



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών  
και Μηχανικών Υπολογιστών  
Τομέας Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων  
και Συστημάτων Αποφάσεων

## Πειραματική Διερεύνηση Δυνατοτήτων Λειτουργίας Γεννήτριας Επαγωγής Διπλής Εξόδου Για Αιολικά Συστήματα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Κ. Ιωάννου

Επιβλέπων : Μαρία Γ. Ιωαννίδου, Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούνιος 2009





Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών  
και Μηχανικών Υπολογιστών  
Τομέας Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και  
Συστημάτων Αποφάσεων

## Πειραματική Διερεύνηση Δυνατοτήτων Λειτουργίας Γεννήτριας Επαγωγής Διπλής Εξόδου Για Αιολικά Συστήματα

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Κ. Ιωάννου

**Επιβλέπων :** Μαρία Γ. Ιωαννίδου, Καθηγήτρια ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ...<sup>η</sup> Ιουνίου 2009.

.....  
Ιωαννίδου Μαρία  
Καθηγήτρια ΕΜΠ

.....  
Περικλής Μπούρκας  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Κωνσταντίνος Καραγιαννόπουλος  
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούνιος 2009

.....

Δημήτριος Κ. Ιωάννου

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

Copyright © Δημήτριος Κ. Ιωάννου

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.

## Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό επιθυμώ να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στην κ. Μαρία Ιωαννίδου καθηγήτρια ΕΜΠ, για την εμπιστοσύνη που μου έδωσε στην ανάθεση του θέματος, την επιστημονική της καθοδήγηση, την ευχάριστη συνεργασία και πολύπλευρη συμπαράστασή της σ' ολόκληρη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής. Επίσης θέλω να ευχαριστήσω των δασκαλό μου κ. Γεώργιο Λάμπρου καθηγητή φυσικής, χωρίς την επιμονή και το ιδιαίτερο ενδιαφέρον του οποίου, δεν θα είχα καταφέρει εξ αρχής να εισαχθώ στο ΕΜΠ.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω τους δικούς μου ανθρώπους, την οικογένεια μου που με στηρίζει ηθικά αλλά και οικονομικά όλα αυτά τα χρόνια.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται λόγος για την ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ιδιαίτερα της ενέργειας που παράγεται από τον άνεμο. Συγκεκριμένα διερευνάται η περίπτωση της ανεμογεννήτριας η οποία διαθέτει επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδότησης.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια γενική αναφορά στο περιβαλλοντικό πρόβλημα που αντιμετωπίζει σήμερα ο πλανήτης. Πρόβλημα το οποίο προέρχεται από τις ανεπτυγμένα βιο μηχανικά χώρες, πλήττει όμως ο πλανήτης, και ιδιαίτερα τις μη ανεπτυγμένες χώρες. Σήμερα καταβάλλονται προσπάθειες για την αντιμετώπιση του φαινομένου σε πολλά επίπεδα. Αφού γίνει αναφορά στο πρωτόκολλο του Κιότο και στις προσπάθειες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, εστιάζουμε στην κατεύθυνση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ευρώπη και στην Ελλάδα.

Αμέσως μετά στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στην επαγωγική μηχανή γενικά, αφού εισαχθεί η γενική θεωρία, επικεντρώνουμε στην επαγωγική γεννήτρια και πιο συγκεκριμένα στην επαγωγική γεννήτρια διπλής εξόδου (ΕΓΔΕ) η οποία και διερευνάται.

Στη συνέχεια αναφερόμαστε στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού. Αρχικά θα γίνει μια εισαγωγή στη γενική θεωρία του ανέμου και των ανεμογεννητριών, μετά από μια σύντομη αναφορά στα αιολικά πάρκα θα επικεντρωθούμε στις ανεμογεννήτριες οι οποίες φέρουν επαγωγική γεννήτρια διπλής εξόδου (ΕΓΔΕ).

Τέλος ακολουθεί το πειραματικό μέρος της εργασίας, το οποίο περιλαμβάνει τη εγκατάσταση ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος ο οποίος συνδέεται μηχανικά με επαγωγική γεννήτρια με τυλιγμένο δρομέα. Στις δυο μηχανές συνδέονται όργανα για την καταγραφή των ηλεκτρικών μεγεθών. Αρχικά γίνονται μετρήσεις κενού φορτίου στην επαγωγική γεννήτρια και στη συνέχεια με φορτίο. Από τις καταγραμμένες μετρήσεις δημιουργούμε γραφικές παραστάσεις για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με εύρος λειτουργίας σε διάφορες ταχύτητες ανέμου, την απόδοση και την εξοικονόμηση ενέργειας στα αιολικά συστήματα που χρησιμοποιούν επαγωγικές γεννήτριες διπλής τροφοδότησης.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αιολική ενέργεια, ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών, επαγωγική γεννήτρια διπλής εξόδου (ΕΓΔΕ), πειραματική διερεύνηση ΕΓΔΕ

## **ABSTRACT**

This diploma thesis dissertation refers to the deployment of renewable energy, particularly to the energy produced by wind. Especially, we investigate the case of wind generator which uses a double output induction generator.

The first chapter is a general reference to the environmental problem that the world faces nowadays. Although the problem originates from the developed industrial countries, it affects the whole world, especially the undeveloped countries. Today, many efforts are being made in order to tackle the phenomenon on various levels. After making an initial reference to the Kyoto Protocol and the European Union' efforts, we focus on the future directions of renewable energy in Europe and Greece.

In the second chapter we firstly introduce the induction machine along with the general theory, focusing then on the induction generator and more particularly on the double output induction generator (DOIG) which is mainly used in this diploma thesis.

In the next section, we refer to the generation of electricity from the wind farm capacity. Initially, there will be a general introduction to the theory of wind and wind generators and then, after a brief reference to wind farms, we will focus on wind turbines using dual output induction generator (DOIG).

Finally, we present our experimental work, where a DC motor is connected mechanically with an induction generator with rotor wound. Both two machines are connected to electrical instruments for the measurements of electrical quantities. Initial measurements made first without load and following with 135  $\Omega$  load the induction generator. Using the recorded measurements, we draw graphs to extract conclusions about the performance and energy saving in systems using inductive wind generators of dual supply.

## **KEY WORDS**

Renewable energy, wind power, variable speed wind turbine, double output induction generator (DOIG), experimental investigation DOIG

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

### **1<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ- ΣΤΡΟΦΗ ΠΡΟΣ ΑΠΕ**

<b>1.1 Η ιστορική εξέλιξη της χρήσης των ενεργειακών πηγών .....</b>	<b>13</b>
<b>1.2 Οι ενεργειακές τάσεις σήμερα και οι επιπτώσεις τους</b>	
– Κλιματικές αλλαγές .....	17
1.2.1 Επιπτώσει .....	18
1.2.1.1 Το φαινόμενο του θερμοκηπίου .....	18
1.2.1.2 Ατμοσφαιρική ρύπανση .....	22
1.2.1.3 Κίνδυνοι ασφαλείας .....	22
1.2.1.4 Υψηλά κόστη ενεργειακών επενδύσεων .....	22
1.2.1.5 Μείωση και εξάντληση των παραδοσιακών ενεργειακών πηγών .....	23
1.2.1.6 Άνιση κατανομή.....	23
<b>1.3 Αντιμετώπιση του προβλήματος - Διεθνείς συμφωνίες .....</b>	<b>24</b>
1.3.1 Πρακτικές αντιμετώπισης του φαινομένου .....	24
1.3.1.1 Το πρωτόκολλο του Κιότο.....	26
1.3.1.2 Πράσινη βίβλος .....	29
<b>1.4 Εκτίμηση του κόστους και των πλεονεκτημάτων ΑΠΕ .....</b>	<b>30</b>
<b>1.5 Γενικά για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας .....</b>	<b>31</b>
1.5.1 Τα πλεονεκτήματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας .....	32
<b>1.6 Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση .....</b>	<b>34</b>
<b>1.7 Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στην Ελλάδα .....</b>	<b>36</b>
1.7.1 Αναλυτικά τα δεδομένα .....	37
1.7.1.1 Η αιολική ενέργεια .....	37
1.7.1.2 Φωτοβολταϊκά συστήματα .....	38
1.7.1.3 Υδροηλεκτρικά .....	40
1.7.1.4 Γεωθερμική ενέργεια .....	40
1.7.1.5 Αξιοποίηση της βιομάζας .....	41
1.7.1.6 Θερμικά ηλιακά συστήματα .....	41

### **2<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ Η ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΜΗΧΑΝΗ - DOIG**

<b>2.1 Εισαγωγή στις επαγωγικές μηχανές .....</b>	<b>42</b>
---	-----------



<b>2.2 Κατασκευαστική δομής των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος .....</b>	<b>44</b>
<b>2.3 Αρχή λειτουργίας των επαγωγικών μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος ....</b>	<b>45</b>
2.3.1 Το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο .....	46
2.3.2 Είδη επαγωγικών μηχανών .....	51
2.3.3 Ηλεκτρομαγνητική δομή της επαγωγικής μηχανής .....	54
2.3.4 Η ολίσθηση .....	53
2.3.5 Ισοδύναμο κύκλωμα της επαγωγικής μηχανής .....	54
2.3.6 Απώλειες των επαγωγικών μηχανών .....	56
2.3.7 Ισχύς και ροπή επαγωγικών μηχανών .....	58
2.3.8 Χαρακτηριστική ταχύτητας - ροπής .....	59
2.3.9 Υπολογισμός αναπτυσσόμενης ροπής .....	61
2.3.10 Κλάσεις επαγωγικών μηχανών .....	63
2.3.11 Πειραματικός προσδιορισμός παραμέτρων ισοδύναμου κυκλώματος .....	65
<b>2.4 Δυναμικό μοντέλο dq .....</b>	<b>67</b>
2.4.1 Σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς .....	68
2.4.2 Στατό πλαίσιο αναφοράς .....	71
<b>2.5 Η επαγωγική μηχανή ως γεννήτρια .....</b>	<b>73</b>
<b>2.6 Έλεγχος της ταχύτητας των επαγωγικών μηχανών .....</b>	<b>75</b>
2.6.1 Έλεγχος ταχύτητας σε διάταξη διπλής τροφοδοσίας .....	75
2.6.2 Έλεγχος της ταχύτητας με ρύθμιση αντίστασης δρομέα .....	78
2.6.3 Έλεγχος ταχύτητας με ρύθμιση τάσης του στάτη .....	79
2.6.4 Έλεγχος ταχύτητας με μεταβολή αριθμού των πόλων .....	81
2.6.5 Έλεγχος της ταχύτητας με τη μεταβολή της συχνότητας .....	81
2.6.5.1 Αντιστροφείς γενικά (INVERTERS) .....	81
2.6.5.2 Εφαρμογή στις επαγωγικές μηχανές.....	82

### **3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ**

<b>3.1 Αιολικά συστήματα .....</b>	<b>85</b>
3.1.1 Ο άνεμος .....	85
3.1.2 Το ατμοσφαιρικό στρώμα .....	85
3.1.3 Μεταβολή ταχύτητας ανέμου με το ύψος .....	86

3.1.4 Μεταβολή ταχύτητας ανέμου σε σύνθετη τοπογραφία .....	86
3.1.5 Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το χρόνο .....	87
3.1.6 Μετρήσεις αιολικού δυναμικού .....	88
3.1.7 Ρόδο ανέμου.....	89
3.1.8 Θεωρητικός υπολογισμός συχνοτήτων κατανομής ταχυτήτων ανέμου .....	89
3.1.9 Ενέργεια και η ισχύς του ανέμου .....	90
<b>3.2 Αιολική ενέργεια .....</b>	<b>91</b>
3.2.1 Τύποι ανεμογεννητριών .....	91
3.2.1.1 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα .....	92
3.2.1.2 Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα .....	95
3.2.2 Αεροδυναμική ανεμογεννητριών .....	95
3.2.2.1 Δυνάμεις (αεροδυναμική) .....	95
3.2.2.2 Η θεωρία του δίσκου ενέργειας .....	95
3.2.2.3 Αεροτομές .....	96
3.2.2.4 Σχετική ταχύτητα ανέμου .....	97
3.2.2.5 Ηλεκτρική προστασία ανεμογεννητριών.....	98
3.2.2.5.1 Βασικοί υπολογισμοί ρευμάτων βραχυκύκλωσης .....	99
3.2.3 Αρχή λειτουργίας ανεμογεννητριών .....	104
3.2.3.1 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα .....	104
3.2.3.2 Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα .....	106
3.2.3 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας .....	107
3.2.3.1 Καμπύλη ισχύος .....	107
3.2.3.2 Παραγωγή ενέργειας .....	107
3.2.4 Αιολικά πάρκα .....	108
3.2.4.1 Λειτουργία αιολικών πάρκων .....	111
3.2.4.2 Πεδίο ροής ομόρρου ανεμογεννήτριας.....	112
3.2.4.3 Βαθμός απόδοσης Αιολικού πάρκου .....	113
<b>3.3 Τρόποι λειτουργίας ανεμογεννητριών .....</b>	<b>114</b>
3.3.1 Σταθερής ταχύτητας ανεμογεννήτριες .....	114
3.3.2 Ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας .....	115
3.3.3 Ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας με DOIG .....	119
3.3.4 Ισοδύναμο κύκλωμα DOIG .....	121
3.3.5 Ροή ισχύος .....	122

3.3.6 Έλεγχος μεταβολής της κλίσης των πτερυγίων (Pitch Control) .....	123
--	-----

#### **4<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

<b>4.1 Πειραματική διερεύνηση συμπεριφοράς της επαγωγικής γεννήτριας διπλής εξόδου .....</b>	<b>127</b>
<b>4.2 Διεξαγωγή του πειράματος .....</b>	<b>130</b>
4.2.1 Διεξαγωγή μετρήσεων με την DOIG χρησιμοποιούμενη ως κινητήρας .....	130
4.2.2 Μετρήσεις της διάταξης γεννήτριας - κινητήρα υπό κενό φορτίο .....	133
4.2.3 Μετρήσεις της διάταξης γεννήτριας - κινητήρα υπό φορτίο .....	134

#### **5<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

5.1 Συμπεράσματα .....	177
------------------------	-----

<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>179</b>
---------------------------	------------



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

### 1.1 Η ιστορική εξέλιξη της χρήσης των ενεργειακών πηγών

Η ενέργεια ως γνωστό επηρεάζει καθοριστικά τη ζωή μας. Χρειαζόμαστε ενέργεια για να ζεστάνουμε, να δροσίσουμε, να φωτίσουμε το σπίτι μας, όπως επίσης για την επεξεργασία της τροφής μας. Η Ενέργεια τροφοδοτεί τα αυτοκίνητα μας και τα άλλα μέσα μεταφοράς. Ενέργεια χρειάζονται οι βιομηχανίες μας, τα γραφεία μας και οι άλλοι χώροι εργασίας μας. Σήμερα στις βιομηχανικές κοινωνίες μας σχεδόν όλη αυτή η ενέργεια παράγεται κύρια από ορυκτά καύσιμα πετρέλαιο αγοράς και φυσικό αέριο και σε μικρότερο βαθμό πυρηνική ενέργεια.

Τα ορυκτά καύσιμα, σήμερα, φαίνονται να είναι άφθονα, φθηνά κι άμεσα διαθέσιμα. Η ευκολία με την οποία χρησιμοποιούμε τις ηλεκτρικές μας συσκευές, πχ με το πάτημα ενός διακόπτη ανάβει το φως, και η αφθονία αυτών μας οδηγούν στο να μη δίνουμε σημασία στον τρόπο παραγωγής όλης αυτής της ενέργειας, ή τις επιπτώσεις που η όλη διαδικασία έχει στο περιβάλλον και στον άνθρωπο (αγωγοί καύσιμου μέσα από εμπόλεμες ζώνες, αέρια που προκύπτουν από ορυκτά καύσιμα).

Η χρήση ενεργειακών πηγών χαρακτηρίζει τις ανθρώπινες κοινωνίες πολύ πριν την εμφάνιση των βιομηχανικών κοινωνιών. Αρχικά η φωτιά χρησιμοποιήθηκε για ζεστασιά, για φωτισμό και για μαγείρεμα της τροφής. Αργότερα χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των μετάλλων, την κατασκευή αγγείων αλλά και τούβλων. Επίσης τα ζώα χρησιμοποιήθηκαν για έλξη στην αγροτική παραγωγή, ο αέρας αξιοποιήθηκε για την κίνηση των πλοίων στη Μεσόγειο αλλά και στην κίνηση των ανεμόμυλων της Μεσογείου (στις εικόνες 1.1, 1.2 απεικονίζονται ανεμόμυλος και νερόμυλος αντίστοιχα). Με άλλα λόγια, οι φυσικές δυνάμεις χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια πολλών αιώνων στις μεταφορές και στην παραγωγή.

