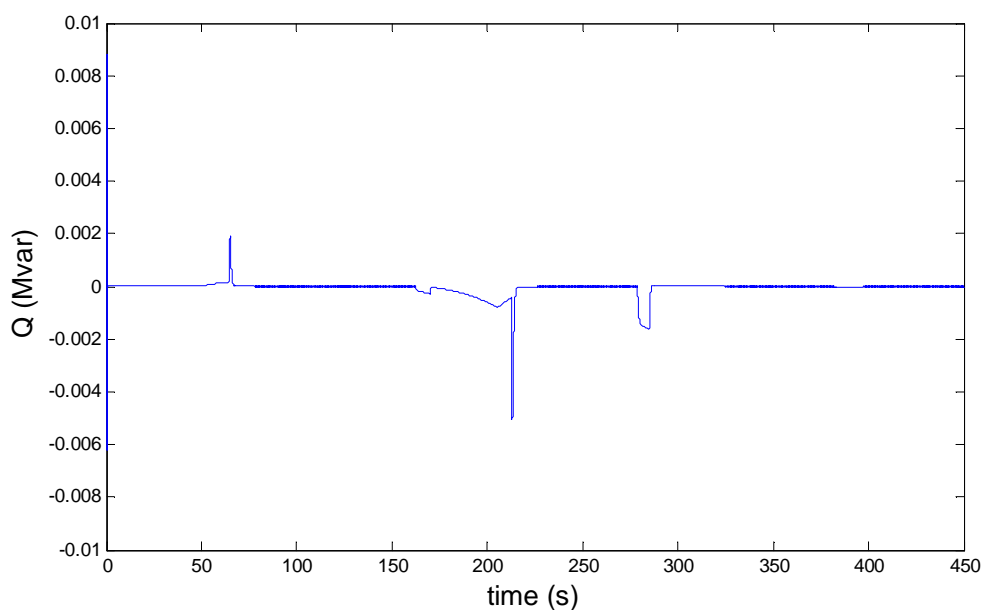


Σχήμα 5.4 Απόκριση γωνίας βήματος κλίσης πτερυγίων  $\beta$  (deg)



Σχήμα 5.5 Απόκριση Vdc (V)





Σχήμα 5.6 Απόκριση παραγόμενης άεργου ισχύος  $Q$  (Mvar)

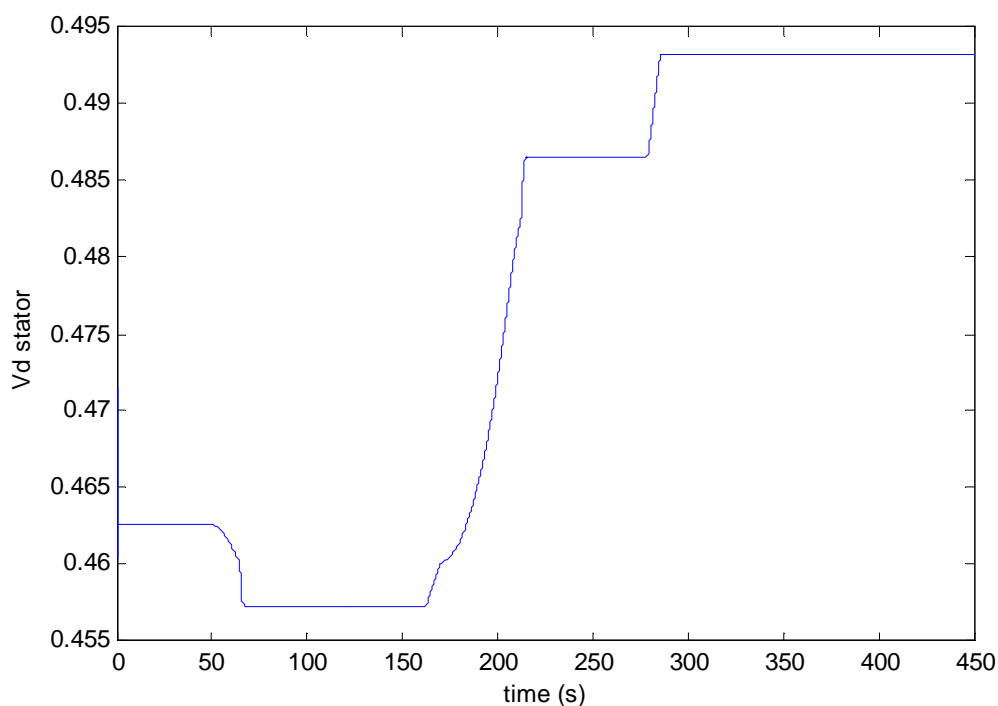
Αρχικά, η ταχύτητα του ανέμου  $V_w$  είναι 8 m/s και σε  $t=50$  s αρχίζει και μειώνεται μέχρι να φτάσει την τιμή των 6 m/s. Σε σταθερή ταχύτητα ανέμου η ταχύτητα της μηχανής  $w_r$  και η παραγόμενη ισχύς  $P$  είναι σταθερές 0,8 αμ και 0,3 MW αντίστοιχα. Καθώς μειώνεται, κάποια χρονική στιγμή φτάνει τα 7,3 m/s (σημείο E) και από εκεί και πέρα έως και τα 6 m/s βρίσκεται στην περιοχή λειτουργίας I. Σε αυτήν την περιοχή η μηχανή περιστρέφεται με σχεδόν σταθερή ταχύτητα, η οποία κυμαίνεται μεταξύ 0,7-0,75 αμ (pu). Όταν η ταχύτητα ανέμου σταθεροποιηθεί στα 6 m/s, ομοίως και η ταχύτητα της μηχανής έχει γίνει σταθερή και ίση με 0,7 αμ (pu). Δηλαδή με μείωση του ανέμου, η ταχύτητα περιστροφής της μηχανής επίσης μειώνεται. Επιπλέον, η παραγόμενη ισχύς, όπως φαίνεται και στο σχήμα, με μείωση του ανέμου μειώνεται.

Στη συνέχεια, η ταχύτητα του ανέμου αυξάνει μέχρι να φτάσει στα 12,5 m/s. Από τα 6 m/s έως και τα 7,3 m/s (σημείο E) η ταχύτητα της μηχανής (και η ισχύς) έχει πολύ μικρή αύξηση (περιοχή λειτουργίας I) ενώ από τα 7,3 m/s έως και τα 12 m/s (σημείο C) η ταχύτητα της μηχανής και η ισχύς αυξάνονται ακολουθώντας τα βέλτιστα (μέγιστα) της καμπύλης ισχύος (περιοχή λειτουργίας II) για κάθε ταχύτητα ανέμου. Από 12 m/s έως 12,5 m/s η A/Γ βρίσκεται στην περιοχή λειτουργίας III όπου η ταχύτητα της μηχανής και η ισχύς αυξάνουν πλησιάζοντας τις ονομαστικές τους τιμές. Η ταχύτητα του ανέμου καθώς αυξάνει από τα 12,5 m/s στα 18,5 m/s, η ταχύτητα της μηχανής και η ισχύς έχουν μια πολύ μικρή αύξηση, μέχρι να φτάσουν τις ονομαστικές τους τιμές 1,22 αμ και 1,5 MW αντίστοιχα, και από εκεί και πέρα κινούνται σταθερά με αυτές τις τιμές ανεξάρτητα από την ταχύτητα του ανέμου. Η μικρή αυτή αύξηση γίνεται μέχρι ταχύτητα ανέμου 13,43 m/s (σημείο F) Αυτό συμβαίνει διότι για ταχύτητα ανέμου 13,43 m/s και μεγαλύτερη, ο έλεγχος πλέον περνάει στον ελεγκτή της γωνίας βήματος (pitch controller) (περιοχή λειτουργίας

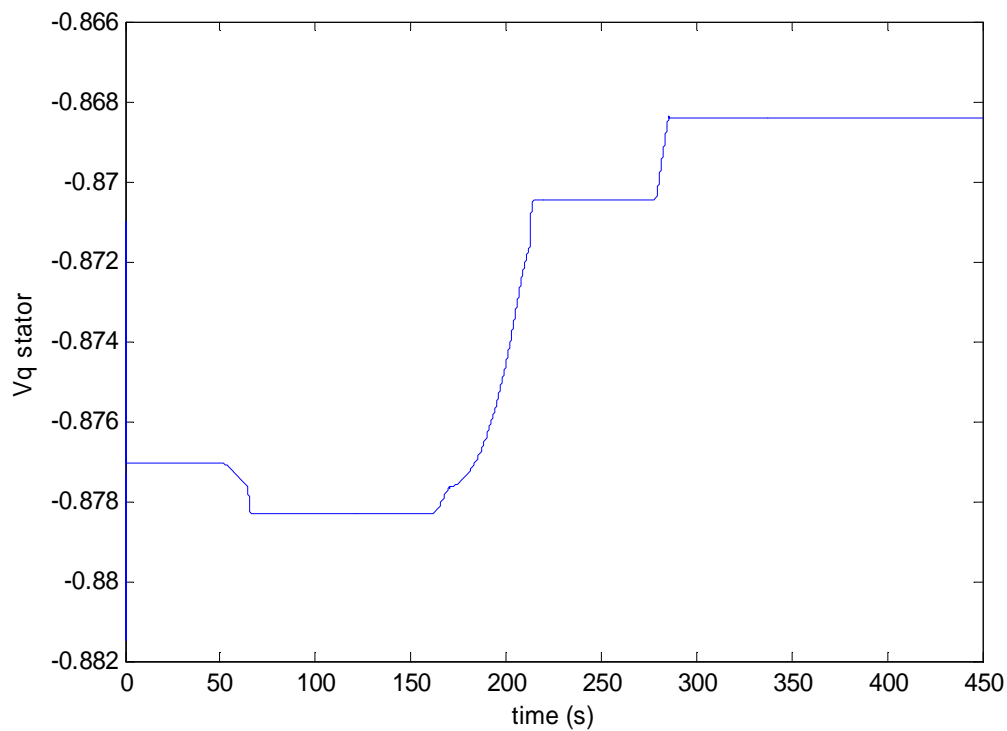
IV). Η γωνία βήματος των πτερυγίων αρχίζει επομένως να μεταβάλλεται από 13,43 m/s (σημείο F) για να διατηρήσει την ισχύ στην μέγιστη τιμή της και η μηχανή περιστρέφεται με την ονομαστική της ταχύτητα. Η γωνία βήματος αρχίζει να αυξάνει και να παίρνει κλίση περίπου 15° όταν ο άνεμος έχει σταθερή ταχύτητα 18,5 m/s. Στη συνέχεια, παρατηρείται μια μικρή μείωση της ταχύτητας του ανέμου από τα 18,5 m/s στα 17,5 m/s. Η ισχύς και η ταχύτητα της μηχανής παραμένουν σταθερές ενώ η γωνία βήματος παρουσιάζει μια μείωση 4°.

Τέλος, σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, η παραγόμενη άεργος ισχύς  $Q$  είναι μηδέν και η σταθερή τάση σύνδεσης  $V_{dc}$  παραμένει σταθερή στα 1200V. Οι όποιες πολύ μικρές μεταβολές παρατηρούνται είναι στιγμιαίες και δεν επηρεάζουν την συνολική απόδοση του συστήματος.

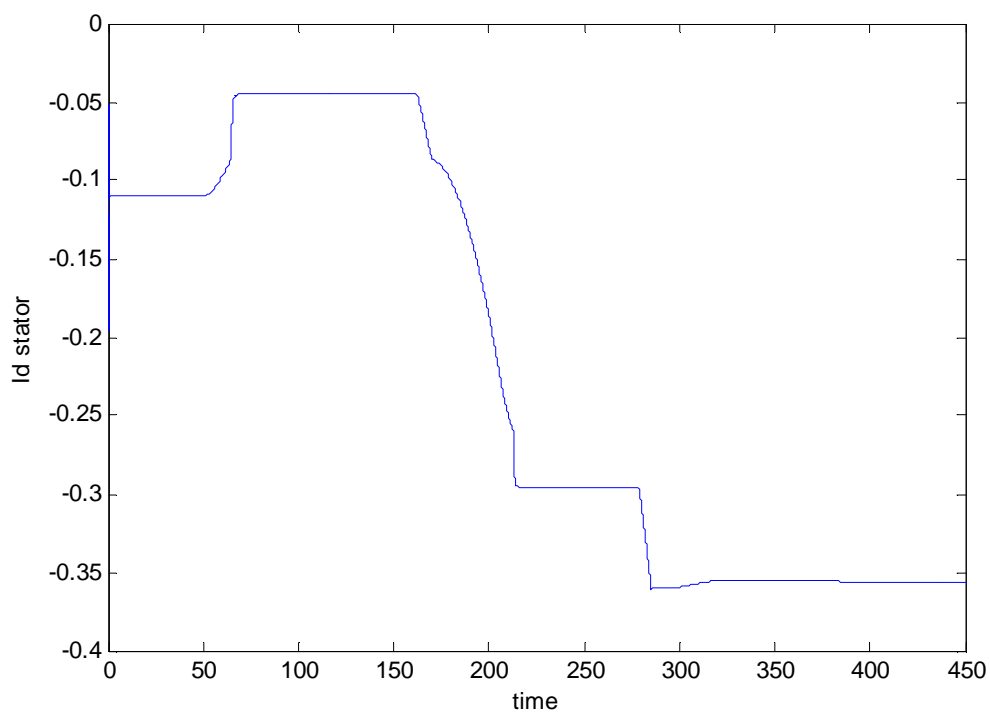
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα των ρευμάτων και τάσεων του στάτη, του δρομέα και του δικτύου καθώς επίσης και οι αποκρίσεις της μηχανικής και ηλεκτρικής ροπής :



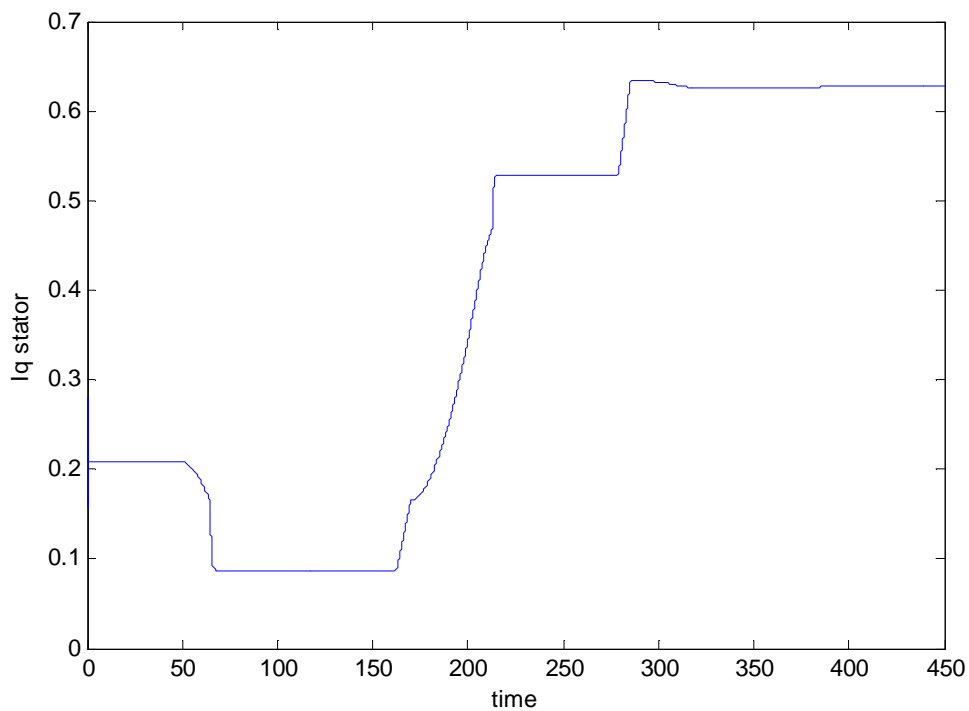
Σχήμα 5.7 Απόκριση τάσης d-άξονα στάτη



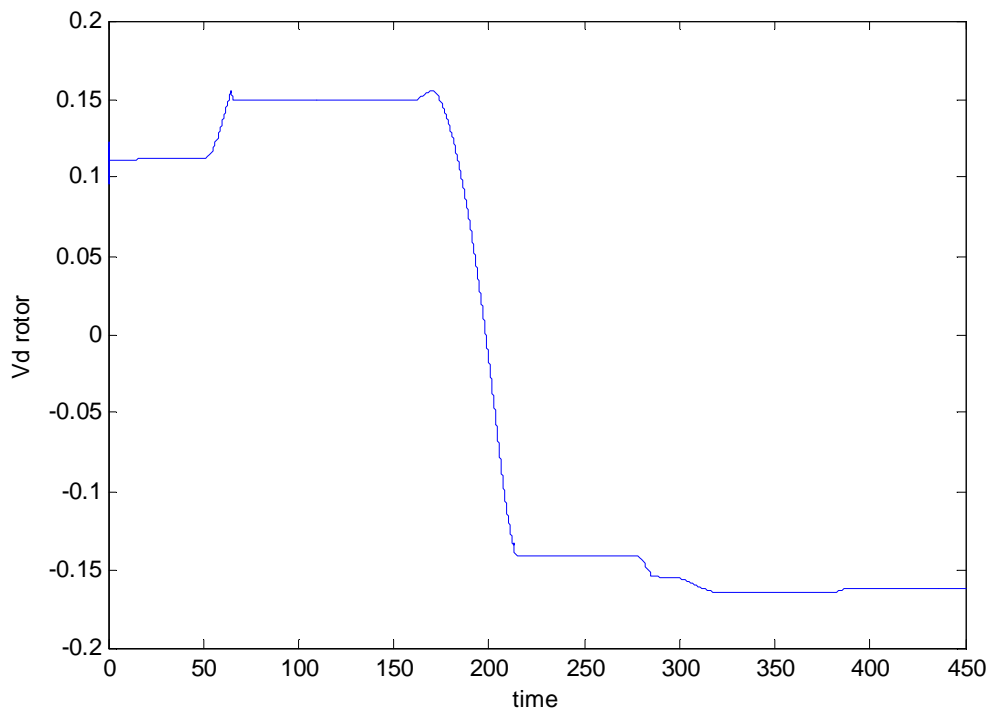
Σχήμα 5.8 Απόκριση τάσης q-άξονα στάτη



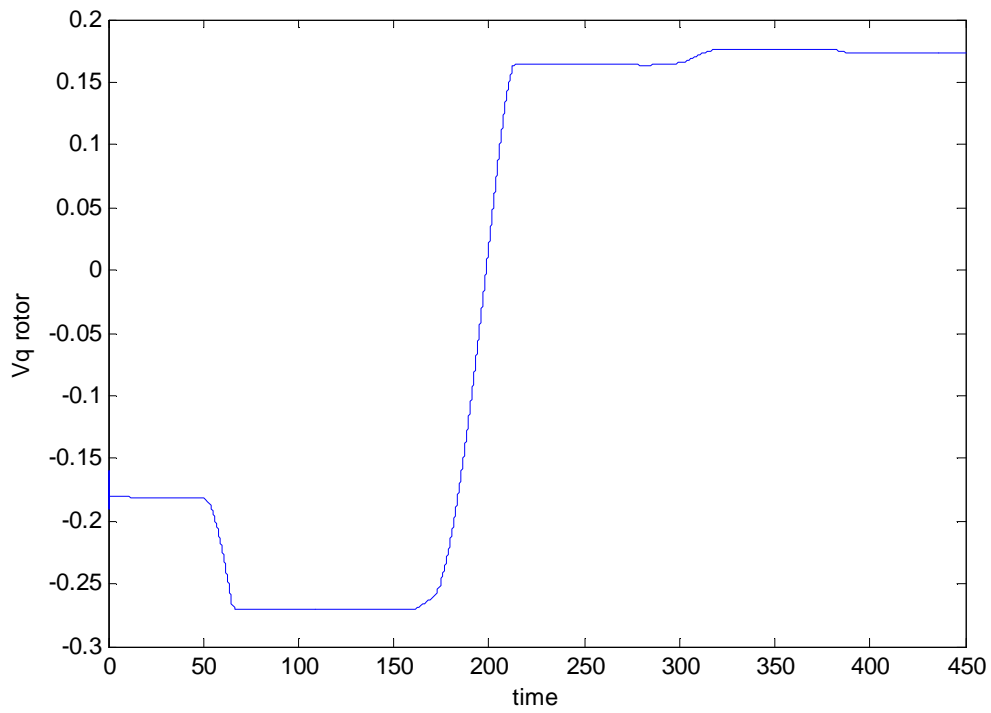
Σχήμα 5.9 Απόκριση ρεύματος d-άξονα στάτη