Η αλλαγή που οδήγησε τις σημερινές αναπτυγμένες κοινωνίες στην παρούσα χρήση καυσίμων και την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, άρχισε και είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την βιομηχανική επανάσταση. Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν εντατικά νερόμυλοι, που χτιζόταν κατά μήκος ποταμών. Με την εφεύρεση της ατμομηχανής, ο άνθρακας άρχισε να αντικαθιστά το νερό ως ενεργειακή πηγή. Κατά τη διάρκεια του 19ου αιώνα ο συνδυασμός των ορυχείων άνθρακα που παρείχαν το καύσιμο, το λιώσιμο του σιδήρου που παρείχε τα υλικά και οι ατμομηχανές που χρησιμοποιούνταν στις μεταφορές αλληλοστηρίχθηκαν για να τροφοδοτήσουν τη βιομηχανοποίηση. Αυτήν την περίοδο, ακατέργαστες και μη αποδοτικές βιομηχανικές διαδικασίες ήταν ο κανόνας και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις αγνοούνταν.

Η αρχή του 20ου αιώνα χαρακτηρίζονται από την ανάπτυξη του ηλεκτρισμού και της μηχανής εσωτερικής καύσης, τη χρήση του πετρελαίου και του αερίου ως επιπρόσθετων καυσίμων και την ανάπτυξη μιας χημικής βιομηχανίας που μπορούσε να δημιουργήσει νέα υλικά χρησιμοποιώντας το πετρέλαιο ως πρώτη ύλη. Αυτήν την περίοδο η ενέργεια παρείχεται άμεσα από την καύση πετρελαίου ή αερίου σε μηχανές, ή έμμεσα από τον ηλεκτρισμό που παραγόταν από την καύση άνθρακα, πετρελαίου ή αερίου, ή από υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις.

Στα μέσα του 20ου αιώνα αναπτύσσονται ραγδαία τα ηλεκτρικά δίκτυα και σε μικρότερο βαθμό τα δίκτυα αερίου. Με το άνοιγμα των σημαντικότερων πετρελαϊκών πεδίων στη Μέση Ανατολή και τη Βόρεια Αφρική οι βιομηχανικές χώρες εξαρτώνται πλήρως από την

χρήση ορυκτών καυσίμων που χρησιμοποιούνται κύρια σε μεγάλες κεντρικές μονάδες παραγωγής. Η ανάπτυξη πυρηνικής ενέργειας μετά τον 2<sup>ο</sup> παγκόσμιο πόλεμο προσθέτει μια ακόμα πηγή παραγωγής ηλεκτρισμού. Αυτήν την περίοδο τα καύσιμα ήταν άφθονα και φθηνά, όμως οι χρήσεις τους παραμένουν μη αποδοτικές και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις συνεχίζουν να αγνοούνται παντελώς.

Σήμερα, στις αρχές του 21ου αιώνα, οι περιοχές του πλανήτη που ήταν πρωτοπόρες στην βιομηχανική επανάσταση βρίσκονται σε ένα στάδιο που ονομάζουμε μετα-βιομηχανικό. Η βιομηχανική παραγωγή συνεχίζει να αυξάνεται, αλλά δεν είναι πλέον το σημαντικότερο στοιχείο της οικονομικής δραστηριότητας. Υπηρεσίες και πιο συγκεκριμένα, οι τηλεπικοινωνίες και οι διαδικασίες πληροφόρησης έγιναν οι κυρίαρχες δραστηριότητες, συνοδευόμενες από την ανάπτυξη των τεχνολογιών υποστήριξής τους.



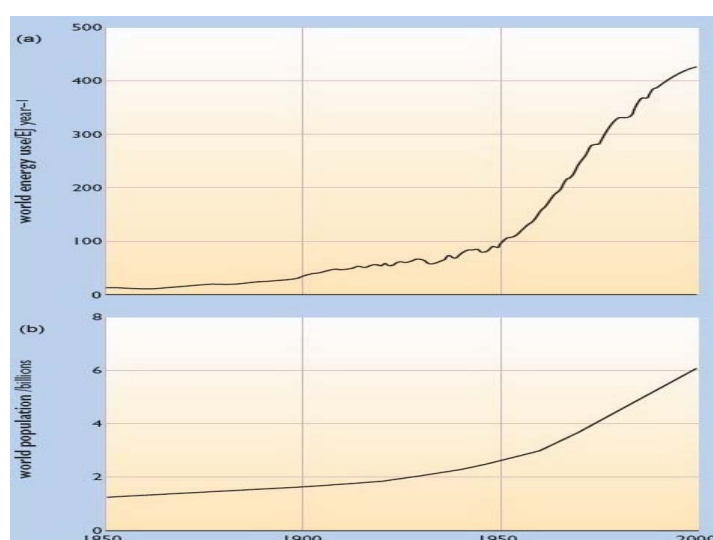
**Εικόνα 1.1** Ανεμόμυλος



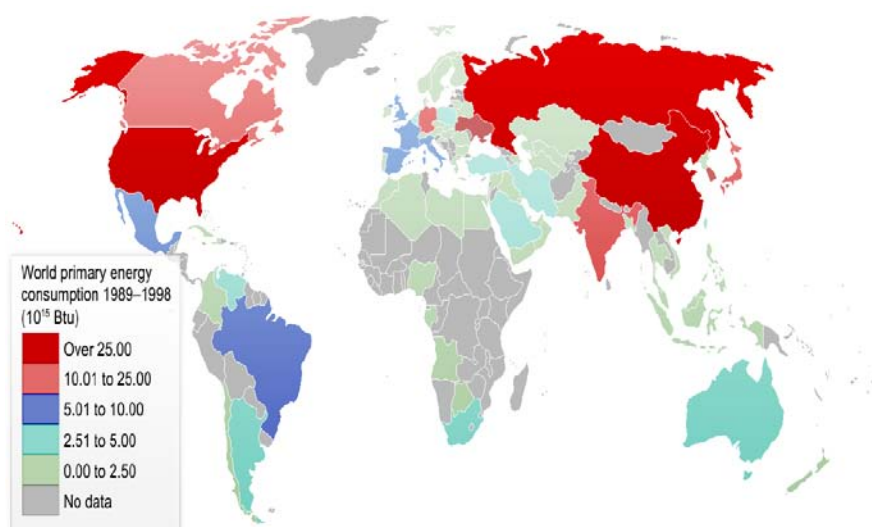
**Εικόνα 1.2** Νερόμυλος

Η παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση εικοσαπλασιάστηκε από το 1850 μέχρι σήμερα, δεκαπλασιάστηκε από το 1900 και τετραπλασιάστηκε από το 1950. Η δραματική αυτή αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης βοήθησε την οικονομική ανάπτυξη και την αύξηση του βιοτικού επιπέδου ενός σημαντικού τμήματος, άλλα όχι ολόκληρου του πληθυσμού του

πλανήτη. Αυτή η ανάπτυξη συνέπεσε με αντίστοιχη, εκθετική, αύξηση και του πληθυσμού (βλέπε σχήμα 1.1). Αφορά όμως περίπου το 20% του παγκόσμιου πληθυσμού έλαβε χώρα τα τελευταία εκατό χρόνια και βέβαια αφορά τις βιομηχανικά αναπτυγμένες χώρες (σχήμα 1.2). Παράλληλα στην ίδια περίοδο υπήρξε μια τεράστια ανάπτυξη της επιστημονικής και τεχνικής γνώσης. Στα τέλη της δεκαετίας του '60 άρχισαν να αναγνωρίζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της βιομηχανικής ανάπτυξης και ιδιαίτερα των επιπτώσεων που προκαλεί η καύση των ορυκτών καυσίμων. Οι ενεργειακές κρίσεις της δεκαετίας του '70 ώθησαν την ανάπτυξη διαφόρων τεχνικών που καθιστούν πιο αποδοτική την χρήση ενέργειας και άρχισε να δίδεται έμφαση στην παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η ηλιακή, η αιολική, η υδροδυναμική ενέργεια, η βιομάζα και τη γεωθερμία που αναβαθμίστηκαν τις τελευταίες δύο δεκαετίες στην παγκόσμια ενεργειακή σκηνή βαπτίστηκαν με τον όρο ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ).



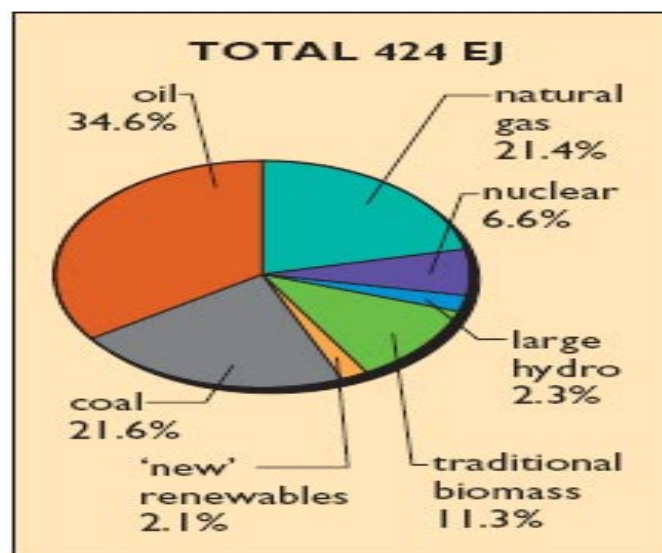
Σχ. 1.1 (α) κατανάλωση ενέργειας από το 1850 (β) εξέλιξη του πληθυσμού στο ίδιο διάστημα



Σχ. 1.2 Αναπαράσταση κατανάλωσης γεωγραφικά- πληθυσμιακά

Η πτώση των τιμών του πετρελαίου κατά την διάρκεια της δεκαετίας του '80 και του '90 δυσκόλεψε, για οικονομικούς λόγους την ανάπτυξη και εισαγωγή σε μεγάλη κλίμακα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της εξοικονόμησης ενέργειας. Παρ' όλο ότι η συνειδητοποίηση των περιβαλλοντικών προβλημάτων της χρήσης των ορυκτών καυσίμων απέκτησε μία άλλη διάσταση κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, η οικονομική παράμετρος εμπόδισε την ανάπτυξή τους.

Σήμερα, τα ορυκτά καύσιμα παρέχουν περίπου το 84% της παγκόσμιας ενεργειακής πίτας. Μεταξύ των ορυκτών καυσίμων, το πετρέλαιο παρέχει το μεγαλύτερο ποσοστό περίπου στο 35% της συνολικής παγκόσμιας ενεργειακής προσφοράς, ο άνθρακας παρέχει περίπου το 22% και το φυσικό αέριο το 22%. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παρέχουν περίπου το 16%, αλλά το μεγαλύτερο μέρος αυτής είναι υπό τη μορφή παραδοσιακής χρήσης της βιομάζας (καυσόξυλα). Οι νέες μορφές των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (υδροηλεκτρικά, αιολική ενέργεια, σύγχρονες μορφές βιοενέργειας) συνεισφέρουν μόνο στο 1/3 της συνολικής προσφοράς των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και το μεγαλύτερο ποσοστό από αυτές είναι υπό την μορφή μεγάλων υδροηλεκτρικών έργων. Τέλος η πυρηνική ενέργεια, παρέχει το υπόλοιπο 7% εκατό (όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.3).



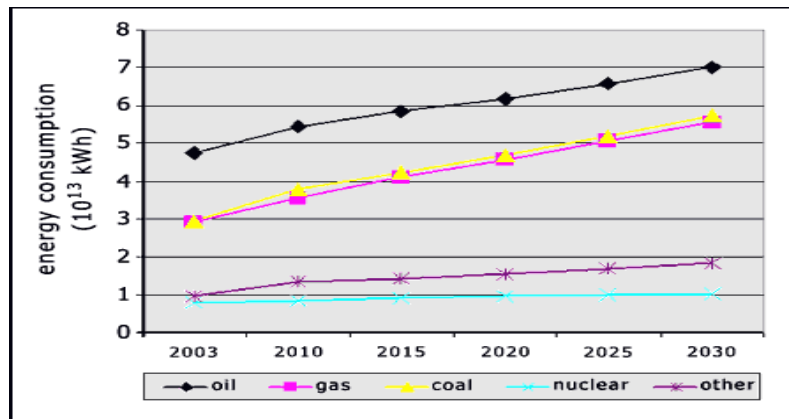
Σχ. 1.3 Η παγκόσμια ενεργειακή πίτα.

Το ένα τρίτο του Παγκοσμίου πληθυσμού ακόμα και σήμερα βασίζονται για την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών στην χρήση του καύση ξύλου και των άλλων παραδοσιακών πηγών ενέργειας. Οι άνθρωποι αυτοί δεν έχουν πρόσβαση στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, δεν καταναλώνουν πετρέλαιο ή φυσικό αέριο. Αυτός είναι ένας από τους βασικότερους λόγους που οι πληθυσμοί αυτοί συνεχώς γίνονται φτωχότεροι. Από την άλλη μεριά, οι πλουσιότεροι πολίτες του πλανήτη καταναλώνουν όλο και μεγαλύτερες ποσότητες ορυκτών καυσίμων, υδροηλεκτρικής και πυρηνικής ενέργειας για να τροφοδοτήσουν την όλο και αυξανόμενη ανάγκη τους σε ενέργεια, (μεγαλύτερα οχήματα, και εξοπλισμός).



## 1.2 Οι ενεργειακές τάσεις σήμερα και οι επιπτώσεις τους – Κλιματικές αλλαγές

Οι σημερινές προβλέψεις δείχνουν ότι αν η τρέχουσα ενεργειακή κατάσταση παραμείνει αμετάβλητη η παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση αυξάνεται με ρυθμό περίπου 2% τον χρόνο στις επόμενες δεκαετίες. Η διεθνής οργάνωση ενέργειας (IEA) προβλέπει στο σενάριο αναφοράς της ότι στην περίοδο 2002-2030 η παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση θα αυξηθεί κατά 61%, η κατανάλωση φυσικού αερίου κατά 100%, η κατανάλωση πετρελαίου κατά 60% και η κατανάλωση άνθρακα κατά 50%. Τα ορυκτά καύσιμα θα καλύψουν το 90% της συνολικής αύξησης σύμφωνα με αυτό το σενάριο. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θα αυξηθούν κατά 47% και θα καλύψουν το υπόλοιπο 10%, εφόσον η χρήση της πυρηνικής ενέργειας προβλέπεται να είναι το 2030 περίπου στα ίδια με σήμερα επίπεδα, μια σχηματική αναπαράσταση των μελλοντικών ενεργειακών τάσεων φαίνεται στο σχήμα 1.4.



Σχ. 1.4 Ενεργειακές καταναλωτικές τάσεις

Άλλες προβλέψεις υποδεικνύουν ότι αν οι παρούσες ενεργειακές πολιτικές και τάσεις συνεχιστούν, η παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση θα διπλασιασθεί μέχρι το 2025 και θα τριπλασιαστεί μέχρι το 2050, συνεχίζοντας να αυξάνεται και στο δεύτερο μισό του αιώνα. Το μεγαλύτερο τμήμα αυτής της αύξησης αναμένεται να γίνει στις αναπτυσσόμενες χώρες, δεδομένου του υψηλού ρυθμού αύξησης του πληθυσμού και τα πολύ χαμηλά επίπεδα της σημερινής ενεργειακής τους κατανάλωσης.

Ένα ενεργειακό μέλλον στηριζόμενο σε υψηλούς ρυθμούς ανάπτυξης και στην εντατική χρήση των ορυκτών καυσίμων παρουσιάζει μία σειρά από προβλήματα και προκλήσεις για την ανθρωπότητα. Τα κυριότερα από αυτά είναι το φαινόμενο του θερμοκηπίου, η ατμοσφαιρική ρύπανση, οι κίνδυνοι ασφάλειας, τα υψηλά κόστη, η μείωση των αποθεμάτων των ορυκτών καυσίμων και η άνιση κατανομή.

Τα προβλήματα του περιβάλλοντος που συνδέονται με την ενέργεια σήμερα είναι η κλιματική αλλαγή, η ατμοσφαιρική ρύπανση οι κίνδυνοι που ελλοχεύουν κατά τη μεταφορά υδρογονανθράκων η ενεργειακή ασφάλεια και άλλοι.