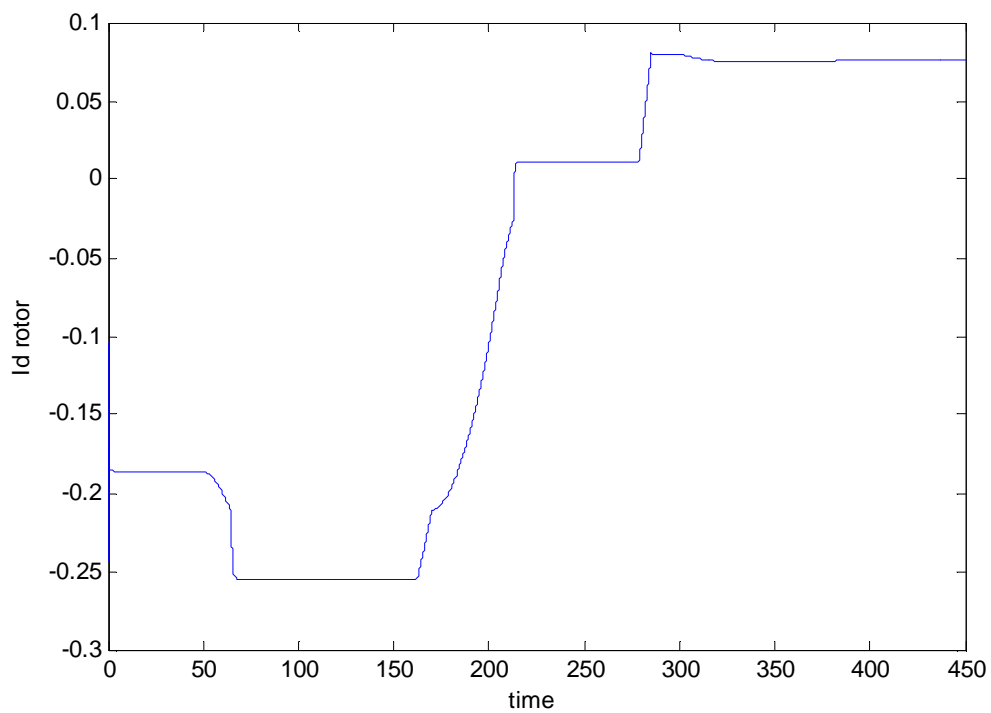
Σχήμα 5.10 Απόκριση ρεύματος q-άξονα στάτη



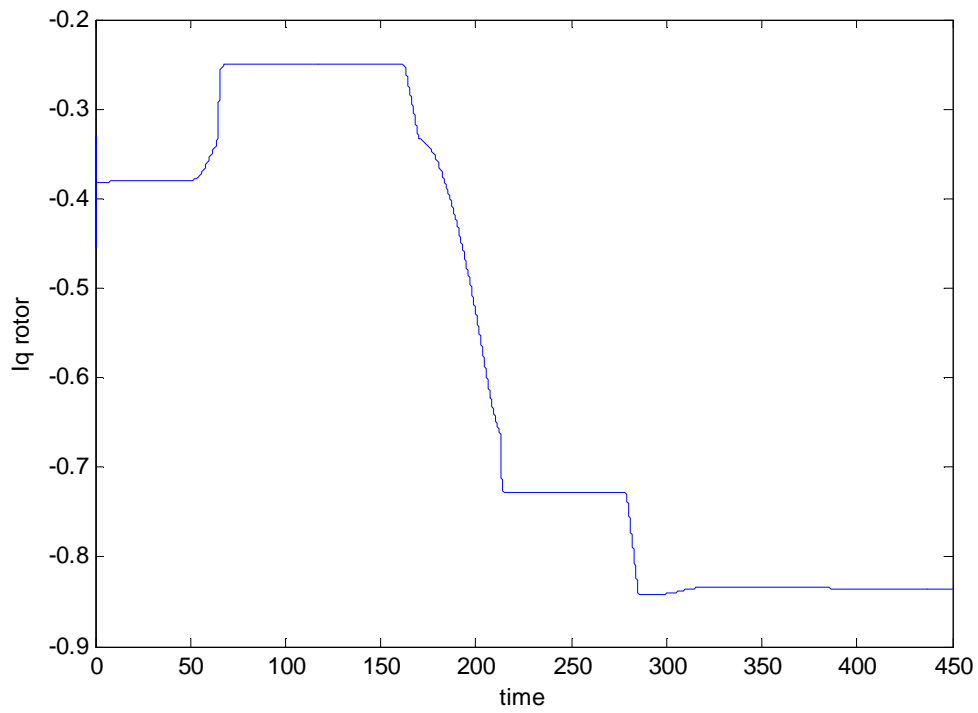
Σχήμα 5.11 Απόκριση τάσης d-άξονα δρομέα



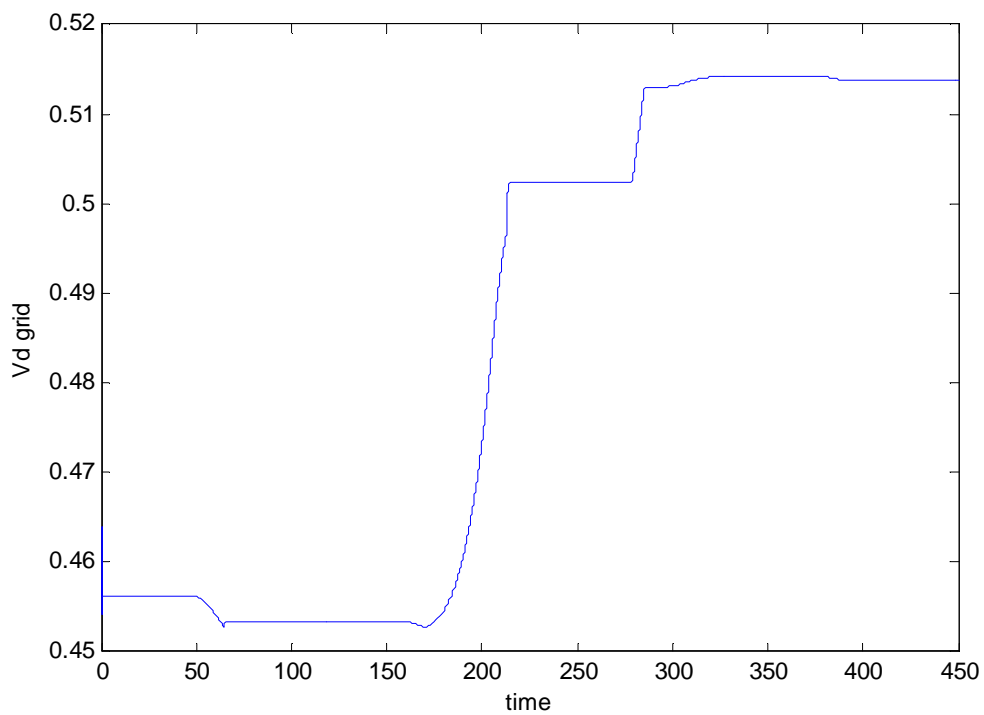
Σχήμα 5.12 Απόκριση τάσης q-άξονα δρομέα



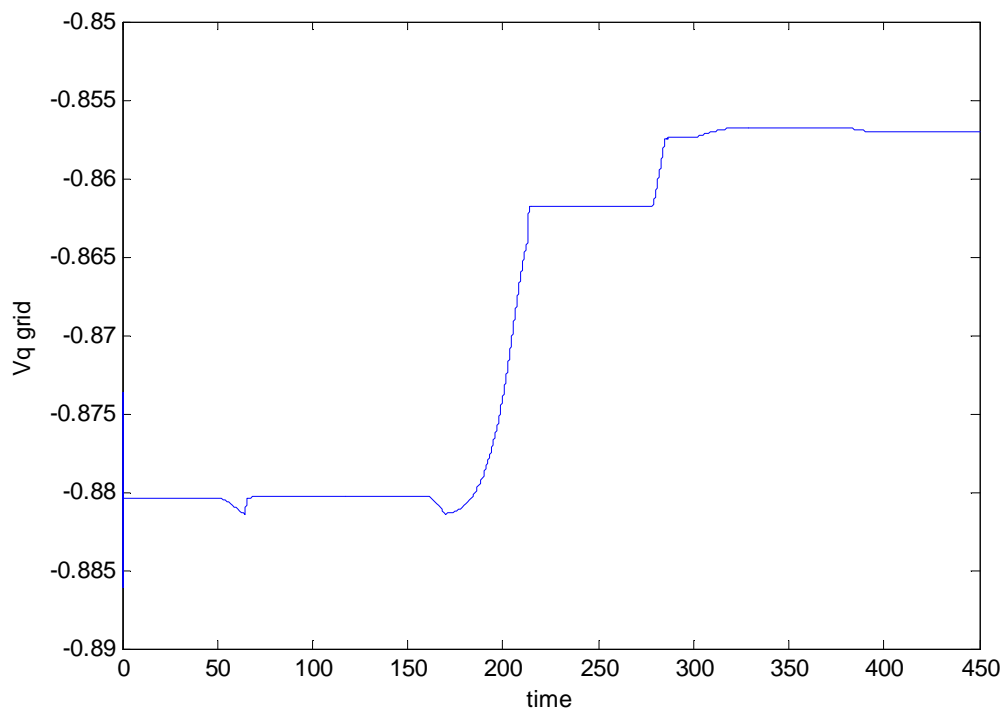
Σχήμα 5.13 Απόκριση ρεύματος d-άξονα δρομέα