Συγκεκριμένα, τα τελευταία χρόνια έχει καταγραφεί η συνεχής άνοδος της Μέσης θερμοκρασίας της γης, ως αποτέλεσμα του φαινομένου του θερμοκηπίου, δηλαδή της φυσικής κατά βάση διαδικασίας για τη διατήρηση της θερμοκρασίας της γης σε κατάλληλα για την ανάπτυξη ζωής επίπεδα. Το ερώτημα που τίθεται πλέον είναι κατά πόσον η διαπιστωμένη αυτή η κλιματική αλλαγή, οφείλεται σε φυσικές διεργασίες οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις. Σύμφωνα με τη Διακυβερνητική Επιτροπή για την κλιματική αλλαγή υπάρχουν ολοένα και ισχυρότερες ενδείξεις ότι η παρατηρούμενη αύξηση της

θερμοκρασίας οφείλεται σε επιρροές από την ανθρώπινη δραστηριότητα . Σε κάθε περίπτωση, γίνεται ολοένα και περισσότερο αντιληπτό ότι θα πρέπει να ληφθούν μέτρα προληπτικής δράσης, πριν οι δυσάρεστες συνέπειες της κλιματικής αλλαγής γίνουν μη αναστρέψιμες.

## 1.2.1 Επιπτώσεις

### 1.2.1.1 Το φαινόμενο του θερμοκηπίου

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου ουσιαστικά περιγράφει το φαινόμενο, μέσω του οποίου η θερμοκρασία της γης διατηρείται σε επίπεδα που επιτρέπουν τη δημιουργία και τη διατήρηση της ζωής πάνω σε αυτή. Η μέση θερμοκρασία της γης υπολογίζεται στους  $15^{\circ}\text{C}$ , όμως χωρίς την επίδραση του φαινομένου του θερμοκηπίου θα έπεφτε στους  $-18^{\circ}\text{C}$ , θερμοκρασία που θα καθιστούσε την ανάπτυξη ζωής απαγορευτική.

Έτσι, το φαινόμενο του θερμοκηπίου έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της γης σε σύγκριση με το περιβάλλον της.

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου, που περιγράφηκε, παραπάνω οφείλεται στην ύπαρξη των λεγόμενων αερίων του θερμοκηπίου. Τα αέρια αυτά είναι τα εξής :

- $\text{CO}_2$  : διοξείδιο του άνθρακα
- $\text{CH}_4$  : μεθάνιο
- $\text{N}_2\text{O}$  : υποξείδιο του αζώτου
- HFCs : υδρογονοφθοράνθρακες
- PFCs : υπερφθοράνθρακες
- $\text{SF}_6$  : εξαφθοριούχο θείο

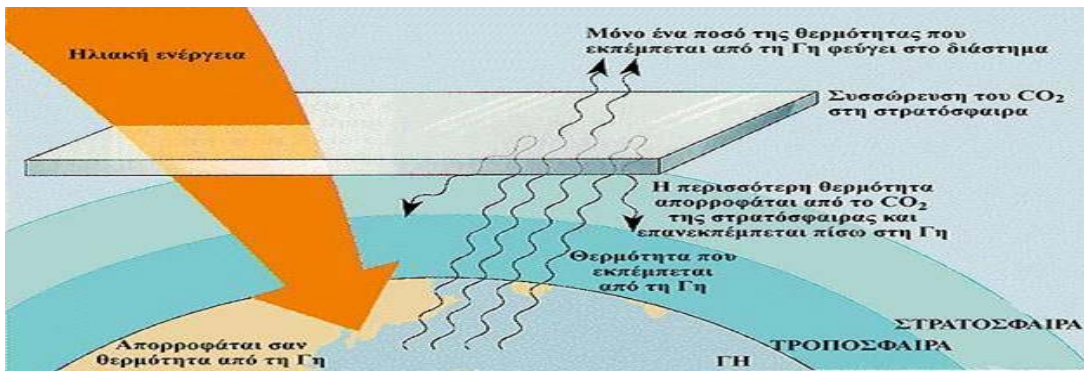
Στα παρακάτω σχήμα αναπαρίσταται η λειτουργία του φαινομένου του θερμοκηπίου (σχ 1.5), αλλά και η ατμοσφαιρική σύσταση σε αέρια του θερμοκηπίου (σχ 1.6).

Η ατμόσφαιρα που περιβάλλει τη γη αποτελείται από ένα τείχος διαπερατό στις ηλιακές ακτίνες. Το μεγαλύτερο μέρος της ορατής και υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας, που δεν απορροφάται από την ατμόσφαιρα ή δεν αντανακλάται προς το διάστημα, κινητέ διά μέσου των ατμοσφαιρικών στρωμάτων προς την επιφάνεια της γης, προκαλώντας τη θέρμανση της. Περίπου το 70% από την παραπάνω, αρχικά απορριφθείσα από την επιφάνεια της γης, ενέργεια, επανακτινοβολείται προς την ατμόσφαιρα με τη μορφή υπέρυθρης ακτινοβολίας. Η ατμόσφαιρα, όμως, δεν είναι πλήρως διαπερατή στην υπεριώδη ακτινοβολία, κυρίως λόγω της περιεκτικότητάς της στα λεγόμενα αέρια του θερμοκηπίου, τα οποία δεσμεύουν το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας και το εκπέμπουν ξανά προς την επιφάνεια του εδάφους με αποτέλεσμα την περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας. Έτσι, παρ όλο που η φωτεινή ηλιακή ακτινοβολία με μικρά μήκη κύματος μεταφέρεται μέσω της ατμόσφαιρας από το διάστημα προς την επιφάνεια του εδάφους, το μεγαλύτερο μέρος της εκπεμπόμενης από το έδαφος ακτινοβολίας, μεγάλων όμως μηκών κύματος, παγιδεύεται από την ατμόσφαιρα και δεν μπορεί να διαφύγει στο διάστημα.

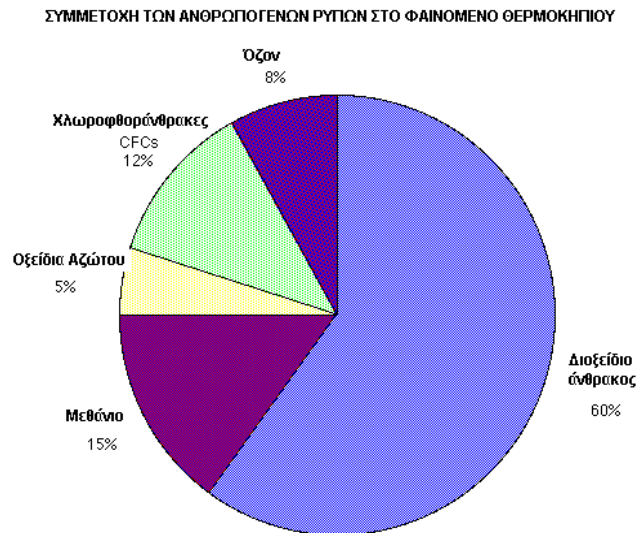
Το φαινόμενο του θερμοκηπίου άρχισε να αποκτά αρνητική σημασία, όταν διαπιστώθηκε η διόγκωση του εξαιτίας των ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Συγκεκριμένα, ο πρώτος ο Σουηδός χημικός Arrhenius S. το 1896 παρατήρησε κάποια σχέση ανάμεσα στην αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της γης και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Ποικίλες ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως η καύση ορυκτών καυσίμων και η εκτεταμένη υλοτομία, προκαλούν αύξηση της περιεκτικότητας των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα σε

επίπεδα πάνω από τα φυσιολογικά, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την όξυνση του φαινομένου.

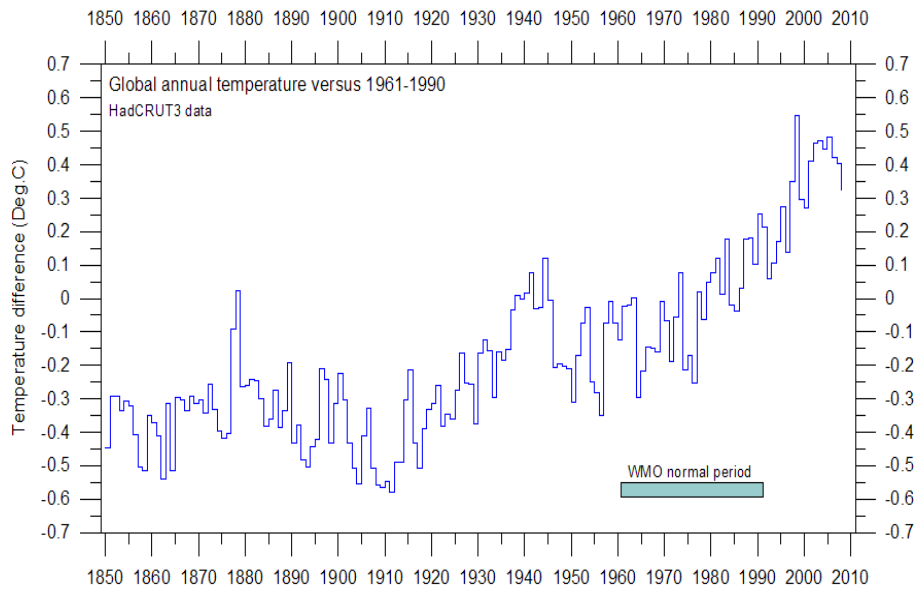
Το φαινόμενο του θερμοκηπίου, ως το σοβαρότερο ίσως από τα περιβαλλοντικά προβλήματα, αποτελεί αντικείμενο έντονου προβληματισμού, τόσο στο επιστημονικό όσο και στο πολιτικό επίπεδο. Η επιστημονική κοινότητα, παρά το σημαντικό βαθμού αβεβαιότητας ως προς την χρονική εξέλιξη και την ένταση του φαινομένου, συγκλίνει στη διαπίστωση ότι οι ανθρωπογενείς εκπομπές αερίων, γνωστών ως αερίων του θερμοκηπίου (κυρίως το CO<sub>2</sub> και το CH<sub>4</sub>), επιδεινώνουν το φυσικό φαινόμενο του θερμοκηπίου, υποβαθμίζουν την ποιότητα της ατμόσφαιρας, συντελούν στη σταδιακή αύξηση της κανονικής θερμοκρασίας του πλανήτη, συνιστούν έτσι σοβαρή απειλή για μια γενικότερη κλιματική μεταβολή ικανή να διαταράξει την οικολογική ισορροπία του πλανήτη.



Σχ. 1.5 Αναπαράσταση φαινομένου του θερμοκηπίου



Σχ. 1.6 Περιεκτικότητα ατμόσφαιρας σε GHGs



Σχ. 1.7 Θερμοκρασιακή μεταβολή από το 1850

Το διοξείδιο του άνθρακα και τα άλλα αέρια του θερμοκηπίου αυξάνουν με γρήγορους ρυθμούς στην ατμόσφαιρα και προκαλούν την υπερθέρμανση του πλανήτη. Το διοξείδιο του άνθρακα στην ατμόσφαιρα έχει αυξηθεί κατά 31% από τους προϊστορικούς χρόνους και το μεθάνιο κατά 151%. Οι ρυθμοί αύξησης έχουν επιταχυνθεί μετά την βιομηχανική επανάσταση και ιδιαίτερα τις τελευταίες δεκαετίες. Η μέση θερμοκρασία στην επιφάνεια της γης αυξήθηκε κατά 0,6<sup>0</sup>c κατά τον τελευταίο αιώνα. Η δεκαετία του '90 ήταν η θερμότερη που έχει καταγραφεί. Το 1998 ήταν το θερμότερο εκτός των τελευταίων χιλίων ετών με το 2001 δεύτερο θερμότερο έτος (βλέπε σχήμα 1.7).

Οι ενεργειακές δραστηριότητες, η κυρία η καύση των ορυκτών καυσίμων, παράγουν του 78% των ανθρωπογενών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και το 23% των εκπομπών μεθανίου. Το διοξείδιο του άνθρακα και το μεθάνιο είναι υπεύθυνα κατά 80% για την αύξηση της θερμοκρασίας από τους προϊστορικούς χρόνους.

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου θα έχει άμεσο αντίκτυπο στην ομαλή λειτουργία του παγκόσμιου οικοσυστήματος και κατ' επέκταση των οργανωμένων ανθρωπίνων κοινωνιών. Ως κυριότερες επιπτώσεις, οι οποίες συνδέονται άμεσα μεταξύ τους, μπορούν να αναφερθούν :

- Η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της γης.
- Το λιώσιμο των πάγων στους πόλους.
- Η αύξηση της στάθμης της θάλασσας.

Όπως αναφέρθηκε, από τις πολύ σημαντικές αρνητικές συνέπειες του φαινομένου του θερμοκηπίου είναι η αύξηση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας. Οι προβλέψεις που έχουν γείνει διαφέρουν μεταξύ τους και μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε αισιόδοξες, απαισιόδοξες και σε πιο μετριοπαθής. Σε κάθε περίπτωση, οι εκτιμήσεις κάνουν λόγο για άνοδο της θερμοκρασίας της γης μέσα στα επόμενα 100 χρόνια. Επισημαίνονται οι

ακόλουθες τάσεις αναφορικά με τις παρατηρούμενες αλλαγές στη θερμοκρασία, σε παγκόσμια κλίμακα :

- Η μέση παγκόσμια θερμοκρασία στην επιφάνεια της γης προβλέπεται να αυξηθεί από  $1,4^{\circ}\text{C}$  έως  $5,8^{\circ}\text{C}$  κατά τη διάρκεια του 21ου αιώνα, τη στιγμή που από το 1861 ως τα τέλη του 20ου αυξήθηκε μόνο κατά  $0,6^{\circ}\text{C}$ . Το φαινόμενο αυτό είναι εντονότερο στη βορειότερη ακτή της Ανταρκτικής, ακριβώς νότια της Χιλής και της Αργεντινής. Οι θερμοκρασίες στην περιοχή αυτή έχουν αυξηθεί κατά  $2,5^{\circ}\text{C}$  στα προηγούμενα 60 χρόνια, γρηγορότερα από οποιαδήποτε άλλη περιοχή του κόσμου.
- Η δεκαετία του 1990 ήταν η θερμότερη δεκαετία και το 1998 το θερμότερο έτος από τότε που ξεκίνησε η οργανωμένη καταγραφή των μετρήσεων της Μέσης θερμοκρασίας της γης στα μέσα του 19ου αιώνα. Πιθανολογείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια του 20ου αιώνα ήταν η μεγαλύτερη από οποιονδήποτε άλλο αιώνα της περασμένης χιλιετίας.

Μια δεύτερη εξίσου σημαντική επίπτωση του φαινομένου του θερμοκηπίου είναι το λιώσιμο των πάγων στις πολικές και ορεινές περιοχές της υδρογείου. Οι περιοχές που πλήττονται περισσότερο από το λιώσιμο των πάγων είναι η Αρκτική, η Ανταρκτική, η Γροιλανδία καθώς και η οροσειρά των Άλπεων, των Άνδεων και των Ιμαλαΐων. Η αρνητική αυτή η συνέπεια καθίσταται ιδιαίτερος ανησυχητική στην περίπτωση της Ανταρκτικής, όπου το ποσοστό της επιφάνειας της ηπείρου το οποίο καλύπτεται από πάγο ελαττώνεται διαρκώς. Αντίστοιχα φαινόμενα παρατηρούνται και στον βόρειο πόλο, όπου οι πάγοι στην νοτιοανατολική πλευρά της Γροιλανδίας λεπταίνουν με ρυθμό μεγαλύτερο από 90 cm το χρόνο.

Επιπροσθέτως, η επικάλυψη των ηπειρωτικών περιοχών με χιόνι έχει ελαττωθεί κατά 10% από το 1960, καθώς και η έκταση των θαλάσσιων πάγων έχει μειωθεί κατά 40% τις τελευταίες δεκαετίες. Το ερώτημα που παραμένει και απασχολεί τους επιστήμονες είναι το κατά πόσο το διαπιστωμένο λιώσιμο των πάγων μπορεί να προκαλέσει αλυσιδωτές αντιδράσεις με απρόβλεπτες συνέπειες στο παγκόσμιο οικοσύστημα.