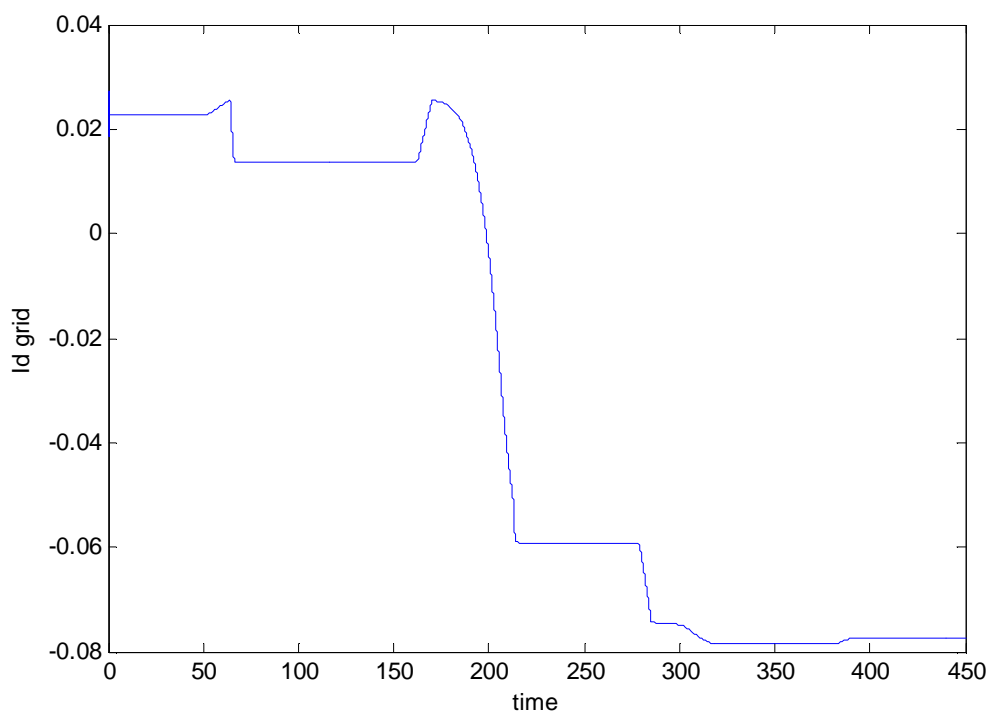
Σχήμα 5.14 Απόκριση ρεύματος q-άξονα δρομέα



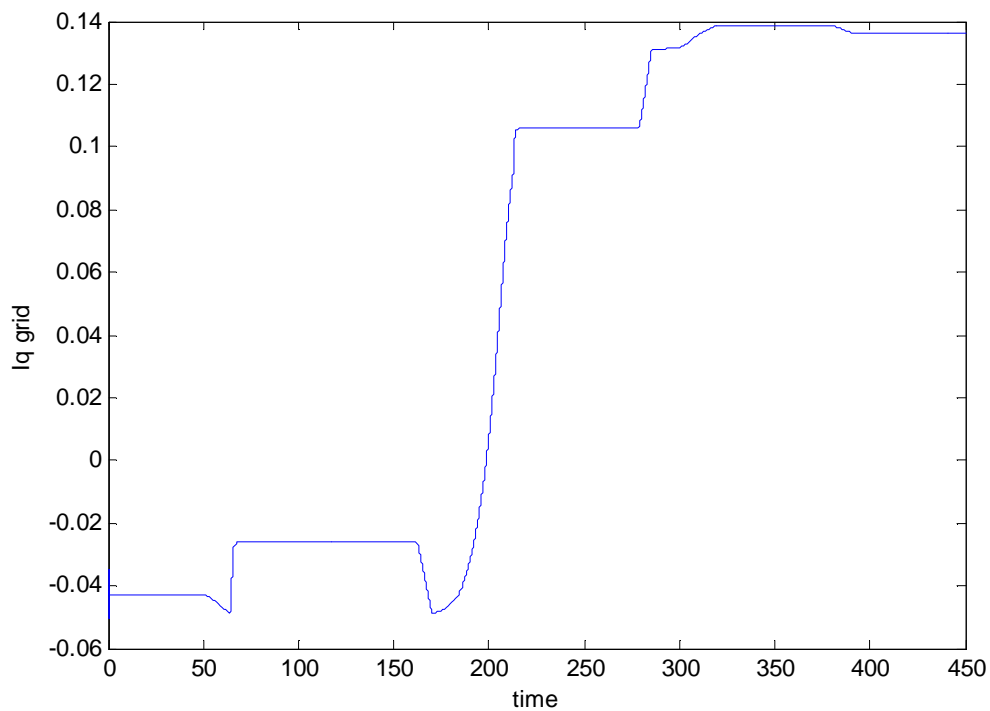
Σχήμα 5.15 Απόκριση τάσης d-άξονα δικτύου



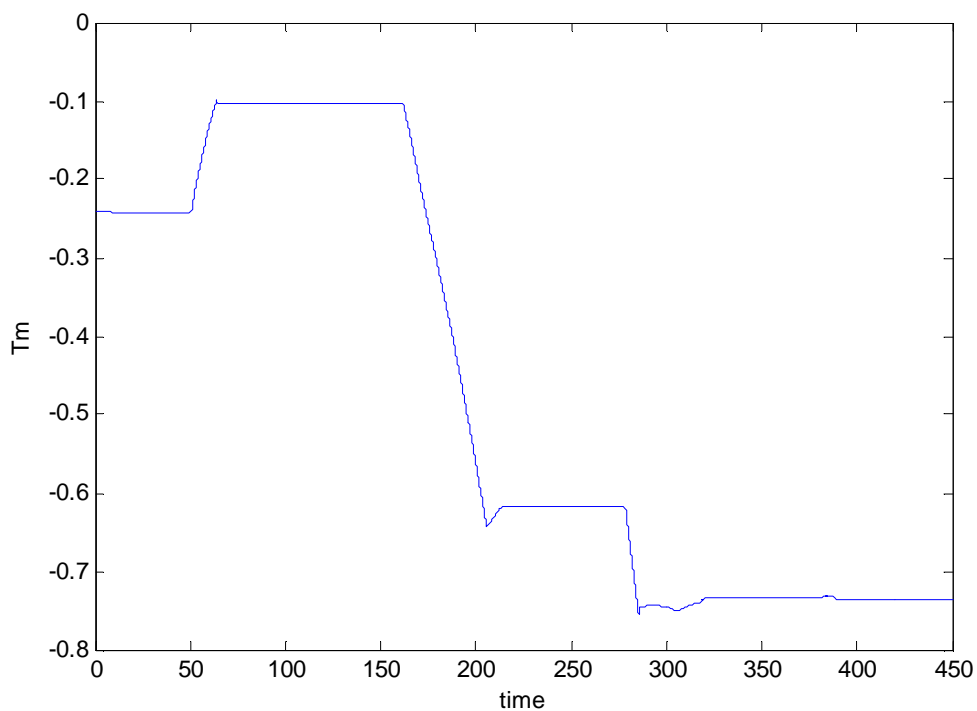
Σχήμα 5.16 Απόκριση τάσης q-άξονα δικτύου



Σχήμα 5.17 Απόκριση ρεύματος d-άξονα δικτύου

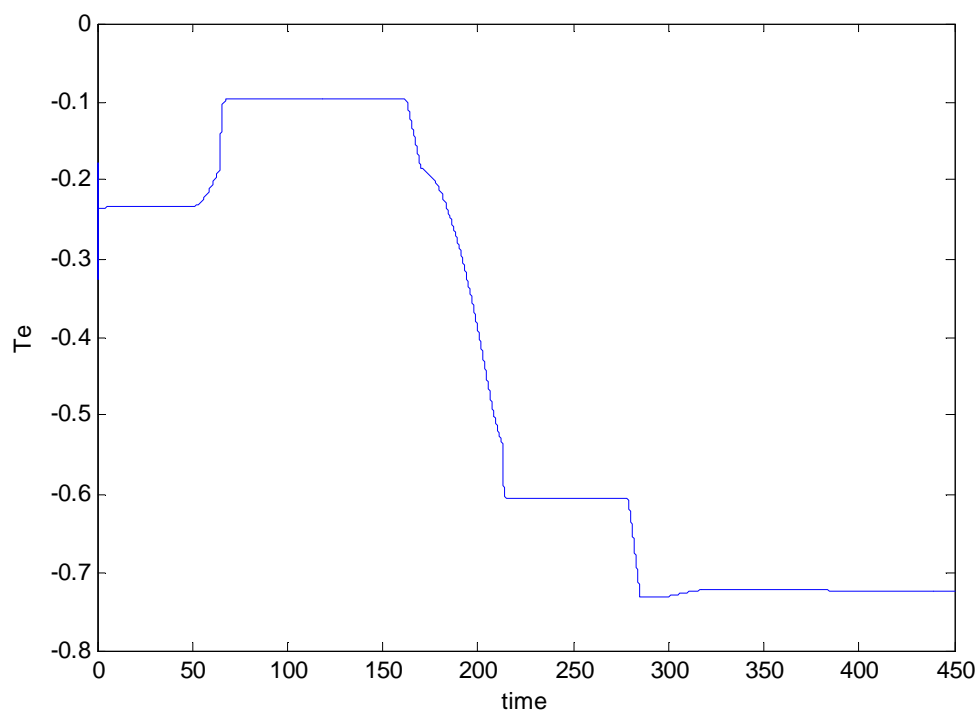


Σχήμα 5.18 Απόκριση ρεύματος q-άξονα δικτύου



Σχήμα 5.19 Απόκριση μηχανικής ροπής



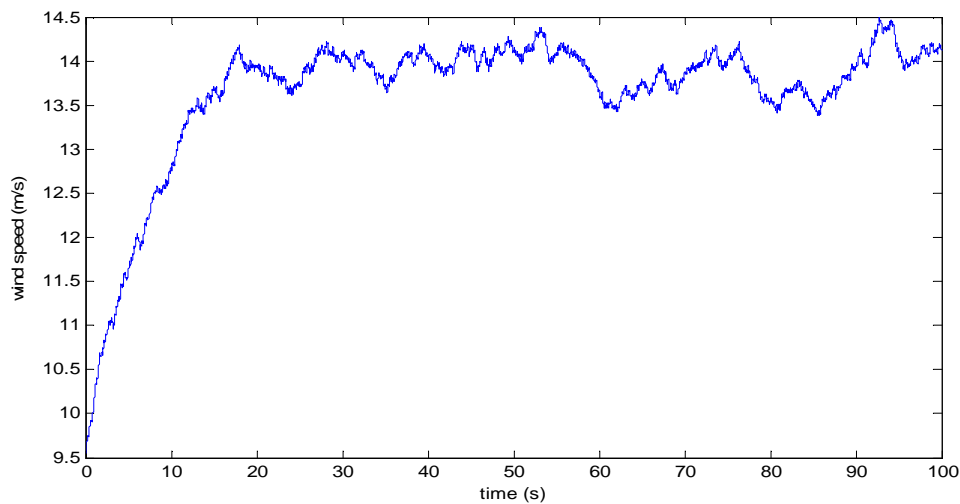


Σχήμα 5.20 Απόκριση ηλεκτρικής ροπής

### 5.2.2 Απόκριση του συστήματος σε μεταβολές (τυχαίες χρονοσειρές) του ανέμου

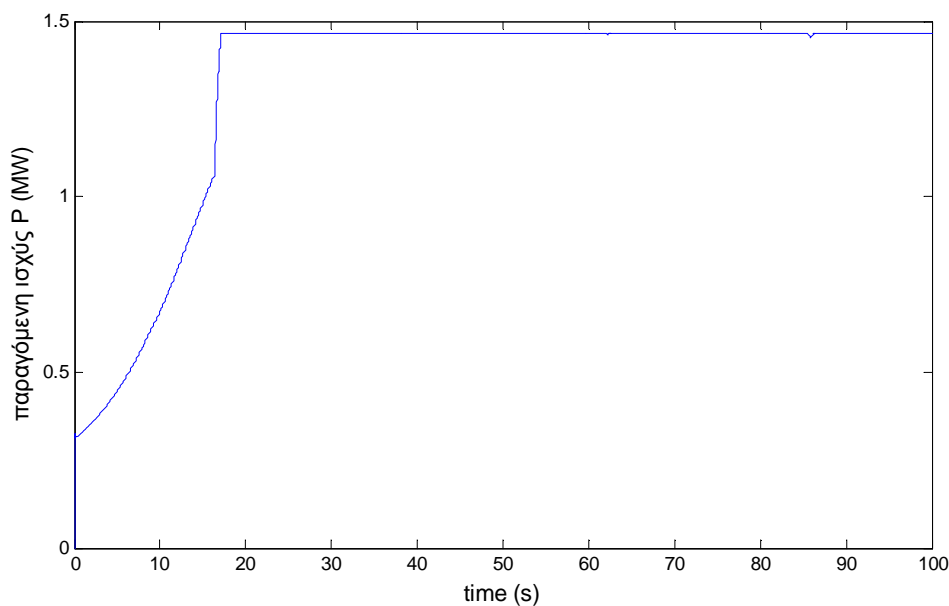
Στα σχεδιαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι αποκρίσεις των βασικών μεγεθών της Α/Γ (παραγόμενη ενεργός (P) και άεργος (Q) ισχύς, γωνιακή ταχύτητα περιστροφής  $\omega_r$  δρομέα της Α/Γ, η συνεχής τάση Vdc και η γωνία αλλαγής κλίσης πτερυγίων ( $\beta$ )).

Η ταχύτητα του ανέμου ακολουθεί τις μεταβολές που παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα 5.21

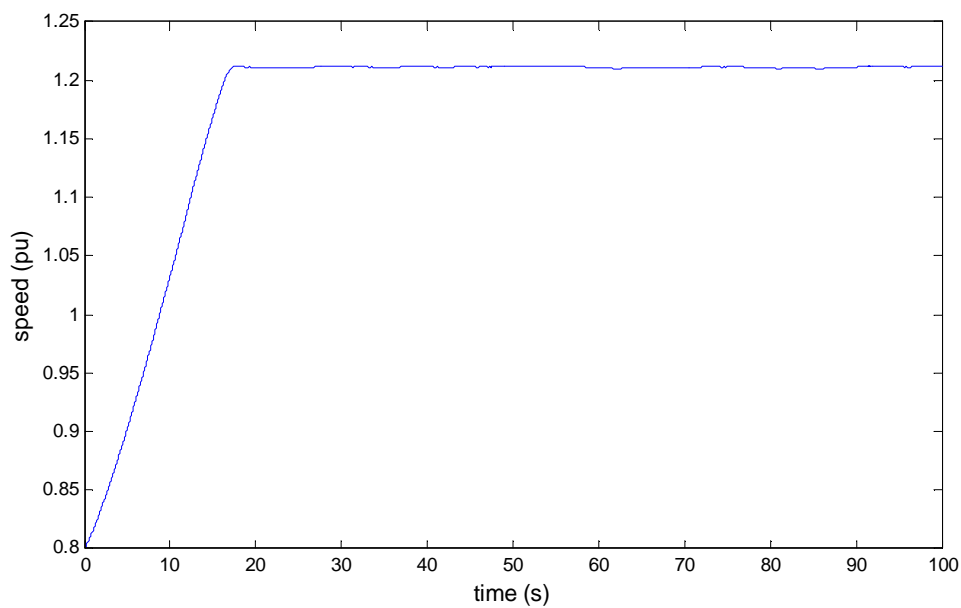


Σχήμα 5.21 Ταχύτητα ανέμου  $V_w$  (m/s)

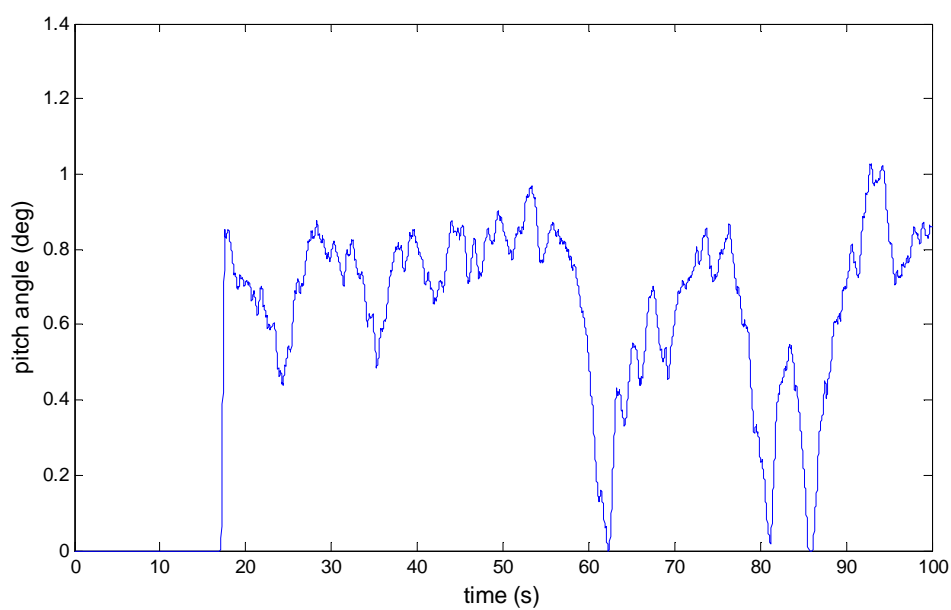
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι αποκρίσεις των βασικών μεγεθών της Α/Γ :



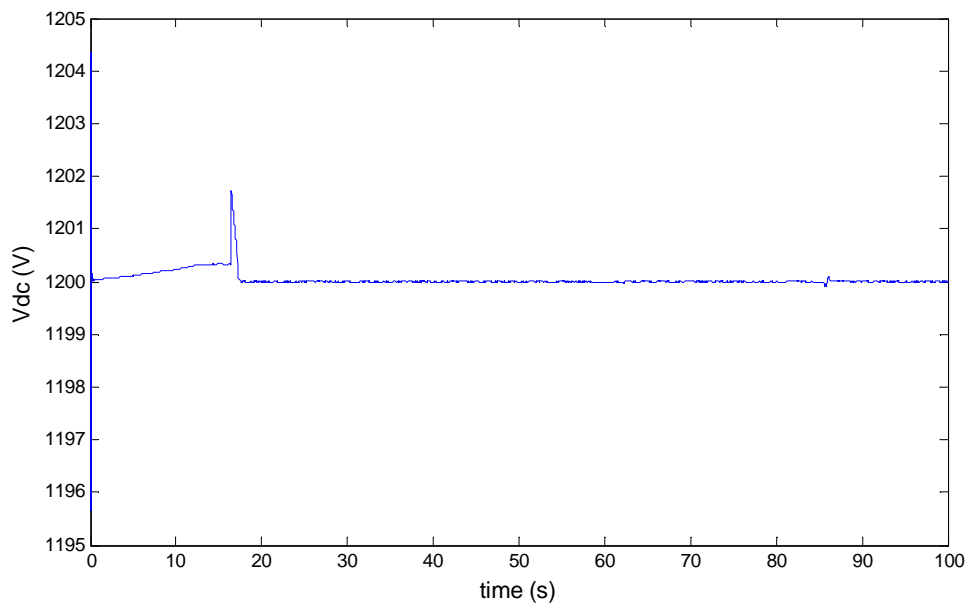
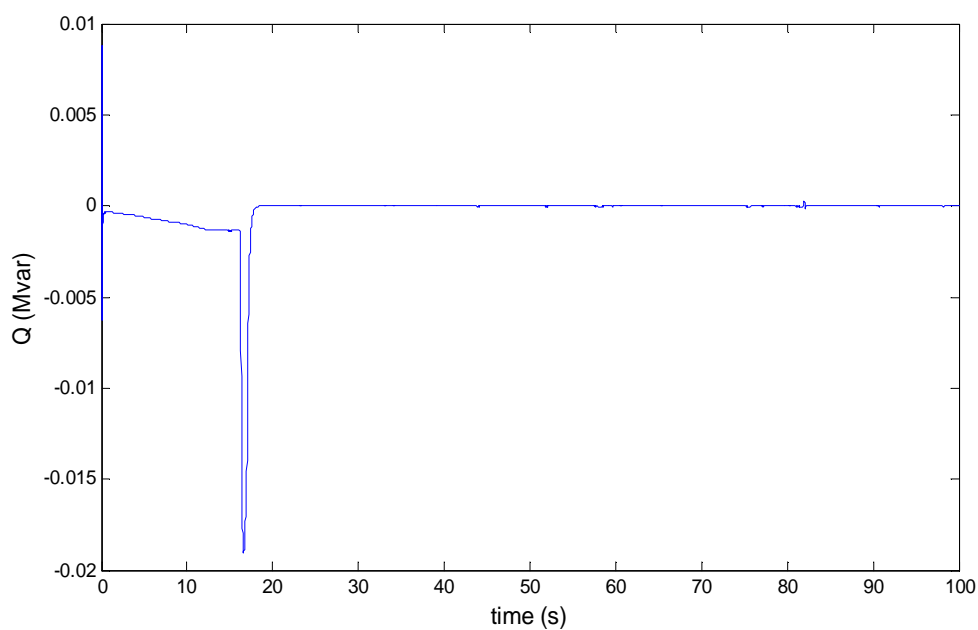
Σχήμα 5.22 Απόκριση παραγόμενης ενεργού ισχύος P (MW)