Τέλος, μία τρίτη, σοβαρή συνέπεια της υπερθέρμανσης του πλανήτη είναι η άνοδος της στάθμης των θαλασσών. Οι εκτιμήσεις αναφέρουν ότι η μέση στάθμη της θάλασσας θα ανέβει κατά 0,09 έως 0,88 μέτρα σε παγκόσμια κλίμακα, μεταξύ των ετών 1990 και 2100. Οι πιο αισιόδοξες προβλέψεις αντιστοιχούν σε επικείμενη άνοδο της μέσης θερμοκρασίας της γης κατά  $1,5^{\circ}\text{C}$ , οι πιο απαισιόδοξες σε αύξηση  $4,5^{\circ}\text{C}$  και οι μετριοπαθέστερες σε αύξηση  $2,5^{\circ}\text{C}$ . Κατά τη διάρκεια του 20ου αιώνα άλλωστε, υπήρξε μια άνοδος της θαλάσσιας στάθμης της τάξης των 0,1 με 0,2 μέτρων, με αποτέλεσμα να αφανίζονται καλλιεργήσιμες εκτάσεις κυρίως κοντά στα δέλτα των ποταμών και να απειλούνται από πλημμύρες κατοικημένες περιοχές.

Απ όλα τα παραπάνω καθίσταται σαφές ότι οι μεταβολές που παρατηρούνται στο περιβάλλον και οφείλονται στο φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι τόσο έντονες, που είναι αδύνατο να αφήσουν ανεπηρέαστες τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Συγκεκριμένα, ακραία κι απρόβλεπτα καιρικά φαινόμενα πλήττουν όλο και συχνότερα ανεπτυγμένες αλλά και αναπτυσσόμενες χώρες, με αποτέλεσμα να απειλείται η ισορροπία του οικοσυστήματος. Οι παραδοσιακές γεωργοκτηνοτροφικές μέθοδοι επηρεάζονται από τις σαρωτικές αλλαγές στο κλίμα του πλανήτη. Επιπλέον, η προσπάθεια μετεωρολογικών προβλέψεων καθίσταται όλο και δυσχερέστερη και η ανακατανομή των υδάτων δημιουργεί προβλήματα ύδρευσης ή ακόμα και πρόσβασης σε πόσιμο νερό.

Εάν οι υπάρχοντες και ρυθμοί αύξησης της ενεργειακής κατανάλωσης συνεχιστούν με την ενεργειακή προσφορά να βασίζεται στα ορυκτά καύσιμα, τότε οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα θα αυξηθούν κατά 2 με 2,5 φορές έως το 2050 και κατά 2,5 με 3,5 φορές έως το 2100. Σύμφωνα με τις πιο πρόσφατες εκτιμήσεις μία τέτοια εξέλιξη θα οδηγήσει σε αύξηση της θερμοκρασίας από 1,4°C έως 5,8°C με καταστροφικές επιπτώσεις για τον πλανήτη.

### **1.2.1.2 Ατμοσφαιρική ρύπανση**

Η καύση των ορυκτών καυσίμων προκαλεί ρύπανση του αέρα η οποία βλάπτει τη δημόσια υγεία και διαταράσσει τα οικοσυστήματα. Η ενεργειακές δραστηριότητες προκαλούν το 85% των ανθρωπογενών εκπομπών του διοξειδίου του θείου (SO<sub>2</sub>), το 45% των εκπομπών σωματιδίων, το 41% των εκπομπών μολύβδου, το 40% των εκπομπών υδρογονανθράκων και το 20% των εκπομπών οξειδίου του νατρίου στην ατμόσφαιρα. Η αέριοι αυτοί η ρύποι προκαλούν με τη σειρά τους την όξινη βροχή και το αστικό νέφος. Η καύση των ορυκτών καυσίμων είναι επίσης μια σημαντική πηγή καρκινογόνων, τοξικών και χημικών.

Η ρύπανση του αέρα είναι ιδιαίτερα υψηλή στις αστικές περιοχές προκαλώντας το θάνατο πεντακοσίων χιλιάδων ανθρώπων ετησίως και ως το 5% των θανάτων σε αστικές περιοχές των αναπτυσσόμενων χωρών. Αλλά η ρύπανση του αέρα από την καύση ορυκτών καυσίμων δεν είναι μόνο πρόβλημα του αναπτυσσόμενων χωρών. Εκτιμάται ότι οι εκπομπές των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής προκαλούν ζημιά στην Ευρωπαϊκή Ένωση κόστους εβδομήντα δισεκατομμυρίων ευρώ ετησίως στην ανθρώπινη υγεία, στα κτίρια και στην αγροτική παραγωγή

Αν η ενεργειακή ανάπτυξη τον επόμενο αιώνα συνεχίσει να βασίζεται στην χρήση των ορυκτών καυσίμων όπως σήμερα, τα προβλήματα της ποιότητας του αέρα θα χειροτερέψουν, επηρεάζοντας αρνητικά τόσο τη δημόσια υγεία όσο και το οικονομικό προϊόν.

### **1.2.1.3 Κίνδυνοι ασφαλείας**

Οι βιομηχανικές χώρες εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις εισαγωγές πετρελαίου και η εξάρτηση αυτή αυξάνεται συνεχώς. Ο διεθνής οργανισμός ενέργειας προβλέπει ότι οι εισαγωγές πετρελαίου στις χώρες του ΟΟΣΑ θα αυξηθούν από 54% που ήταν το 1997 σε 70% το 2020, εάν οι τρέχουσες ενεργειακές τάσεις συνεχιστούν. Οι οικονομίες των χωρών αυτών είναι άμεσα εξαρτημένες από την τιμή του πετρελαίου και από τους παράγοντες που την επηρεάζουν. Οι δυτικές χώρες ξοδεύουν δεκάδες δισεκατομμύρια δολάρια κάθε χρόνο για να προστατέψουν τον εφοδιασμό του πετρελαίου από τη μέση Ανατολή. Σύμφωνα πάντα με τις προβλέψεις του ΙΕΑ το ποσοστό των παγκόσμιων προμηθειών πετρελαίου από τις χώρες του Περσικού Κόλπου θα αυξηθεί από 26% που ήταν το 1997 σε 41% το 2020. Δεδομένης της πολιτικής αστάθειας της περιοχής οι χώρες που εισάγουν πετρέλαιο θα έχουν να αντιμετωπίσουν μεγαλύτερους κινδύνους ασφάλειας στον εφοδιασμό τους και οικονομικής σταθερότητας.

### **1.2.1.4 Υψηλά κόστη ενεργειακών επενδύσεων**

Η κατασκευή σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και δικτύων μεταφοράς αγωγών πετρελαίου και φυσικού αερίου και άλλων εγκαταστάσεων ενεργειακής προσφοράς είναι υψηλής έντασης κεφαλαίου. Οι αναλύσεις δείχνουν ότι αν η παγκόσμια κατανάλωση

ενέργειας συνεχίσει να αυξάνεται με ρυθμό 2% το έτος, θα χρειαστούν ενεργειακές επενδύσεις της τάξης των 11 με 13 τρισεκατομμυρίων δολαρίων για το διάστημα 2000 έως 2020 και των 25 με 35 τρισεκατομμυρίων για το διάστημα 2020 με 2050. Αυτό το επίπεδο επενδύσεων είναι δύο έως τέσσερις φορές υψηλότερο από το αντίστοιχο της περιόδου 1990 έως 2000.

Η αύξηση των επενδύσεων στην ενεργειακή παραγωγή είναι εφικτή για κάποιες χώρες, αλλά θα είναι πολύ δύσκολη για τις αναπτυσσόμενες χώρες και γι αυτές με μεταβατικές οικονομίες. Αυτές οι χώρες έχουν την ανάγκη να επενδύσουν επίσης σε άλλους τομείς υψηλής προτεραιότητας όπως η εκπαίδευση, η υγεία και η περιφερειακή ανάπτυξη. Τα υψηλά ενεργειακά κόστη είναι δυσβάσταχτα για μεγάλο μέρος του πληθυσμού αυτών των χωρών αλλά και για ένα σημαντικό τμήμα του πληθυσμού των αναπτυσσόμενων χωρών που ζουν σε συνθήκες φτώχειας.

#### **1.2.1.5 Μείωση και εξάντληση των παραδοσιακών ενεργειακών πηγών**

Η παγκόσμια παραγωγή πετρελαίου θα φτάσει σε ένα μέγιστο μέσα στις επόμενες δεκαετίες και στη συνέχεια θα μειώνεται λόγω της εξάντλησης των αποθεμάτων. Υπάρχουν διάφορες εκτιμήσεις που τοποθετούν την παραγωγή πετρελαίου να φθάνει στο μέγιστο της σε ένα διάστημα μεταξύ 10 και 30 χρόνων. Όσο η παραγωγή θα μειώνεται μετά αυτήν την ημερομηνία τόσο οι τιμές του πετρελαίου θα αυξάνουν, εκτός εάν άλλα εναλλακτικά καύσιμα αρχίζουν να χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα. Η πορεία για το φυσικό αέριο προδιαγράφεται αντίστοιχη, αν και η μέγιστη παραγωγή μπορεί να συμβεί αργότερα. Τα αποθέματα του άνθρακα μπορούν να διαρκέσουν εκατοντάδες χρόνια, αλλά η χρήση τους είναι προβληματική λόγω των περιβαλλοντικών προβλημάτων που προκαλούν.

#### **1.2.1.6 Άνιση κατανομή**

Η ενεργειακή κατανάλωση, όπως και τα εισοδήματα, είναι πολύ άνισα κατανεμημένα στον πλανήτη. Οι ρυθμοί αύξησης είναι πολύ υψηλότεροι στις αναπτυσσόμενες χώρες, αλλά οι χώρες του ΟΟΣΑ συνεχίζουν και σήμερα να καταναλώνουν εξαπλάσιες ποσότητες κατά κεφαλή απ' ότι οι αναπτυσσόμενες χώρες.

Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας είναι ακόμη περισσότερο άνισα κατανεμημένοι στον πλανήτη απ' ότι η συνολική ενεργειακή κατανάλωση. Η κατά κεφαλή κατανάλωση ηλεκτρισμού στις χώρες του ΟΟΣΑ ήταν το 1996 13 φορές μεγαλύτερη από ότι στις χώρες της Ανατολικής Ασίας, 26 φορές μεγαλύτερη από ότι στις χώρες της Νότιας Ασίας και 63 φορές μεγαλύτερη από ότι στις χώρες της Αφρικής κάτω από την Σαχάρα.

Ως συνέπεια των παραπάνω δεν αποτελεί έκπληξη το γεγονός ότι οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου είναι επίσης άνισα κατανεμημένες στον πλανήτη. Το 20% του Παγκοσμίου πληθυσμού που ζει στις χώρες με τη μεγαλύτερη κατά κεφαλή κατανάλωση ενέργειας παράγει το 63% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από την καύση ορυκτών καυσίμων. Σε αντίθεση, το 20% του παγκοσμίου πληθυσμού που ζει στις χώρες με την μικρότερη κατά κεφαλή κατανάλωση ενέργειας παράγει μόνο το 2% των εκπομπών.

Οι συμβατικές ενεργειακές πολιτικές και τάσεις που δίνουν αυξανόμενη έμφαση στην ενεργειακή κατανάλωση των πλουσιότερων πολιτών (τόσο στις βιομηχανικές όσο και στις αναπτυσσόμενες χώρες), παρά στην παροχή σύγχρονων ενεργειακών πηγών και

βελτιωμένων ενεργειακών υπηρεσιών στους φτωχότερους πολίτες. Οι πολιτικές αυτές προσεγγίζουν την ηλεκτροδότηση των αγροτικών περιοχών και την κατανομή των καυσίμων σε μια συγκεντρωτική αντίληψη. Η προσέγγιση αυτή είναι υψηλού κόστους και συχνά αποτυγχάνει να εξυπηρετήσει τις ανάγκες των φτωχότερων στρωμάτων.

### **1.3 Αντιμετώπιση του προβλήματος - Διεθνείς συμφωνίες**

Η διεθνής κοινότητα, άρχισε να αποκτά συστηματική γνώση και συνείδηση γενικότερα για τα περιβαλλοντικά προβλήματα από τις αρχές της δεκαετίας του '70 και ειδικότερα για την απειλή της κλιματικής μεταβολής από τα τέλη της δεκαετίας. Έκτοτε έχουν πραγματοποιηθεί πολλές διεθνείς συναντήσεις με αντικείμενο το περιβάλλον και το κλίμα. Το πλέον πρακτικό αποτέλεσμα που έχει προκύψει μέχρι στιγμής από αυτή τη δραστηριότητα είναι η συνθήκη για την κλιματική μεταβολή με στόχο τη μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα ως και των άλλων αερίων του θερμοκηπίου. Τη σύμβαση υπέγραψαν υπό μορφή διακήρυξης στη διάσκεψη του Ρίο το 1992, 154 χώρες καθώς και η Ευρωπαϊκή Ένωση.

Στο Κιότο το 1997 η συνθήκη απέκτησε ένα ποσοτικό στόχο με την δέσμευση των αναπτυγμένων χωρών να μειώσουν τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου κατά 5,2% το διάστημα 2008-2012 σε σύγκριση με τις εκπομπές τους το 1990. Ο στόχος αυτός διαφοροποιήθηκε για κάθε χώρα και περιοχή. Η Ευρωπαϊκή Ένωση δεσμεύτηκε να μειώσει τις εκπομπές της κατά 8%.

Τον Μάρτιο του 2006 η Ευρωπαϊκή Ένωση συνέταξε τη λεγόμενη Πράσινη βίβλο όπου προβλέπονται δράσεις ώστε να εξοικονομηθεί ενέργεια κατά 20% ως το 2020. Οι παραπάνω δεσμεύσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης μεταφράζονται σε ειδικότερους στόχους για τα κράτη μέλη.

#### **1.3.1 Πρακτικές αντιμετώπισης του φαινομένου**

Οι λύσεις σχετικά με την αντιμετώπιση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες.

Σε λύσεις που αποσκοπούν στην εξεύρεση τρόπων μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και σε λύσεις που προσβλέπουν στην απορρόφηση των ήδη εκπεμπόμενων ποσοτήτων.

Στην πρώτη κατηγορία λύσεων ανήκουν οι προτάσεις που γίνονται από διεθνείς οργανισμούς και κυβέρνησης για πλήρη μεταστροφή στην υφιστάμενη ενεργειακή πολιτική που ακολουθείται σε παγκόσμια κλίμακα, με ελάχιστες εξαιρέσεις.

Για το σκοπό αυτό έχουν τεθεί οι εξής προτεραιότητες :

- Πραγματοποίηση παγκόσμιας εκστρατείας για την μείωση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας που παρουσιάζει έντονες αυξητικές τάσεις.
- Μέριμνα και την αποδοτικότερη και οικονομικότερη χρήση ενέργειας.
- Διάδοση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Είναι γεγονός ότι η σπατάλη των ενεργειακών πόρων γίνεται τις περισσότερες φορές αλόγιστα. Επιπλέον, διεθνείς και τοπικές περιβαλλοντικές οργανώσεις έχουν αναλάβει εκστρατείες ενημέρωσης των καταναλωτών που προσβλέπουν στη διασφάλιση μιας



ορθολογικότερης χρήσης των ενεργειακών αποθεμάτων. Εκτός όμως από τον περιορισμό της ασύστολης σπατάλης, δράση θα πρέπει να ληφθεί και για την αποδοτικότερη χρήση και παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Συνδυασμένη δράση θα πρέπει να ακολουθηθεί και στον τομέα των μέσων μεταφοράς που αποτελούν έναν από τους σπουδαιότερους παραγωγούς αερίων του θερμοκηπίου σε παγκόσμια κλίμακα. Η δράση αυτή θα περιλαμβάνει αφενός μέτρα υποδομής που θα διευκολύνουν τις συγκοινωνίες και θα τις καθιστούν φιλικότερες προς το περιβάλλον και νέες τεχνολογίες που θα επιτρέπουν στα οχήματα να κινούνται με χρήση οικολογικότερων καυσίμων και αφετέρου την ενίσχυση της εκπαίδευσης και της οικολογικής συνείδησης στους πολίτες.