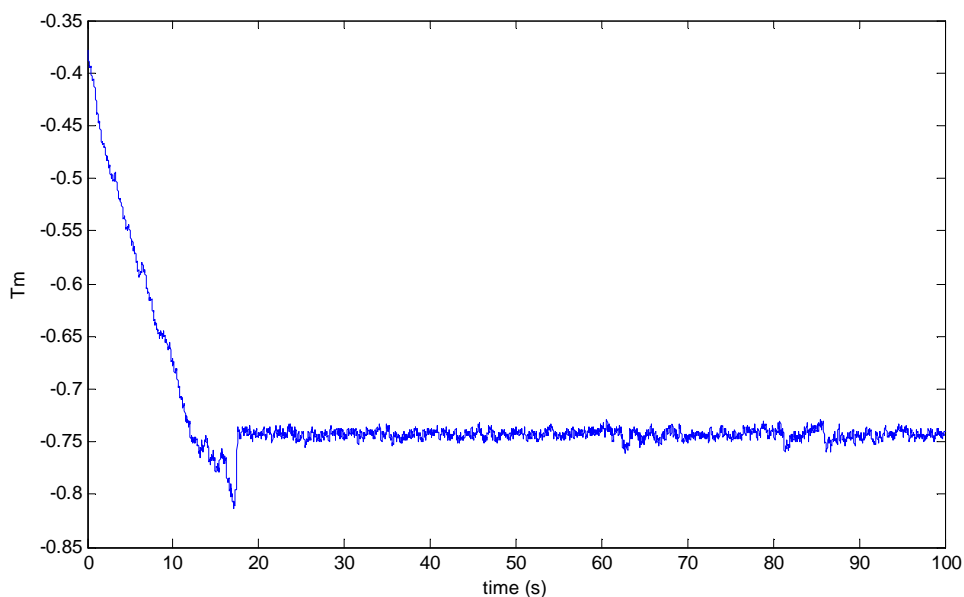


Σχήμα 5.23 Απόκριση ταχύτητας (δρομέα) μηχανής  $w_r$  (pu)

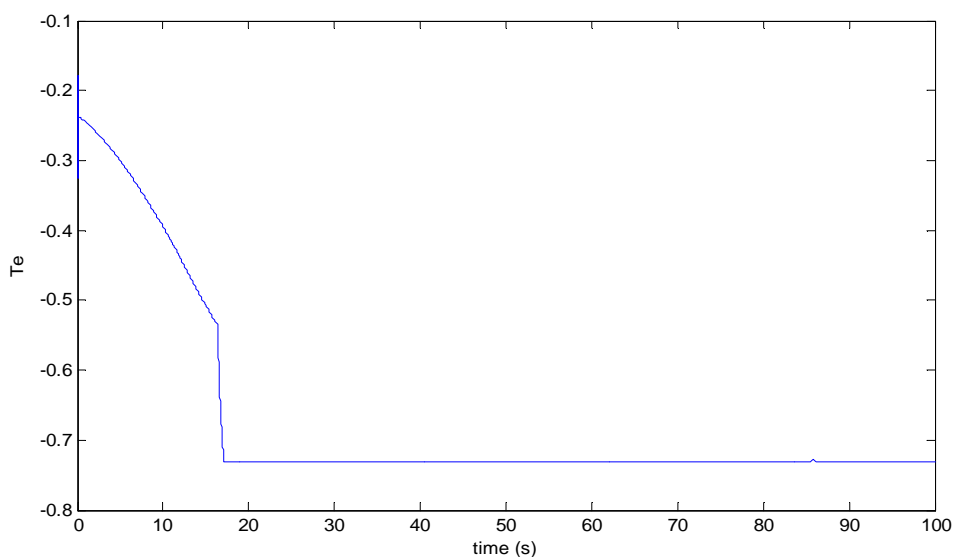


Σχήμα 5.24 Απόκριση γωνίας βήματος κλίσης πτερυγίων  $\beta$  (deg)

Σχήμα 5.25 Απόκριση  $V_{dc}$  (V)Σχήμα 5.26 Απόκριση παραγόμενης άεργου ισχύος  $Q$  (Mvar)



Σχήμα 5.27 Απόκριση μηχανικής ροπής



Σχήμα 5.28 Απόκριση ηλεκτρικής ροπής

Η ταχύτητα του ανέμου παρατηρούμε ότι ξεκινάει από τα 8 m/s και αυξάνει σιγά σιγά σε σχέση με το χρόνο με τυχαίες τιμές. Για  $t=18s$  η ταχύτητα του ανέμου έχει φτάσει στην τιμή των 14m/s. Μετά από αυτό το χρονικό σημείο κυμαίνεται γύρω από την τιμή 14m/s με απόκλιση  $\pm 0.6$  m/s περίπου. Δηλαδή για  $18 \leq t \leq 100$  (s) η ταχύτητα του ανέμου παίρνει τιμές που κυμαίνονται στο εύρος  $13.4 \leq v \leq 14.5$  (m/s). Το εύρος αυτό περιέχει οριακά το σημείο F (ταχύτητα 13,43 m/s) της καμπύλης ισχύος και η A/Γ λειτουργεί στην περιοχή IV. Η μηχανή για  $t=18s$  έχει φτάσει την ονομαστική της ταχύτητα (1,22 pu) και η A/Γ την ονομαστική της ισχύ (1,5 MW) και αυτή τη χρονική στιγμή περίπου ο έλεγχος περνάει στον ελεγκτή βήματος των πτερυγίων (για αυτό και αρχίζει να μεταβάλλεται η κλίση τους, όπως φαίνεται στο διάγραμμα). Στη συνέχεια, η ταχύτητα της μηχανής και η ισχύς κρατούνται σταθερές στις ονομαστικές τους τιμές (αφού η A/Γ λειτουργεί στην περιοχή IV) και το μόνο που μεταβάλλεται είναι η κλίση των πτερυγίων ανάλογα με την ταχύτητα

του ανέμου. Παρατηρούμε επιπλέον ότι όταν ο άνεμος κινείται με 13,43 m/s και κάτω, η κλίση των πτερυγίων μηδενίζεται. Αυτό συμβαίνει τις χρονικές στιγμές  $t=62(s)$  και  $t=87(s)$  περίπου. Τις χρονικές στιγμές αυτές υπάρχει μόνο μια ελάχιστη μεταβολή στην ταχύτητα της μηχανής και την παραγόμενη ισχύ. Επιβεβαιώνεται επομένως ότι το για τιμές ταχύτητας ανέμου πάνω από σημείο F γίνεται έλεγχος κλίσης πτερυγίων ενώ για τιμές ταχύτητας κάτω από σημείο F ακολουθείται η καμπύλη ελέγχου ισχύος. Τέλος, όπως αναμενόταν, σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, η παραγόμενη άεργος ισχύς Q είναι μηδέν και η σταθερή τάση σύνδεσης Vdc παραμένει σταθερή στα 1200V. Οι όποιες πολύ μικρές μεταβολές παρατηρούνται είναι στιγμιαίες και δεν επηρεάζουν την συνολική απόδοση του συστήματος.

### **5.3 Συμπεράσματα**

Στην παρούσα διπλωματική προσομοιώθηκε και μελετήθηκε μια ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης τροφοδοτούμενη από PWM μετατροπείς, με τη βοήθεια του λογισμικού Matlab/Simulink.

Οι εξισώσεις της μηχανής εκφράστηκαν σε dq πλαίσιο με βάση τις γνωστή θεωρία μετασχηματισμών και πλαισίων αναφοράς. Υιοθετήθηκε η μέθοδος του διανυσματικού ελέγχου με κατάλληλα πλαίσια αναφοράς για κάθε έναν από τους δύο μετατροπείς που συνδέονται στο δρομέα της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης.

Έγινε μοντελοποίηση του αεροδυναμικού μέρους της ανεμογεννήτριας και υλοποιήθηκε ο ελεγκτής του βήματος γωνίας των πτερυγίων. Οι παράμετροι του ελεγκτή διαπιστώθηκε ότι επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την απόκριση του αεροδυναμικού μέρους σε μεταβολές του ανέμου.

Υλοποιήθηκε μια συγκεκριμένη στρατηγική ελέγχου της ταχύτητας του δρομέα. Συγκεκριμένα με βάση τη χαρακτηριστική ελέγχου ταχύτητας, η οποία προκύπτει με κριτήρια βελτιστοποίησης της παραγόμενης ισχύος για κάθε ταχύτητα ανέμου μικρότερης της ονομαστικής και την πραγματική τιμή της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα προκύπτει η τιμή αναφοράς για την ηλεκτρική ροπή που αναπτύσσεται. Αυτή με τη σειρά της δίνει την τιμή αναφοράς για τη μία από τις δύο συνιστώσες του ρεύματος του δρομέα Η άεργος ισχύς, από την άλλη πλευρά, που εισέρχεται στο στάτη της μηχανής εξαρτάται από την άλλη συνιστώσα του ρεύματος του δρομέα ( $i_{dr}$ ). Η τιμή αναφοράς της άεργου ισχύος προκύπτει από τον τρόπο ελέγχου του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου. Άρα η γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης είναι σε θέση να μεταβάλλει την άεργο ισχύ που ανταλλάσσει με το δίκτυο και άρα να συμβάλλει στον έλεγχο της τερματικής τάσης. Στις δοκιμές που έγιναν, ο ελεγκτής άεργου ισχύος είχε μοναδιαίο σταθερό συντελεστή ισχύος.

Με κατάλληλη επιλογή του πλαισίου αναφοράς για το μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου εξασφαλίζεται ότι η άεργος ισχύς που ανταλλάσσεται ανάμεσα στο μετατροπέα και το δίκτυο είναι μηδενική. Βασική λειτουργία του μετατροπέα αυτού είναι η διατήρηση της συνεχούς τάσης σε σταθερή τιμή. Οι τιμές των παραμέτρων του ελεγκτή της συνεχούς τάσης καθορίζουν την ποιότητα της απόκρισης του ελεγκτή αυτού. Με βάση τα αποτελέσματα προσομοιώσεων και κριτήριο τις μικρότερες δυνατές διακυμάνσεις της συνεχούς τάσης επιλέχθηκαν οι τιμές των παραμέτρων αυτών.

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται το ευρετήριο σύμβολων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία :

<i>Σύμβολο</i>	<i>Περιγραφή</i>	<i>Μονάδα</i>
Vs	η RMS τάση στάτη	V
Vr	η RMS τάση δρομέα	V
s	ολίσθηση	
N	λόγος ελιγμάτων στάτη-δρομέα	
L,R	επαγωγή και αντίσταση των πηνίων στην πλευρά της παροχής	H, Ω
Va,Vb,Vc	3-φασικές τάσεις τροφοδοσίας	V
Vd,Vq,Vα,Vβ	τάσεις 2 αξόνων dq (περιστρεφόμενο και ακίνητο)	V
Vdc	συνεχής τάση σύνδεσης (dc link voltage)	V
C	χωρητικότητα DC-link	F
Te	ηλεκτρική ροπή γεννήτριας	Nt.m
Tm	μηχανική ροπή γεννήτριας	Nt.m
Pm	μηχανική ισχύς στον άξονα του ανεμοκινητήρα	W
v	ταχύτητα ανέμου	m/s
A	εμβαδόν του κυκλικού δίσκου που διαγράφει η έλικα	m <sup>2</sup>
P	πυκνότητα του αέρα	kg/m <sup>3</sup>
R	ακτίνα έλικας	m
ωr	ταχύτητα περιστροφής της έλικας	rad/s
Cp	αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος	
λ	λόγος ταχυτήτων ακροπτερυγίου / ανέμου	

$\beta$	γωνία βήματος κλίσης πτερυγίων	deg
$\lambda_{opt}$	τιμή του λόγου που μεγιστοποιεί τον αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος	
$\lambda_{qs}, \lambda_{ds}$	συνιστώσες πεπλεγμένης ροής του στάτη	AE
$\omega_r$	γωνιακή ταχύτητα του δρομέα	rad/s
$\theta_r$	γωνιακή θέση του δρομέα	rad
$V_{as}, V_{bs}, V_{cs}$	τάσεις ακροδεκτών γεννήτριας	V
$i_{as}, i_{bs}, i_{cs}$	ρεύματα γραμμής γεννήτριας	A
$V_{qs}, V_{ds}$	τάσεις καθέτου και ευθύ άξονα γεννήτριας	V
$R_s$	αντίσταση στάτη	$\Omega$
$X_{ls}$	σύγχρονη αντίδραση σκέδασης στάτη	$\Omega$
$\lambda_{mq}, \lambda_{md}$	πεπλεγμένη ροή μαγνήτισης	AE
$i_{qs}, i_{ds}$	ρεύματα καθέτου και ευθύ άξονα γεννήτριας	A
$i_{ms}$	ρεύμα μαγνήτισης	A
$L_{lq}, L_{ld}$	αυτεπαγωγές σκέδασης καθέτου και ευθύ άξονα	H
$S$	φαινόμενη ισχύς	VA
$P$	ενεργός ισχύς	W
$Q$	άεργος ισχύς	Var
$p$	αριθμός πόλων	
$P_{mech}$	μηχανική ισχύς	W
$P_{opt}$	βέλτιστη ισχύς	W
$P_{max}$	μέγιστη ισχύς	W
$K_c, K_i, K_e, K_\omega$	κέρδη των ελεγκτών	



## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β**

Στους παρακάτω πίνακες δίνονται τα χαρακτηριστικά της τουρμπίνας, της γεννήτριας επαγωγής και των μετατροπέων που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση :

<b>ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ</b>	
Ισχύς	1.5 MVA
Τάση	575 V
Συχνότητα f	50 Hz
Αντίσταση στάτη $R_s$	0.00706 αμ (pu)
Αυτεπαγωγή τυλίγματος στάτη $L_{ls}$	0.171 αμ (pu)
Αντίσταση δρομέα $R_r'$	0.005 αμ (pu)
Αυτεπαγωγή τυλίγματος στάτη $L_{lr}$	0.156 αμ (pu)
Αμοιβαία επαγωγή $L_m$	2.9 αμ (pu)
Αδράνεια (inertia) H(S)	5.04
Παράγοντας Τριβής (Friction factor)	0.01 αμ (pu)
Πόλοι P	6

<b>ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ</b>	
Μέγιστη ισχύς μετατροπέα	0.5 pu
Συζευγμένη αντίσταση στην πλευρά του δικτύου R	0.15
Συζευγμένη επαγωγή στην πλευρά του δικτύου L	0.15/100
Ονομαστική συνεχής τάση σύνδεσης (DC bus voltage)	1200 V
Χωρητικότητα Dc πυκνωτή	10000 μF

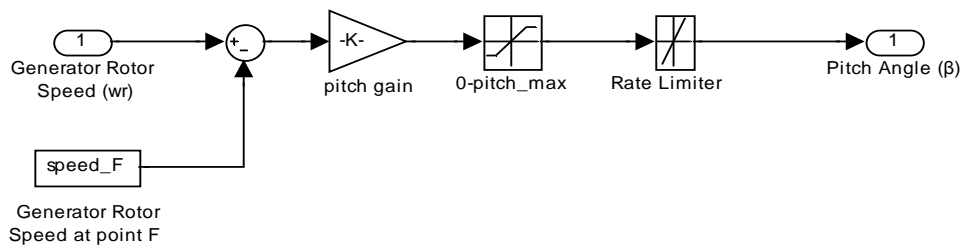
<i><b>ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥΡΜΠΙΝΑΣ</b></i>	
Ονομαστική μηχανική ισχύς εξόδου P	1.5 MW
Κέρδος ελεγκτή γωνίας βήματος πτερυγίων Kp	500
Μέγιστη κλίση γωνίας βήματος	45 deg
Μέγιστη αλλαγή κλίσης γωνίας βήματος	2 deg/s

### **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ**

Παρακάτω δίνονται διάφορα μοντέλα προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν.

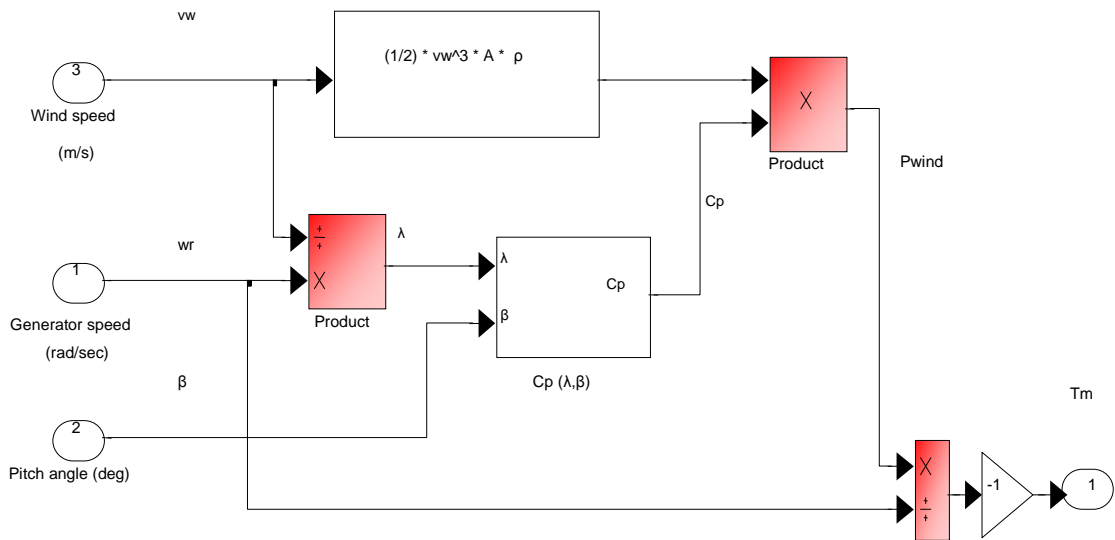
#### *Μοντέλο προσομοίωσης ελεγκτή βήματος κλίσης των πτερυγίων*

Το σύστημα του ελεγκτή βήματος κλίσης των πτερυγίων φαίνεται στο σχήμα :