Η στρατηγική περιορισμού των εκπομπών του θερμοκηπίου συνδέεται άμεσα με την προώθηση των ΑΠΕ. Ιδιαίτερα διαδεδομένη μεταξύ των ισχυρών οικονομικά χωρών του πλανήτη, που διαθέτουν τις κατάλληλες υποδομές, είναι η χρήση της πυρηνικής ενέργειας. Σήμερα, πάνω από το 16% της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας παράγεται με χρήση της πυρηνικής ενέργειας ως πρωτογενούς πηγής. Αποτρέπεται έτσι οι παραγωγή περίπου 2,5 δισεκατομμυρίων τόνων διοξειδίου του άνθρακα κάθε χρόνο. Η χρήση της πυρηνικής ενέργειας θεωρείται εξαιρετικά ασφαλής, αποδοτική για αξιόπιστη. Στη μικρή πιθανότητα όμως πρόκλησης κάποιου ατυχήματος, η καταστροφή είναι ανυπολόγιστη και ως εκ τούτου γεννιούνται ηθικά διλήμματα για το κατά πόσον η χρήση αυτής της μορφής ενέργειας ενδείκνυται για εκτεταμένες εφαρμογές.

Από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ευρύτερα χρησιμοποιείται η ηλιακή ενέργεια. Η ενέργειά της ηλιακής ακτινοβολίας για παραγωγή ηλεκτρισμού αξιοποιείται με δύο τρόπους. Είτε με τη χρήση φωτοβολταϊκής τεχνολογίας, είτε με τη χρήση ανακλαστήρων, που συγκεντρώνουν θερμική ενέργεια και τη μετατρέπουν σε ηλεκτρική μέσω γεννητριών. Η ηλιακή ενέργεια είναι ιδιαίτερος φιλική προς το περιβάλλον, προϋποθέτει όμως την εφαρμογή της σε περιοχές με έντονη ηλιοφάνεια.

Ανάλογα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα παρουσιάζει και η χρήση της αιολικής ενέργειας, που όπως και η ηλιακή είναι μία καθαρή μορφή ενέργειας, χωρίς εκπομπές καυσαερίων, απαιτεί όμως την ύπαρξη πολύ δυνατών ανέμων για να αξιοποιηθεί. Η μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική γίνεται με τη χρήση ανεμογεννητριών, που συνήθως τοποθετούνται πολύ κοντά η μία στην άλλη και σε ύψη μεγαλύτερα των 30 μέτρων, όπου ο άνεμος είναι πιο ισχυρός.

Άλλες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η εφαρμογή των οποίων έχει αναδειχθεί τα τελευταία χρόνια με την αρωγή των νέων τεχνολογιών, είναι η χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο, καθώς υπάρχει άφθονο στη φύση και παράγει αντί για καυσαέριο καθαρό νερό, η χρήση της θερμικής ενέργειας των υδάτινων μαζών των ωκεανών, της μηχανικής ενέργειας των θαλασσιών κυμάτων και της γεωθερμικής ενέργειας.

Από τις μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, το φυσικό αέριο που βρίσκει ευρεία εφαρμογή στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σήμερα και είναι σχετικά οικολογικό, αφού εκπέμπει μεν διοξείδιο του άνθρακα, σε ποσότητες δε υποπολλαπλάσιες σε σχέση με τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα.

Στη δεύτερη κατηγορία των προτεινόμενων λύσεων στο πρόβλημα των εκπομπών θερμοκηπίου, ανήκουν οι μεθοδολογίες απορρόφησης των αερίων αφού είναι αναπόφευκτη η παραγωγή τους έστω και σε μειωμένες ποσότητες. Μία μέθοδος που βρίσκεται ακόμα σε δοκιμαστικό στάδιο είναι η υγροποίηση του διοξειδίου του άνθρακα και η αποθήκευση του σε υπόγεια κοιτάσματα από όπου προηγουμένως έχουν εξορυχτεί ορυκτά καύσιμα όπως

λιγνίτης και πετρέλαιο. Άλλες πρακτικές περιλαμβάνουν την πλύση και ξήρανση του άνθρακα καθώς και τις διαδικασίες μπρικετοποίησης.

Τέλος, αποτελεσματικός φυσικός μηχανισμός απορρόφησης ποσοτήτων διοξειδίου του άνθρακα είναι η φωτοσύνθεση που πραγματοποιούν τα φυτά. Η προστασία λοιπόν των υπαρχόντων δασών, η αποκατάσταση των κατεστραμμένων με αναδασώσεις και η δημιουργία νέων δασικών εκτάσεων, καταπολεμά με φυσικό τρόπο την υπερβολική συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα.

### **1.3.1.1 Το πρωτόκολλο του Κιότο**

Κεντρικός άξονας του Πρωτοκόλλου είναι οι νομικά κατοχυρωμένες δεσμεύσεις των βιομηχανικά αναπτυγμένων κρατών να μειώσουν τις εκπομπές έξι αερίων του θερμοκηπίου την περίοδο 2008-2012, σε ποσοστό 5,2% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990. Το Πρωτόκολλο έχει γίνει ήδη διεθνής δεσμευτικός νόμος, μετά την επικύρωσή του από τον απαραίτητο αριθμό χωρών, παρά την αντίθεση των ΗΠΑ να συμμετάσχουν.

Οι υποχρεώσεις που προβλέπει το πρωτόκολλο του Κιότο για τα συμβαλλόμενα μέρη, ποικίλουν ανάλογα με το επίπεδο της οικονομικής ανάπτυξης κάθε χώρας. Προκύπτει, λοιπόν, η κατάταξη των χωρών σε παραρτήματα του πρωτοκόλλου, ώστε οι δεσμεύσεις και οι στόχοι καθεμίας να συμπίπτουν με τις αντικειμενικές τις δυνατότητες.

Οι χώρες του παραρτήματος Α είναι κυρίως οι ανεπτυγμένες χώρες, συμπεριλαμβανομένης της Ευρωπαϊκής Ένωσης που λογίζεται σαν ενιαίος φορέας. Οι χώρες αυτές αναλαμβάνουν συγκεκριμένες δεσμεύσεις και υποχρεούνται να συντάσσουν αναφορές για τα μέτρα που λαμβάνουν για τον περιορισμό των εκπομπών τους σε αέρια του θερμοκηπίου του.

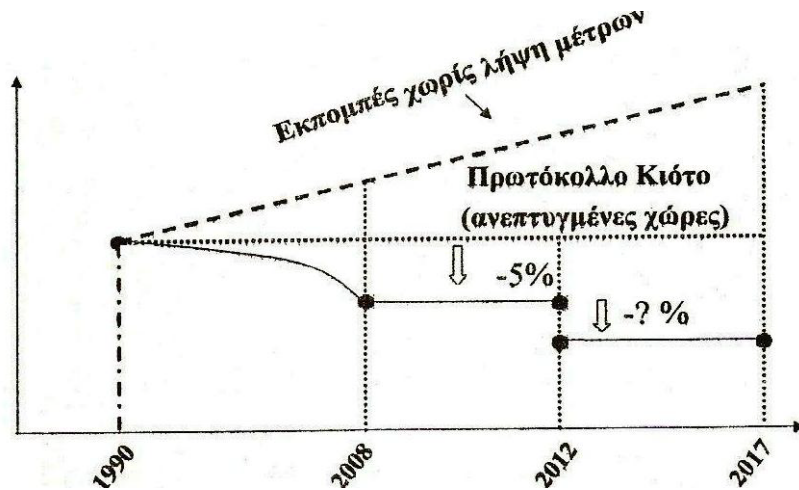
Οι χώρες του παραρτήματος Β αποτελούν ένα υποσύνολο αυτών του παραρτήματος Α και είναι οι περισσότερο ανεπτυγμένες και ισχυρότερες οικονομικά χώρες του πλανήτη. Επιπλέον, έχουν την πρόσθετη υποχρέωση να συνεισφέρουν οικονομικά και τεχνολογικά στις προσπάθειες των αναπτυσσόμενων χωρών.

Οι χώρες με μεταβατική οικονομία κατατάσσονται οι μεν στο παράρτημα Α, δεν έχουν τις υποχρεώσεις δε των χωρών του παραρτήματος Β. Προκύπτει για χώρες της Κεντρικής και Ανατολικής Ευρώπης, καθώς και για πρώην σοβιετικές δημοκρατίες.

Οι χώρες που βρίσκονται εκτός του παραρτήματος Α δεν έχουν ποσοτικοποιημένους στόχους, αν και υποχρεούνται να συμβάλουν στη μείωση των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Είναι κυρίως οι χώρες των οποίων η οικονομία εξακολουθεί να βρίσκεται σε φάση ανάπτυξης.

Το πρωτόκολλο του Κιότο δεσμεύει τις χώρες του παραρτήματος Α ώστε να πετύχουν μείωση των εκπομπών των έξι αερίων του θερμοκηπίου. Και ο στόχος που τέθηκε είναι η παγκόσμια μείωση του επιπέδου των εκπομπών αερίων τουλάχιστον κατά 5,2 % σε σχέση με το επίπεδο εκπομπών του έτους αναφοράς (1990) κατά την περίοδο 2008-2012. Η επιβεβαίωση του στόχου αυτού θα γίνει υπολογίζοντας το μέσο όρο των πέντε ετών της περιόδου αυτής και συγκρίνοντας το αποτέλεσμα που θα προκύψει με τα επίπεδα αναφοράς. Στο σχήμα 1.8 αναπαρίσταται σχηματικά ο στόχος που έχει τεθεί. Το επίπεδο αναφοράς που αντιστοιχεί στις εκπομπές του 1990 έχει σχεδιαστεί με μια οριζόντια γραμμή. Μία γραμμή με θετική κλίση έχει χρησιμοποιηθεί για την απεικόνιση της αναμενόμενης αύξησης των εκπομπών στην περίπτωση που δεν ληφθεί καμία προληπτική δράση περιορισμού αυτών. Η απαιτούμενη μείωση των εκπομπών κατά 5,2%, σε σχέση με

τα επίπεδα του 1990, απεικονίζεται με τη χάραξη μιας οριζόντιας γραμμής για την περίοδο 2008-2012, καθώς οι απαιτήσεις του πρωτοκόλλου κάνουν λόγο για τον μέσο όρο των εκπομπών της πενταετίας. Τέλος, για την περίοδο 2012-2017 δεν είχαν τεθεί συγκεκριμένοι στόχοι, είναι όμως βέβαιο ότι θα απαιτηθεί η περαιτέρω μείωση των εκπομπών.



Σχ. 1.8 Σχηματική αναπαράσταση εκπομπών GHGs με και χωρίς λήψη μέτρων

Οι στόχοι που θέτει το πρωτόκολλο του Κιότο για κάθε χώρα ξεχωριστά παρατίθενται στον πίνακα 1.1. Οι χώρες της Ευρώπης έχουν αναλάβει τη δέσμευση να μειώσουν τις εκπομπές τους σε αέρια του θερμοκηπίου κατά 8% σε σχέση με το 1990. Εξαιρέση αποτελούν η Ισλανδία και η Νορβηγία που έχουν περιθώριο αύξησης των εκπομπών τους κατά 10% και 1% αντίστοιχα. Στη χώρα με τις μεγαλύτερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου παγκοσμίως, τις ΗΠΑ, έχει τεθεί ο στόχος της ελάττωσης των εκπομπών τους κατά 7%. Ωστόσο, οι ΗΠΑ δεν έχουν υπογράψει το πρωτόκολλο του Κιότο και συνεπώς δεν δεσμεύονται έναντι του στόχου αυτού. Άλλες ισχυρές οικονομικά χώρες, όπως η Ιαπωνία και ο Καναδάς, αναλαμβάνουν δεσμεύσεις μείωσης της τάξης του 6%. Η Ρωσία δεσμεύεται να διατηρήσει τις εκπομπές της στα ίδια επίπεδα με αυτά του 1990.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1 Στόχοι Κιότο για χώρες που συμμετέχουν στο πρωτόκολλο

ΧΩΡΑ	ΣΤΟΧΟΣ (%)	ΧΩΡΑ	ΣΤΟΧΟΣ (%)
Αυστραλία	+8	Λευκορωσία	-8
Βουλγαρία	-8	Ν Ζηλανδία	0
Ελβετία	-8	Νορβηγία	+1
ΗΠΑ	-7	Ουκρανία	0
Ιαπωνία	-6	Ρουμανία	-8
Ισλανδία	+10	Μονακό	0
Καναδάς	-6	Ρωσία	-8
Κροατία	-5	ΕΕ 15	-8

Όσο αφορά στην Ευρωπαϊκή Ένωση για να επιτευχθεί ο στόχος καθορίστηκαν διαφορετικοί επιμέρους στόχοι μεταξύ των κρατών μελών σε συνάρτηση με την οικονομική ανάπτυξη και τις τεχνολογικές δυνατότητες καθενός. Με την διεύρυνση της Ευρωπαϊκής Ένωσης και την αύξηση των κρατών μελών της σε 27, εισήχθησαν στους κόλπους της Ευρωπαϊκής Ένωσης και χώρες με οικονομίες με μεταβατικό στάδιο, με αποτέλεσμα οι στόχοι για τις χώρες αυτές να τεθούν με διαφορετικά κριτήρια. Στον πίνακα 1.2 καταγράφονται αναλυτικά οι στόχοι που θέτει το πρωτόκολλο του Κιότο για κάθε κράτος μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Δεν αναφέρονται η Μάλτα και η Κύπρος, χώρες για τις οποίες δεν υπάρχουν ποσοτικοποιημένοι στόχοι.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1.2** Στόχοι Κιότο για χώρες ΕΕ

ΧΩΡΑ	ΣΤΟΧΟΣ (%)	ΧΩΡΑ	ΣΤΟΧΟΣ (%)
Αυστρία	-13	Φιλανδία	0
Βέλγιο	-7,5	Σουηδία	+4
Δανία	-21	Μ Βρετανία	-12,5
Γερμανία	-21	ΕΕ 15	-8
Ελλάδα	+25	Εσθονία	-8
Ισπανία	+15	Λιθουανία	-8
Γαλλία	0	Σλοβακία	-8
Ιρλανδία	+13	Τσεχία	-8
Ιταλία	-6,5	Σλοβενία	-8
Λουξεμβούργο	-28	Πολωνία	-6
Ολλανδία	-6	Ουγγαρία	-6
Πορτογαλία	+27	Λετονία	-6

Για να διευκολυνθούν τα συμβαλλόμενα μέρη στην επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί από το πρωτόκολλο του Κιότο, θεσπίστηκαν τρεις ευέλικτοι μηχανισμοί που συμβάλλουν στην υλοποίηση των στόχων των χωρών του παραρτήματος Α με οικονομικότερο τρόπο και την άμβλυνση των αντιθέσεων μεταξύ των χωρών με διαφορετική οικονομική ανάπτυξη. Οι τρεις ευέλικτοι μηχανισμοί του πρωτοκόλλου του Κιότο είναι οι παρακάτω :

- **Μηχανισμός καθαρής ανάπτυξης, (CDM)** : Επιτρέπει σε μία χώρα του παραρτήματος Α την επένδυση σε ένα πρόγραμμα μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου σε μια χώρα που δεν ανήκει στο παράρτημα Α και ως συνέπεια να καρπώθηκε μια ποσότητα βεβαιωμένων μείωσης των εκπομπών.
- **Πρόγραμμα από κοινού, (JI)** : Ο μηχανισμός αυτός προβλέπει ότι μια χώρα του παραρτήματος Α μπορεί να εξασφαλίσει μουλάδες μείωσης εκπομπών με την εφαρμογή προγράμματος, το οποίο μειώνει τις εκπομπές σε μια άλλη χώρα επίσης του παραρτήματος Α.

- **Εμπορία δικαιωμάτων εκπομπών, (ΙΕΤ)** : Επιτρέπει σε χώρες που δεν έχουν δεσμεύσεις για τις εκπομπές τους να πουλήσουν ένα μέρος των δικαιωμάτων εκπομπών τους στις χώρες που έχουν δεσμευτεί να πετύχουν μείωση των εκπομπών τους.

### 1.3.1.2 Η πράσινη βίβλος

Η ΕΕ στην προσπάθεια για την καταπολέμηση της αλλαγής του κλίματος μέσα από τη πράσινη βίβλο προτείνεται να καταστεί η ίδια πρωτοπόρος στην καταπολέμηση της αλλαγής του κλίματος και στις τεχνολογίες που θα εξασφαλίσουν αύριο καθαρότερη και βιώσιμη ενέργεια. Η δέσμευση του άνθρακα και οι τεχνολογίες καύσης καθαρού άνθρακα, όπως ονομάζονται, πρέπει να προωθηθούν για να επιτραπεί στα κράτη που το επιθυμούν να διατηρήσουν τον άνθρακα στην ενεργειακή τους σύνθεση.

Η Πράσινη βίβλος για την ενέργεια αποτελεί σημαντικό βήμα στην ανάπτυξη ενεργειακής πολιτικής στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Η Ευρώπη, για να επιτύχει τους οικονομικούς, κοινωνικούς και περιβαλλοντικούς της στόχους, ως δεύτερη αγορά ενέργειας στον κόσμο, μπορεί να εκμεταλλευθεί την πρώτη θέση που κατέχει διεθνώς στον τομέα της διαχείρισης της ζήτησης και της προώθησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Η ΕΕ έχει στόχο την υλοποίηση μιας ευρωπαϊκής ενεργειακής πολιτικής, η οποία θα έχει τρεις κύριους στόχους:

- τη βιωσιμότητα, για να καταπολεμηθεί δραστήρια η αλλαγή του κλίματος με την προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της ενεργειακής απόδοσης,
- την ανταγωνιστικότητα, για να βελτιωθεί η απόδοση του ευρωπαϊκού δικτύου μέσω της ολοκλήρωσης της εσωτερικής αγοράς ενέργειας,
- την ασφάλεια εφοδιασμού, για να συντονισθεί καλύτερα η ζήτηση και η προσφορά ενέργειας εντός της ΕΕ μέσα στο διεθνές περιβάλλον.

Η πράσινη βίβλος περιέχει πρωτεύοντες τομείς δράσης, στους οποίους η Επιτροπή προτείνει συγκεκριμένα μέτρα με σκοπό την υλοποίηση της ευρωπαϊκής ενεργειακής πολιτικής. Από την ολοκλήρωση της εσωτερικής αγοράς έως μια εξωτερική πολιτική ενέργειας, αυτοί οι τομείς αναμένεται ότι θα επιτρέψουν στην Ευρώπη να αποκτήσει αιεφόρο, ανταγωνιστική και ασφαλή ενέργεια για τις επόμενες δεκαετίες.

Η Ευρώπη έχει ήδη αποδείξει, με τη δράση που έχει αναλάβει στο εσωτερικό της, ότι είναι δυνατό να μειωθούν οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου δίχως να διακυβευθεί η οικονομική ανάπτυξη. Είναι γεγονός ότι υπάρχουν ακόμη μεγάλα περιθώρια μείωσης των εκπομπών και υπενθυμίζεται η δέσμευση της ΕΕ όσον αφορά τη συνέχιση και την εμβάθυνση των λαμβανόμενων μέτρων καθώς και τη λήψη νέων σχετικών μέτρων.

Προτείνεται η εκ μέρους της ΕΕ έγκριση των στόχων μείωσης των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου. Καλεί την ΕΕ να υιοθετήσει ως στόχο, στο πλαίσιο των διεθνών διαπραγματεύσεων, την κατά 30% μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου στις αναπτυγμένες χώρες (ως προς τα επίπεδα του 1990) έως το 2020. Μέχρι να συναφθεί η διεθνής συμφωνία και υπό την επιφύλαξη των θέσεων που θα λάβει κατά τις διεθνείς διαπραγματεύσεις, επιβάλλεται να προβεί πάραυτα σε ρητή και ανεξάρτητη δέσμευση υπέρ της μείωσης των εσωτερικών της εκπομπών τουλάχιστον κατά 20% μέχρι το 2020. Με τη σειρά τους εξάλλου, στο Ευρωπαϊκό Συμβούλιο του Μαρτίου του 2007, τα κράτη μέλη δεσμεύθηκαν εις ότι αφορά την επίτευξη των εν λόγω στόχων.

Σύμφωνα με τη στρατηγική ανάλυση της ενεργειακής πολιτικής της ΕΕ, η Επιτροπή συνιστά τη λήψη των κάτωθι ενεργειακών μέτρων:

- Επίτευξη της κατά 20% βελτίωσης της αποτελεσματικής αξιοποίησης της ενέργειας στην ΕΕ μέχρι το 2020.
- Αύξηση του μεριδίου των ανανεώσιμων μορφών ενέργειας σε 20% μέχρι το 2020.
- Ανάπτυξη πολιτικής για τη δέσμευση και τη γεωλογική παγίδευση του ατμοσφαιρικού άνθρακα με στόχο τη διαφύλαξη του περιβάλλοντος.
- Αύξηση της διάθεσης των δικαιωμάτων εκπομπής για περίοδο που να υπερβαίνει την πενταετία, όπως προβλεπόταν μέχρι σήμερα.
- Επέκταση του συστήματος ώστε να καλύψει επιπλέον τομείς.
- Εναρμόνιση των διαδικασιών κατανομής των δικαιωμάτων εκπομπής μεταξύ των κρατών μελών.

#### **1.4 Εκτίμηση του κόστους και των πλεονεκτημάτων ΑΠΕ**

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εκλύουν ελάχιστα ή μηδαμινά αέρια θερμοκηπίου. Η αύξηση του μεριδίου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο σύνολο των διαθέσιμων καυσίμων θα μειώσει σημαντικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στην ΕΕ. Εκτιμάται ότι ο στόχος του 20% θα επιφέρει μείωση ύψους 600 έως 900 εκατομμυρίων τόνων CO<sub>2</sub> ετησίως, δηλαδή εξοικονόμηση ύψους 150 έως 200 δισεκατομμυρίων ευρώ, εφόσον η τιμή του CO<sub>2</sub> ανά τόνο ανέρχεται σε 25 ευρώ.

Εξάλλου, η ανάπτυξη ενεργειακών πηγών εναλλακτικών προς τα ορυκτά καύσιμα συμβάλλει στη διασφάλιση του ενεργειακού εφοδιασμού της Ευρώπης και στη μείωση των ενεργειακών δαπανών που συνδέονται με την αύξηση της τιμής των ορυκτών πηγών ενέργειας. Συνεπώς, εάν η ΕΕ επιτύχει το στόχο του 20% μέχρι το 2020, η ετήσια εξοικονόμηση υπολογίζεται σε περισσότερα από 250 εκατομμύρια ΤΠΠ (τόνοι ισοδύναμου πετρελαίου) μέχρι το 2020, εκ των οποίων 200 εκατομμύρια ΤΠΠ από εισαγωγές.

Επιπλέον, η ανάπτυξη τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θα διανοίξει νέες εμπορικές προοπτικές, ιδίως στην εξαγωγή των τεχνολογιών αυτών. Επίσης προβλέπεται να ωφεληθεί η απασχόληση και η αύξηση του ΑΕΠ.

Το κόστος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μειώνεται σταθερά την τελευταία εικοσαετία. Όμως το κόστος αυτό παραμένει υψηλότερο από αυτό των συμβατικών πηγών ενέργειας, κυρίως διότι δεν ενσωματώνεται σε αυτό το 'εξωτερικό' κόστος των ορυκτών πηγών ενέργειας. Το πρόσθετο μέσο ετήσιο κόστος για να επιτευχθεί ο στόχος του 20% υπολογίζεται μεταξύ 10 και 18 δισ. ευρώ και εξαρτάται από τις τιμές της ενέργειας και τις ερευνητικές προσπάθειες.

Το 'εξωτερικό κόστος' της ενέργειας. Είναι γνωστό ότι η παραγωγή και χρήση της ενέργειας συνοδεύεται από διάφορες και σημαντικές επιπτώσεις στο φυσικό και κοινωνικό περιβάλλον, οι οποίες μέχρι σήμερα σε μεγάλο βαθμό αγνοήθηκαν κατά ενεργειακό σχεδιασμό, τόσο κατά τη λήψη των αποφάσεων όσο και κατά τη διαμόρφωση των τιμών. Οι επιπτώσεις αυτές συμβάλλουν στη μεταβολή του επιπέδου κοινωνικής ευημερίας, συνιστούν επομένως ένα περιβαλλοντικό κόστος το οποίο όμως δεν εντάσσεται στο ισχύον σύστημα αξιών. Η αποτίμηση αυτού του περιβαλλοντικού κόστους είναι μια ιδιαίτερα περίπλοκη διαδικασία, κι αυτό γιατί απαιτεί την έκφραση σε χρηματικούς όρους μιας σειράς μη εμπορεύσιμων αγαθών όπως είναι η ανθρώπινη ζωή, η βιοποικιλότητα, η

εξαντλησιμότητα των φυσικών πόρων. Την τελευταία δεκαετία σημαντικές προσπάθειες προς την κατεύθυνση αυτή έχουν καταβληθεί από την επιστημονική κοινότητα και παρά το γεγονός ότι αν και τα μεθοδολογικά προβλήματα εξακολουθούν να υφίστανται έχει επιτευχθεί η αποτίμηση του περιβαλλοντικού κόστους από τη χρήση διαφόρων ενεργειακών συστημάτων και τεχνολογιών. Έτσι, το 'εξωτερικό κόστος' αποδεικνύεται ιδιαίτερα υψηλό για τα συμβατικά καύσιμα και κατά σειρά σημασίας για τον άνθρακα, για τα πετρελαιοειδή, αλλά και για το φυσικό αέριο. Αντίθετα οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εμφανίζονται πιο φιλικές προς το περιβάλλον και η χρήση τους συνοδεύεται ουσιαστικά από αμελητέο περιβαλλοντικό κόστος. Γίνεται επομένως αυτονόητο ότι η ενσωμάτωση του περιβαλλοντικού κόστους στη διαδικασία λήψης των ενεργειακών αποφάσεων μεταβάλλει τη κυρίαρχη αντίληψη περί κόστους των διαφόρων χρησιμοποιούμενων πηγών ενέργειας. Αποδεικνύεται ότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι τεχνικά εφικτό, οικονομικά αποδεκτό και περιβαλλοντικά επιβεβλημένο να παίξουν ένα πολύ σημαντικό ρόλο από κείνον που τους προσδιορίζει το ισχύον σύστημα αξιών.

Απ' όλα τα παραπάνω είναι φανερό ότι για την Ευρωπαϊκή Ένωση και κατά συνέπεια και για την Ελλάδα το ενεργειακό μέλλον επιβάλλεται να αναζητηθεί στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Συγκεκριμένα θα εξεταστεί διεξοδικότερα η αιολική ενέργεια.

### **1.5 Γενικά για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας**

Ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον είναι δυνατό να συμβεί μόνο αν στηριχθεί πολύ περισσότερο στην χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και στην ορθολογική χρήση αυτής. Η ορθολογική χρήση της ενέργειας θα μπορούσε να ελαττώσει την κατανάλωση ενέργειας, να μειώσει τις επενδυτικές απαιτήσεις και να βελτιώσει τις ενεργειακές υπηρεσίες στα πτωχότερα στρώματα του πληθυσμού και στα φτωχότερα κράτη. Η μετάβαση από τα ορυκτά καύσιμα στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας τις επόμενες δεκαετίες θα μπορούσε να αντιμετωπίσει όλα τα προβλήματα του ενεργειακού μέλλοντος που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Με τον όρο ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αναφερόμαστε κυρίως στις ακόλουθες :

- Την αιολική ενέργεια
- Την ηλιακή ενέργεια
- Τα μικρά υδροηλεκτρικά
- Τις κυψέλες καύσιμου
- Την ενέργεια των θαλασσίων κυμάτων
- Την γεωθερμική ενέργεια
- Την ενέργεια της βιομάζας

Με βάση τις υφιστάμενες σήμερα τεχνολογίες, ο καλύτερος τρόπος αξιοποίησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο σχήμα 1.9 φαίνεται συμμετοχή των ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για το έτος 2006.

Η αιολική ενέργεια αξιοποιείται μέσω των ανεμογεννητριών, οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική.

Την ηλιακή ενέργεια αξιοποιείται είτε, συνήθως, μέσω των φωτοβολταϊκών γεννητριών, οι οποίες μετατρέπουν απευθείας είναι η ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική είτε, σπανιότερα, με τη συγκέντρωση των ηλιακών ακτινών μέσω ηλιακών συλλεκτών ώστε να επιτύχουν υψηλές θερμοκρασίες και τελικά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επί πλέον εκτεταμένη χρήση της ηλιακής ενέργειας γίνεται για τη θέρμανση νερού ή χωρών.

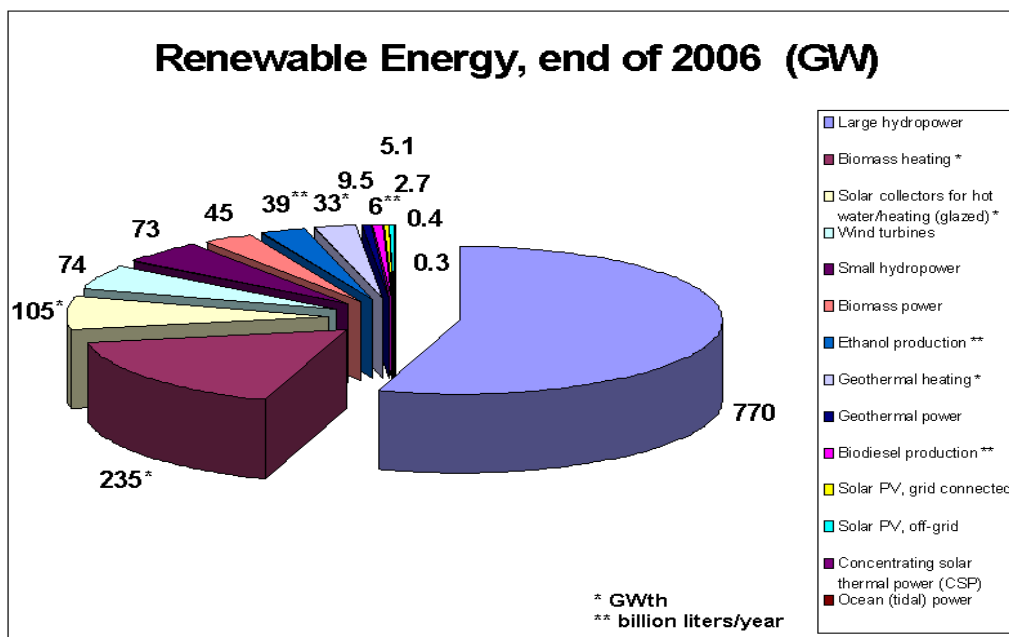
Με τα μικρά υδροηλεκτρικά, γίνεται συνήθως εκμετάλλευση υδάτινων ρευμάτων, για την αξιοποίηση των οποίων δεν απαιτούνται μεγάλα έργα αποθηκείσεως νερού.

Οι κυψέλες καυσίμου μετατρέπουν απέχθειας τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική, με τη χρήση κατάλληλων διατάξεων και ηλεκτρολυτών.

Η κινητική ενέργεια των θαλασσιών κυμάτων, μετατρέπεται σε ηλεκτρική, μέσω καταλλήλων διατάξεων.

Η γεωθερμική ενέργεια, είναι γενικά η θερμότητα εσωτερικών στρωμάτων της γης, η οποία γίνεται εκμεταλλεύσιμη όταν υπάρχουν κατάλληλες γεωλογικές συνθήκες.

Η βιομάζα συνίσταται από τα πάσης φύσεως γεωργικά και δασικά υπολείμματα, από τα οποία με κατάλληλες θερμοχημικές επεξεργασίες μπορούμε να λάβουμε καύσιμα.



Σχ. 1.9 Παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ στο τέλος του 2006

### 1.5.1 Τα πλεονεκτήματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν να έχουν σημαντική συμβολή στην προσπάθεια μείωσης των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου, καθώς είναι οι μόνες πηγές ενέργειας που δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον με εκπομπές αυτών. Ξέχωρα όμως από τα στενά πλαίσια αντιμετώπισης του φαινομένου του θερμοκηπίου τα χαρακτηριστικά των ΑΠΕ τις καθιστούν συστατικό στοιχείο μιας νέας αναπτυξιακής πολιτικής και μοναδική μακροπρόθεσμη απάντηση στην πορεία προς την βιώσιμη ανάπτυξη. Τα οφέλη που προκύπτουν από την εκμετάλλευση των ΑΠΕ δεν είναι μόνο περιβαλλοντική φύσης. Η



αξιοποίηση αυτών των ενδογενών ενεργειακών πόρων μπορεί να επιφέρει επίσης σημαντικές θετικές κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις στην περιφερειακή και την τοπική ανάπτυξη. Παρά γεγονός ότι απαιτείται ένα σημαντικό κεφάλαιο για την αρχική τους εγκατάσταση και εξοπλισμό, το λειτουργικό το λειτουργικό τους κόστος είναι αμελητέο και τα αποτελέσματά τους ιδιαίτερα σημαντικά.