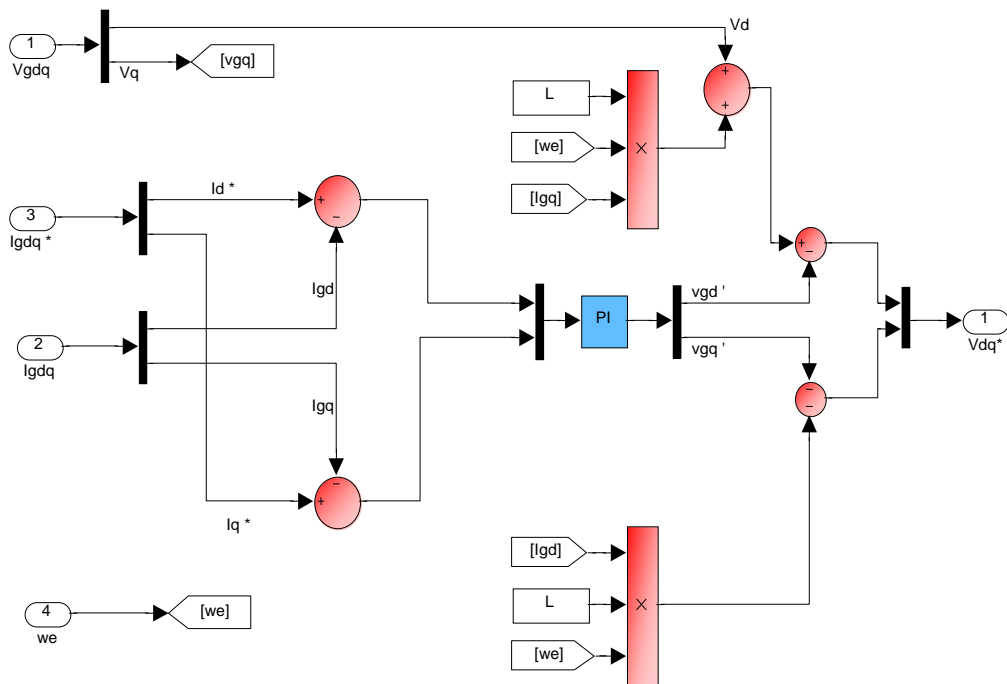


### Μοντέλο προσομοίωσης της Α/Γ

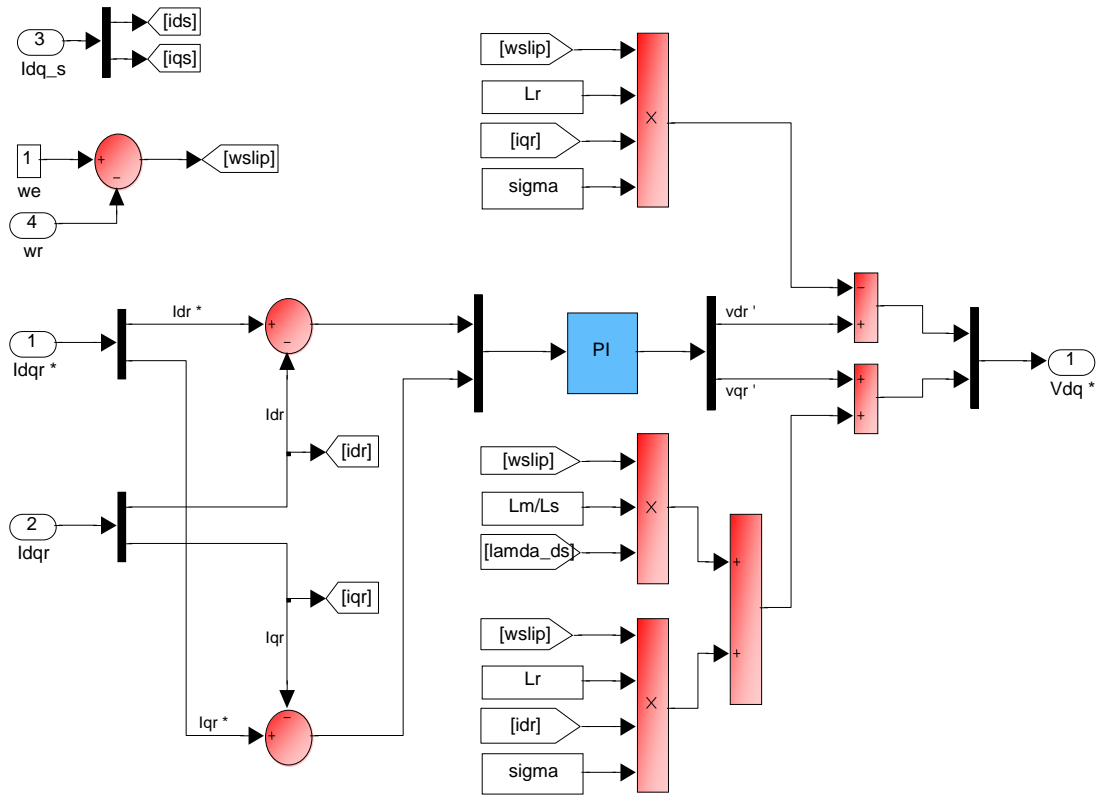
Το μοντέλο προσομοίωσης της Α/Γ παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα . Οι είσοδοι στο μοντέλο είναι : η ταχύτητα της γεννήτριας, η γωνία βήματος των πτερυγίων και η ταχύτητα του ανέμου. Η έξοδος είναι η ροπή που εφαρμόζεται στον άξονα της γεννήτριας.



### Μοντέλο προσομοίωσης διαχωρισμού ρευμάτων στην μεριά του στάτη



*Μοντέλο προσομοίωσης διαχωρισμού ρευμάτων στην μεριά του δρομέα*



## **BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΑΝΑΦΟΡΕΣ**

- [1] R. Pena, J. C. Clare, and G. M. Asher, “*Doubly fed induction generator using back-to- back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation*”, IEE Proc. Electr. Power Appl., vol. 143, pp. 231–241, May 1996.
- [2] A. Petersson, PhD. “*Analysis, Modelling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines*”, Division of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden 2005.
- [3] Μαρία-Παρασκευή Ιωαννίδου, *Συστήματα Ελέγχου Ηλεκτρικών Μηχανών*, ΕΜΠ, 2008
- [4] J. G. Slootweg, H. Polinder, and W.L. Kling, “*Dynamic modelling of a wind turbine with doubly fed induction generator*”, presented at the IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vancouver, Canada, 15th-19th July 2001.
- [5] Anca D. Hansen, Florin Iov, Poul Sørensen, Frede Blaabjerg “*Overall control strategy of variable speed doubly-fed induction generator wind turbine*” NORDIC WIND POWER CONFERENCE, 1-2 MARCH, 2004, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
- [6] Andrzej M. Trzynadlowski, *The Field Orientation Principle in Control of Induction Motors*, Kluwer Academic Publisher, 2000
- [7] P.C. Krause, *Analysis of electric machinery*, McGraw-Hill, 1986
- [8] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, and E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*. John Wiley & Sons, Ltd, 2001.
- [9] *Wind Turbine Control Systems*, Fernando D. Bianchi, Hernan De Battista and Ricardo J. Mantz © Springer-Verlag London Limited 2007
- [10] Rajib Datta and V. T. Ranganathan, “*Variable-speed wind power generation using doubly fed wound rotor induction machine-a comparison with alternative schemes*,” IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 17, no. 3, pp. 414–421, Sept. 2002.
- [11] M. G. Ioannides, *State space formulation and transient stability of the double output asynchronous generator*, IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 8, No. 4, 1993, pp. 732-738.
- [12] “*Control of Variable-Speed Drives*”. Vasteras, Sweden: Department of Electronics, Malardalen University, 2002.
- [13] W. Leonhard, *Control of Electrical Drives*, 2nd ed. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1996.
- [14] N. Mohan, T. Undeland, and W. Robbins, “*Power Electronics Converter, Applications and Design*.” New York, USA: John Wiley & Sons, 1995.
- [15] R. Ottersten, “*Vector control of a double-sided PWM converter and induction machine drive*,” Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, Licentiate Thesis 368L, Dec. 2000

- [16] Jamal A. Baroudi, Venkata Dinavahi, Andrew M. Knight “A review of power converter topologies for wind generators”
- [17] J. G. Sloopweg, S. W. H. de Haan, H. Polinder, W. L. Kling, “Modelling Wind Turbines in Power System Dynamic Simulations”, Proceedings of the IEEE PES Summer Meeting, Vancouver, July 15-19, v.1
- [18] Florin Iov, Anca Daniela Hansen, Clemens Jauch, Poul Sørensen, Frede Blaabjerg , “Advanced Tools for Modelling, Design and Optimization of Wind Turbine Systems“, Nordic Wind Power Conference, 1-2 March, 2004, Chalmers University Of Technology
- [19] Ion Boldea, “Variable speed generators”, Taylor & Francis Group, LLC, 2006
- [20] ROLF OTTERSTEN, “Vector Control of a Double-Sided PWM Converter and Induction Machine Drive” Department of Electric Power Engineering Chalmers University Of Technology Goteborg, Sweden 2000
- [21] Donald W. Novotny and Thomas A. Lipo, *Vector Control and Dynamics of AC Drives*, Clarendon Press, Oxford, 1998.
- [22] Wind Turbine Blockset in Matlab/Simulink General Overview and Description of the Models
- [23] J. A. Santisteban, R. M. Stephan, *Vector Control Methods for Induction Machines: An Overview*, IEEE Transactions on Education, Vol. 44, No 2, May 2001.
- [24] J. Chiasson, *Modelling and High Performance Control of Electric Machines*, IEEE Press-Wiley, 2005.
- [25] V. Akhmatov, PhD. “Thesis Analysis of dynamic behaviour of electric power systems with large amount of wind power”, Electric Power Engineering, Orsted-DTU, Technical University of Denmark, April 2003.
- [26] V. Akhmatov, *Variable speed wind turbines with doubly-fed induction generators, Part I Modelling in dynamic simulation tools*, Wind Engineering, vol.26, no.2, pp.85-108, 2002
- [27] Ετήσια Έκθεση Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ), 2006  
<http://www.cres.gr/kape/publications/download.htm>
- [28] [http://gym-platan.chan.sch.gr/prj\\_techn\\_main.htm](http://gym-platan.chan.sch.gr/prj_techn_main.htm)