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των ΑΠΕ είναι τα εξής :

- Είναι πρακτικά ανεξάντλητες πηγές ενέργειας, (η διαθέσιμη ισχύς που μας περιβάλλει παγκοσμίως υπολογίζεται σε 87.000 TW, τη στιγμή που η παγκόσμια κατανάλωση περιορίζεται στα 'μόλις' 15 TW, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.10), και συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από τους εξαντλήσιμους πόρους (ορυκτά καύσιμα).
- Είναι εγχώριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής αυτόρκειας και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε τοπικό και εθνικό επίπεδο.
- Προσφέρουν τη δυνατότητα ορθολογικής αξιοποίησης των ενεργειακών πόρων καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα των ενεργειακών αναγκών των χρηστών.
- Είναι γεωγραφικά διάσπαρτες και οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, παρέχοντας τη δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών αναγκών σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, αποσυμφορίζοντας έτσι τα συστήματα υποδομής και μειώνοντας τις απώλειες από την μεταφορά μεγάλων ποσών ενέργειας.
- Συνήθως έχουν χαμηλό λειτουργικό κόστος που δεν επηρεάζονται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων (πετρέλαιο, Φ.Α, κτλ).
- Οι εγκαταστάσεις εκμετάλλευσης των ΑΠΕ που σχεδιάζονται για να καλύψουν τις ανάγκες των χρηστών, έχουν μικρή διάρκεια κατασκευής, επιτρέποντας έτσι τη γρήγορα ανταπόκριση της προσφοράς προς τη ζήτηση ενέργειας.
- Οι επενδύσεις των ΑΠΕ χαρακτηρίζονται ως εντάσεως εργασίας, συμβάλλουν δηλαδή στη δημιουργία πολλών θέσεων εργασίας ιδιαίτερα σε τοπικό αλλά και Εθνικό επίπεδο.
- Τέλος είναι φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο και η αξιοποίησή τους είναι γενικά αποδεκτή από το κοινωνικό σύνολο.



Σχ. 1.10 Το παγκόσμιο ενεργειακό δυναμικό των ΑΠΕ.

## 1.6 Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Από τις τεχνολογίες τω ΑΠΕ, η αιολική ενέργεια και τα φωτοβολταϊκά, έχουν σημειώσει εντυπωσιακούς ρυθμούς αύξησης τα τελευταία χρόνια. Ο μέσος όρος του ετήσιου ρυθμού ανάπτυξης της αγοράς στην Ευρώπη τα τελευταία δέκα χρόνια για την αιολική ενέργεια είναι 40%, ένα ποσοστό ανάπτυξης που του έχουν επιτύχει μόνο η βιομηχανία ηλεκτρονικών υπολογιστών και ο τομέας των τηλεπικοινωνιών. Η αγορά των φωτοβολταϊκών στην Ευρώπη έχει επιδείξει ένα ρυθμό ανάπτυξης της τάξης του 45% κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας.

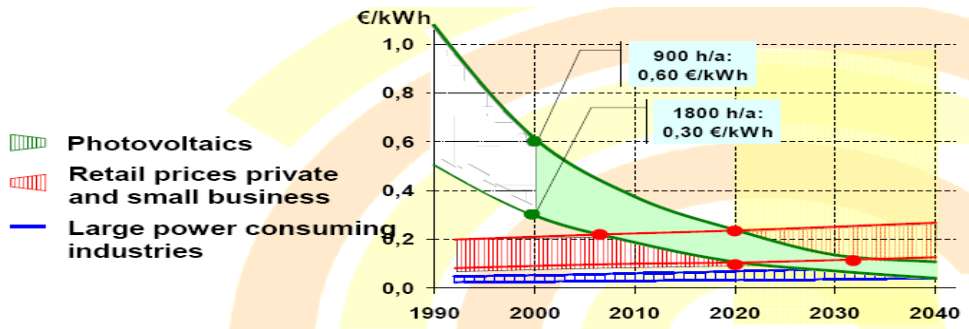
Το 2008 στην ΕΕ η αιολική ενέργεια ξεπέρασε σε νέες εγκαταστάσεις όλες τις άλλες πηγές ενέργειας. Το 43% όλων των νέων εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ ήταν έργα αιολικής ενέργειας. Συνολικά στην Ευρώπη το 2008 προστέθηκαν 19.651 MW ηλεκτρικής ισχύος, από τα οποία τα 8.484 MW αιολική ενέργεια, τα 6.932 MW φυσικό αέριο, τα 2.495 MW πετρέλαιο, τα 762 MW κάρβουνο και τα 473 MW υδροηλεκτρικά. Στο τέλος του 2008 το σύνολο των αιολικών εγκαταστάσεων στην ΕΕ ανέρχεται σε 64.949 MW, αντιστοιχεί σε αύξηση 15% από το 2007 και ισοδυναμεί με την καθημερινή εγκατάσταση 20 νέων ανεμογεννητριών.

Στα τέλη του 2008, 160.000 εργαζόμενοι απασχολούνται άμεσα ή έμμεσα στην αιολική βιομηχανία, ενώ οι επενδύσεις στην ΕΕ ανήλθαν σε 11 δισ. ευρώ. Η ενέργεια που θα παραγάγουν σε μια φυσιολογική χρονιά τα 64.949 MW των ανεμογεννητριών στην Ευρώπη καλύπτει το 4,2% της ηλεκτρικής ζήτησης και αποτρέπει την εκπομπή 108 εκατομμυρίων τόνων διοξειδίου του άνθρακα ετησίως, που ισοδυναμεί με την απόσυρση 50 εκατομμυρίων αυτοκινήτων.

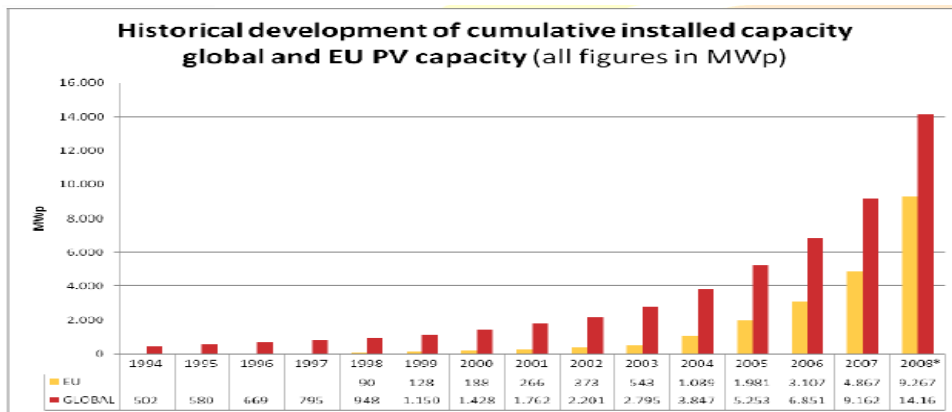
Η Γερμανία και η Ισπανία εξακολουθούν να μονοπωλούν την κορυφή του ευρωπαϊκού πίνακα αιολικών εγκαταστάσεων. Η Γαλλία, η Ιταλία και το Ηνωμένο Βασίλειο είχαν ικανοποιητική ανάπτυξη ξεπερνώντας τα 3.000 MW. Υπάρχουν 12 κράτη-μέλη που ξεπέρασαν τα 1.000 MW, μεταξύ τους και η Ελλάδα. Εντυπωσιακές μεταξύ των νέων κρατών-μελών είναι η Ουγγαρία, που διπλασίασε την εγκατεστημένη ισχύ της, φθάνοντας τα 127 MW, η Βουλγαρία, που την τριπλασίασε από τα 57 MW στα 158 MW, και η Πολωνία, που σχεδόν τη διπλασίασε στα 472 MW από τα 276 MW. Από τα μη κράτη-μέλη εντυπωσιακή ήταν η Τουρκία που τριπλασίασε την εγκατεστημένη ισχύ από 147 MW σε 433 MW. Τα θαλάσσια αιολικά πάρκα είχαν μια αύξηση 357 MW κατά το 2008, και έφθασαν τα 1.471 MW.

Αλλά και παγκοσμίως το 2008 εγκαταστάθηκαν περισσότερα από 27.000 MW, κυρίως στη Β. Αμερική, στην Ευρώπη και στην Ασία. Η παγκόσμια αύξηση ήταν 27 GW, ανεβάζοντας την παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύ σε 120,8 GW. Τα 120 GW της αιολικής ενέργειας θα παραγάγουν 260 TWh ηλεκτρικής ενέργειας και θα αποτρέψουν την εκπομπή 158 εκατομμυρίων τόνων CO<sub>2</sub> ετησίως. Η παγκόσμια αγορά αιολικών εγκαταστάσεων το 2008 ανήλθε σε 36,5 δισ. Ευρώ. Η αιολική ενέργεια είναι πολύ συχνά η πιο ελκυστική επιλογή για νέους σταθμούς παραγωγής, για οικονομικούς λόγους, αλλά και για λόγους βελτίωσης της ενεργειακής ασφάλειας, χωρίς να αναφερθούμε σε περιβαλλοντικά και αναπτυξιακά οφέλη. Η αιολική βιομηχανία δημιουργεί και πολλές νέες θέσεις εργασίας: περισσότεροι από 400.000 εργαζόμενοι απασχολούνται στη βιομηχανία και σύντομα θα γίνουν εκατομμύρια. Στις ΗΠΑ η μεγάλη ανάπτυξη του 2008 αντιστοιχεί σε 50% αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος. Τα νέα αιολικά έργα του 2008 καλύπτουν το 42% όλων των νέων σταθμών παραγωγής ενέργειας που κατασκευάστηκαν το 2008, ενώ δημιούργησαν 35.000 νέες θέσεις εργασίας.

Η μείωση των τιμών των φωτοβολταϊκών συστημάτων, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.11, την προηγούμενη περίοδο αποτελούν εγγύηση για το γεγονός ότι οι υψηλοί ρυθμοί ανάπτυξης. Σήμερα στην Ευρώπη είναι εγκατεστημένα περισσότερα από 9,2 GWp, ενώ πριν από μια δεκαετία μόλις 0,09 GWp, μια εκρηκτική αύξηση όπως χαρακτηρίστηκε φαίνεται στο σχήμα 1.12, η οποία αναμένεται να συνεχιστεί και τα επόμενα χρόνια.



Σχ. 1.1 Η πορεία εξέλιξης της τιμής των φωτοβολταϊκών



Σχ. 1.12 Η εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος σε φωτοβολταϊκά σε ΕΕ- κόσμος

Για τα μικρά υδροηλεκτρικά και τη γεωθερμία οι ρυθμοί ανάπτυξης που προβλέφθηκαν από τη πράσινη βίβλο είναι αρκετά χαμηλοί, και όπως φαίνεται οι στόχοι θα πρέπει να επιτευχθούν χωρίς σημαντικό πρόβλημα.

Η βιομάζα έχει την πιο σημαντική συμβολή στην επίτευξη του στόχου από τη πράσινη βίβλο. Παρά το γεγονός ότι σημειώθηκε μια σημαντική αύξηση της βιομάζας την περίοδο 1999 έως 2008 της τάξης του 100%, οι ρυθμοί ανάπτυξης πρέπει να αυξηθούν σημαντικά περισσότερο προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι.

Παρόμοια είναι η κατάσταση όσον αφορά και τους ηλιακούς συλλέκτες.

Η παρούσα κατάσταση ανάπτυξης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως περιγράφηκε εν συντομία παραπάνω δείχνει ότι οι στόχοι της πράσινης βίβλου είναι εφικτοί υπό την προϋπόθεση ότι οι ισχύουσες υποστηρικτικές δράσεις σε επίπεδο κοινότητας καθώς και σε εθνικό και περιφερειακό επίπεδο θα συνεχιστούν και ότι επιπλέον δραστηριότητες που υποστηρίζουν και προαχθούν τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θα υιοθετηθούν, ιδιαίτερα

όσον αφορά τους τομείς εκείνους των οποίων οι ρυθμοί ανάπτυξης είναι χαμηλότερη των αναμενομένων.

## 1.6 Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στην Ελλάδα

Μέχρι το 1994, η αξιοποίηση και χρήση των ΑΠΕ, περιορίστηκε :

(α) σε ότι αφορά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, σχεδόν όπου αποκλείστηκα στις πρωτοβουλίες της ΔΕΗ, παραδοσιακά μεν στον τομέα των μικρών υδροηλεκτρικών έργων και αργότερα με τις πρώτες αξιόλογες εγκαταστάσεις αιολικών πάρκων και λίγων μικρών φωτοβολταϊκών συστημάτων σε απομονωμένες περιοχές της χώρας,

(β) σε ότι αφορά στην παραγωγή θερμότητας, παραδοσιακά μεν στη χρήση της βιομάζας, κυρίως στις αγροτικές περιοχές της χώρας και από την δεκαετία του '70 στην εκτεταμένη χρήση των ηλιακών θερμοσιφώνων για την θέρμανση νερού.

Το νέο θεσμικό πλαίσιο που διαμορφώνεται μετά το 1994, διευκόλυνε σημαντικά την προώθηση της χρήσης των ΑΠΕ. Σήμερα το ευνοϊκό, μακροπρόθεσμο νομικό πλαίσιο της Ελλάδας για τις ΑΠΕ διασφαλίζει τις επενδύσεις στον κλάδο και έχει κερδίσει την εμπιστοσύνη μεγάλων επενδυτών. Ο συνδυασμός εξασφαλισμένων υψηλών τιμών και επενδυτικών κινήτρων λειτούργησε καταλυτικά στην ουσιαστική προώθηση των ΑΠΕ στον ελληνικό χώρο, ο ιδιωτικός ιδιαίτερα τομέας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ παίζει σημαντικό ρόλο στην επέκταση αυτών.

Η συμμετοχή των ΑΠΕ στην εγχώρια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (εξαιρώντας τα μεγάλα υδροηλεκτρικά) παρουσιάζει έντονα ανοδική πορεία διαχρονικά – κυρίως μετά το 1999. Συνολικά η εγκατεστημένη ισχύς σε ΑΠΕ ανερχόταν (βλέπε σχήμα 1.13) στα 4.066 MW στο τέλος του 2007 και 1.048 MW αν εξαιρέσουμε τα μεγάλα υδροηλεκτρικά (σε σχέση με 159 MW το 1999). Σήμερα λειτουργούν συνολικά στη χώρα μας 4,22 GW έργων σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, (στο σχήμα 1.14 βλέπουμε την κατανομή των καυσίμων στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για το Ελληνικό σύστημα), εκ των οποίων 3,02 GW σε μεγάλα υδροηλεκτρικά, 1 GW σε αιολικά πάρκα και 0,15 GW σε μικρά υδροηλεκτρικά και λοιπά έργα φωτοβολταϊκών και βιοαερίου.

Πίνακας Ι: Εγκατεστημένη Ισχύς Έργων ΑΠΕ (2005-2008).

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ	ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (ΜΣ)			
	2005	2006	2007	2008
ΑΙΟΛΙΚΑ	576,09	749,27	853,62	1015,56
ΒΙΟΜΑΖΑ	20,54	37,58	37,57	39,4
ΜΥΗΣ	48,16	73,68	95,5	158,42
Φ/Β	0,51	0,68	0,74	10,98
ΣΥΝΟΛΟ	645,3	861,21	987,43	1224,36

Πηγή: ΔΕΣΜΗΕ, ΔΕΗ Α.Ε - Δ/ση Διαχείρισης Νησιών.

Σχ. 1.13 Η εγκατεστημένη ισχύς σε MW.

Οι συγκεκριμένες εγκαταστάσεις (εξαιρώντας τα μεγάλα υδροηλεκτρικά), αν και απο ελο ύ το 7 % της συνολικής ισχύος συμβάλλο w μό λς κατά 4% στη συνολική ηλεκτροπαραγωγή. Πάντως οι νέες αδειοδοτήσεις στο χώρο των ΑΠΕ κινούνται με χαμηλούς ρυθμούς, καθιστώντας επί της ουσίας ανέφικτη την υλοποίηση των στόχων για την ενέργεια. Ο επίσημος στόχος για τον οποίο έχει δεσμευτεί η χώρα μας ως το 2010 είναι το 20,1% της ηλεκτροπαραγωγής να προέρχεται από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Ενώ σήμερα βρισκόμαστε στο 9%. Ενώ η Ελλάδα είναι νομικά δεσμευμένη να εξασφαλίσει συνεισφορά των ΑΠΕ κατά 30-35% στην τελική κατανάλωση ηλεκτρισμού το 2020. Επομένως, ακόμα κι αν υποθέσουμε σταθεροποίηση της κατανάλωσης στα σημερινά επίπεδα, και υποθέτοντας συνεισφορά 7-8% των μεγάλων υδροηλεκτρικών, θα πρέπει σε μόλις 12 χρόνια η παραγωγή από νέες ΑΠΕ σχεδόν να δεκαπλασιαστεί.



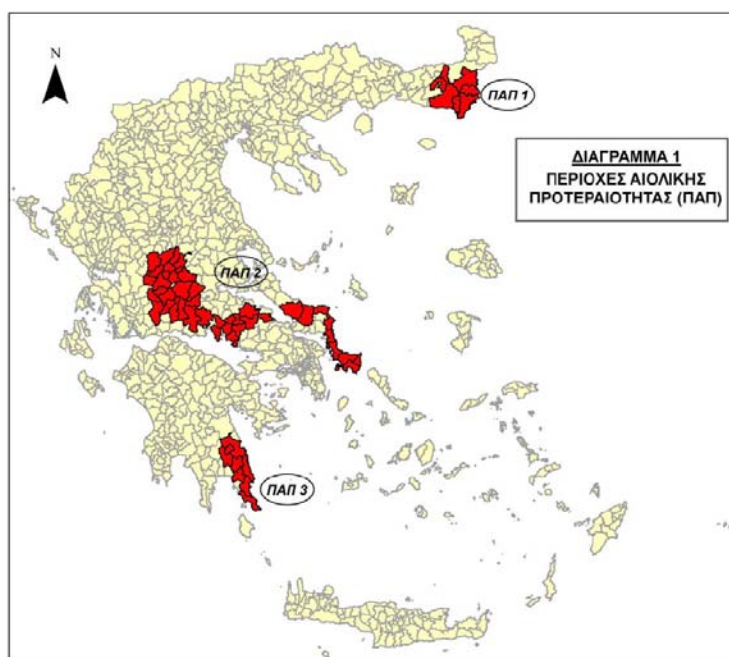
Σχ. 1.14 Συμμετοχή καυσίμων για την παραγωγή ηλεκτρισμού

## 1.7 Αναλυτικά τα δεδομένα

### 1.7.1.1 Η αιολική ενέργεια

Με τη χώρα μας να διαθέτει τεχνικά εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό της τάξης των 11.000-14.000 MW, με βάση τις σημερινές τεχνολογικές δυνατότητες και τους βασικούς περιορισμούς χωροθέτησης αιολικών πάρκων για ταχύτητες ανέμου πάνω από 6m/sec.

Η ηλεκτροπαραγωγή από ανεμογεννήτριες εκτιμάται ότι θα προσεγγίσει τελικά τις 12.000 GWh το 2020, περίπου 5.000 MW -με αρχικό στόχο τις 6,6 GW- εγκατεστημένης ισχύος, καλύπτοντας έτσι το 15% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Όλες οι περιφέρειες της χώρας εμφανίζουν αξιόλογο αιολικό δυναμικό, το μεγαλύτερο όμως ποσοστό του συγκεντρώνεται στις νησιωτικές περιοχές, την Ανατολική Στερεά Ελλάδα και την Ανατολική Πελοπόννησο όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 1.15.



Σχ. 1.15 Περιοχές στην Ελλάδα με αυξημένο αιολικό δυναμικό

Μέχρι το 1998 είχαν εγκατασταθεί στην Ελλάδα μόνο 24MW από τη ΔΕΗ και 15MW από άλλους φορείς. Στο νέο πλαίσιο που διαμορφώθηκε με την εμπλοκή και του ιδιωτικού τομέα η κατάσταση άλλαξε ριζικά με εντυπωσιακή αύξηση της αιολικής ενέργειας από 214MW το '00 και 366MW το 2003 σε 1 GW περίπου σήμερα. Παρ' όλα αυτά θα πρέπει να τονίσουμε ότι ολόκληρο λοιπόν το 2007 εγκαταστάθηκαν στη χώρα μας μόνο 125 MW αιολικών πάρκων, όταν στο ίδιο αυτό χρονικό διάστημα εγκαταστάθηκαν στην Ισπανία 3.522 αιολικά MW (σύνολο εγκατεστημένης αιολικής ισχύος στο τέλος του 2007: 15.145 MW), στη Γερμανία 1.667 MW (22.247 MW), στη Γαλλία 888 MW (2.454 MW), στην Ιταλία 603 MW (2.726 MW), στην Πορτογαλία 434 MW (2.150 MW), στη Μ. Βρετανία 427 MW (2.389 MW), στη Σουηδία 217 MW (788 MW) και στην Ολλανδία 210 MW (1.746 MW). Ενδεικτικά της γραφειοκρατίας και των καθυστερήσεων που παρουσιάζει η χώρα μας.

Ενημερωτικά παρατίθεται πίνακας με τους παραγωγούς αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα για το έτος 2007 όπως φαίνεται στο σχήμα 1.16.

### 1.7.1.2 Φωτοβολταϊκά συστήματα

Η Ελλάδα παρ' ότι παρουσιάζει σημαντικές προϋποθέσεις για εφαρμογή των φωτοβολταϊκών συστημάτων, παραμένει μια από τις τελευταίες στην Ευρωπαϊκή Ένωση από πλευρά εγκατεστημένης ισχύος 336KW το 2000 και 0.5 MW το 2002 ενώ σήμερα προσεγγίζει τα 11 MW.

Οι επενδυτές αρχίζουν να διαπιστώνουν τις υψηλές προοπτικές της ηλιακής ενέργειας στην ελληνική αγορά. Κατά τους καλοκαιρινούς μήνες που η ένταση της ακτινοβολίας βρίσκεται στο μέγιστο σημείο, αυξάνεται και η ζήτηση για ηλιακή ενέργεια, λόγω των εκατομμυρίων τουριστών. Επιπλέον, αυξάνεται η ανάγκη για ενέργεια στις αγροτικές περιοχές και τα νησιά που είναι αναπτυσσόμενες περιοχές. Ενώ παράλληλα, κρατικοί φορείς, η βιομηχανία και πολλά ξενοδοχεία έχουν δείξει ενδιαφέρον για τη χρήση φωτοβολταϊκής ενέργειας.



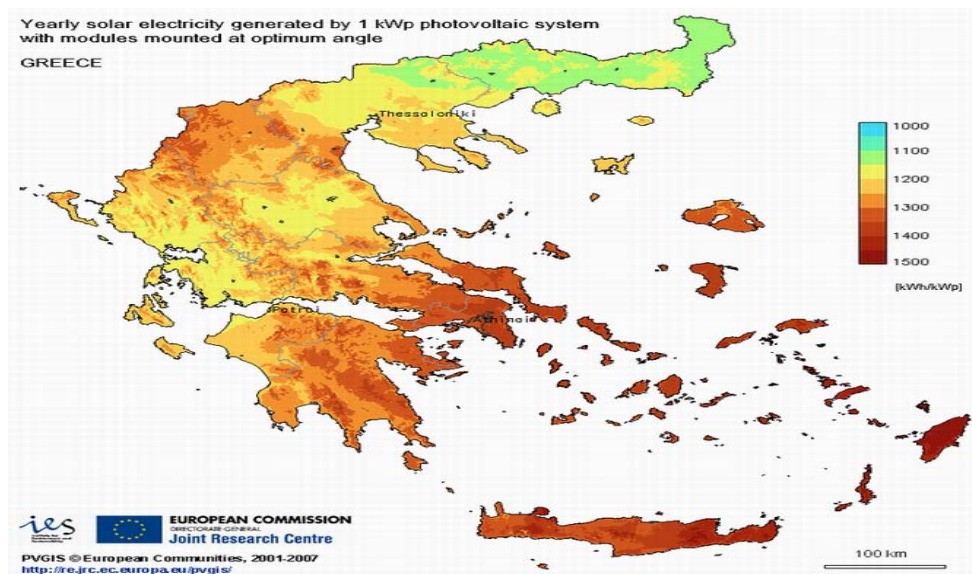
## Ο επενδυτικός αιολικός χάρτης

Ιδιοκτήτης	Ισχύς (MW)	Αριθμ. Α/Γ	%
ΡΟΚΑΣ ΑΒΕΕ	184,60	244	21,2
ΤΕΡΝΑ	117,97	114	13,5
EDF	75,35	33	8,7
ΔΙΕΘΝΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗ	79,03	91	9,1
ΕΥΝΙΣΕ	40,00	20	4,6
ΔΕΗ Α.Ε.	36,25	150	4,2
ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝ. ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ ΑΒΕΕ	36,00	12	4,1
ΑΚΚΙΟΝΑ	34,85	41	4,0
ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΛΛΑΣ ΑΒΕΕ	30,00	10	3,4
ΕΛΛΗΝ. ΤΕΧΝΟΔΟΜΙΚΗ	29,50	43	3,4
ENERCON ΕΛΛΑΣ Α.Ε.	27,50	55	3,2
ENERGI E2	20,40	34	2,3
ΟΜΙΛΟΣ ΜΥΤΙΛΗΝΑΙΟΥ	17,00	20	2,0
ΙΒΕΡΔΡΟΛΑ	17,00	20	2,0
ΠΟΛΥΠΟΤΑΜΟΣ Α.Ε.	12,00	20	1,4
ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΚΡΗΤΗΣ	11,90	14	1,4
ΔΕΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ - Χ. ΡΟΚΑΣ ΑΒΕΕ	8,40	14	1,0
ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΜΠΟΥΡΛΑΡΙ	7,80	13	0,9
WRE ΕΛΛΑΣ Α.Ε.	6,60	9	0,8
ΔΟΜΙΚΗ ΚΡΗΤΗΣ Α.Ε.	5,95	7	0,7
ΜΕΛΤΕΜΙ ΚΑΣΤΡΙ ΑΒΕΤΕ	5,00	10	0,6
ΚΑΠΕ	3,12	6	0,4
ΔΙΑΦΟΡΟΙ	64,70	116	7,4
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>870,91</b>	<b>1.096,00</b>	<b>100</b>

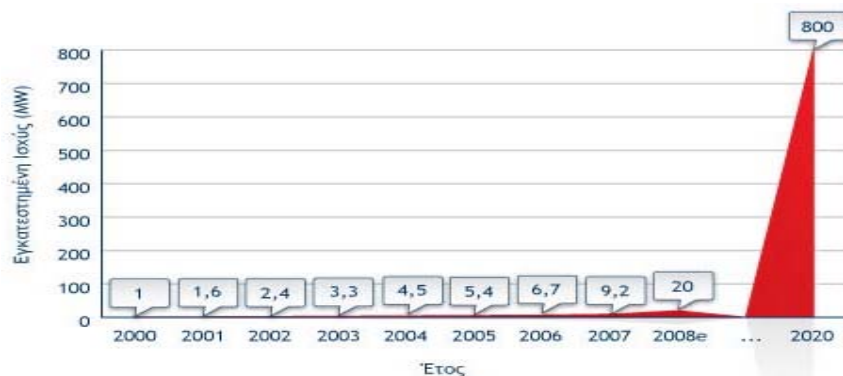
Πηγή: ΕΛΕΤΑΕΝ

Σχ. 1.16 Πίνακας παραγωγών αιολικής ενέργειας για το έτος 2007.

Τα επίπεδα ηλιοφάνειας είναι ιδιαίτερα υψηλά για τη χώρα μας, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.17, και επιπλέον διαθέτουμε πλήθος νήσων μη συνδεδεμένων με το κεντρικό δίκτυο της χώρας, όπου η λύση των φωτοβολταϊκών είναι ήδη οικονομικά ανταγωνιστική. Δεδομένου ότι το επενδυτικό ενδιαφέρον αυξήθηκε σημαντικά την τελευταία περίοδο μια παράλληλη ανάπτυξη εφαρμογών προς τις τρεις βασικές κατευθύνσεις κεντρική σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής, προσαρμοσμένα συστήματα σε κτίρια, αυτόνομα συστήματα μπορεί να οδηγήσει στην εγκατάσταση 800 MW φωτοβολταϊκών συστημάτων μέχρι το 2020 όπως φαίνεται στο σχήμα 1.18 από εκτιμήσεις του ΚΑΠΕ.



Σχ. 1.17 Χάρτης πυκνότητας ηλιακής ενέργειας στην Ελλάδα



Σχ. 1.18 Πρόβλεψη του ΚΑΠΕ για παραγωγή από φωτοβολταϊκά το 2020.

### 1.7.1.3 Υδροηλεκτρικά

Η κατασκευή των υδροηλεκτρικών είναι μια πολύ παλιά και γνωστή η τεχνολογική εφαρμογή. Το δυναμικό των μεγάλων υδροηλεκτρικών είναι περιορισμένο γιατί αφενός έχει ήδη γίνει σε μεγάλο βαθμό η εκμετάλλευση του και αφετέρου η δημιουργία νέων μονάδων παρουσιάζει δυσκολίες λόγω των περιβαλλοντικών προβλημάτων που δημιουργεί. Αντίθετα, το δυναμικό των μικρών υδροηλεκτρικών είναι αρκετά μεγάλο και ανεκμετάλλευτο σε μεγάλο βαθμό μέχρι σήμερα.

Μέχρι το 2002 η ΔΕΗ είχε εγκαταστήσει και θέση σε λειτουργία 3060 MW μεγάλων υδροηλεκτρικών, ενώ στο πρόγραμμά της προβλέπει την εγκατάσταση επιπλέον 600 MW περίπου μέχρι το 2010.

Το οικονομικά εκμεταλλεύσιμων δυναμικό των μικρών υδροηλεκτρικών εκτιμάται από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο σε 1600 MW για μεγέθη μικρότερα των 5 MW. Το αντίστοιχο τεχνικά εκμεταλλεύσιμο δυναμικό υπερβαίνει τις 30.000 MW.

Μέχρι σήμερα έχουν εγκατασταθεί 160 MW προερχόμενα από μικρά υδροηλεκτρικά (ΜΗΣ). Ενώ ο στόχος για το 2020 είναι τα 3.9 GW, αύξηση στους ΜΗΣ κατά 150 MW δηλαδή διπλασιασμός της σημερινής δυναμικότητάς τους.

### 1.7.1.4 Γεωθερμική ενέργεια

Η Ελλάδα διαθέτει έναν πλούτο γεωθερμικών πηγών, που προσφέρουν αμέτρητες ευκαιρίες επένδυσης στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, σε εμπορικές εφαρμογές ή αγροτικές χρήσεις. Η γεωγραφική θέση της χώρας ευνοεί τις γεωθερμικές πηγές, υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας. Οι πηγές υψηλής θερμοκρασίας είναι κατάλληλες για την παραγωγή ενέργειας, καθώς και για θέρμανση και ψύξη και εντοπίζονται σε βάθος 1-2 χιλιομέτρων στα νησιά της Μήλου, Σαντορίνης και Νισύρου. Επίσης, πηγές υψηλής θερμοκρασίας έχουν εντοπιστεί στα νησιά της Λέσβου, Χίου και Σαμοθράκης σε βάθος 2-3 χιλιομέτρων, καθώς και στα λεκανοπέδια της Κεντρικής-Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης. Επίσης σημαντική συνεισφορά μπορούν να έχουν οι λεγόμενες γεωθερμικές αντλίες θερμότητας, που εκμεταλλεύονται το γεγονός της σταθερής θερμοκρασίας του εδάφους σε βάθος 15 έως 100 μέτρα. Η εφαρμογή τους για παροχή θέρμανσης, ψύξης και ζεστού νερού έχει ήδη αρχίσει σε πολλές χώρες τα τελευταία χρόνια.



### 1.7.1.5 Αξιοποίηση της βιομάζας

Το δυναμικό της βιομάζας στην Ελλάδα από τα αγροτικά και δασικά υπολείμματα είναι εξαιρετικά μεγάλο. Εκτιμάται συνολικά σε 12.000 τεο, το οποίο ισοδυναμεί με το 30% της σημερινής ακαθάριστης εγχώριας κατανάλωσης. Το μεγαλύτερο δυναμικό εντοπίζεται στις περιοχές των μεγάλων καλλιεργειών στην κεντρική και βόρεια Ελλάδα. Αν σε αυτό προστεθεί και το δυναμικό που προκύπτει από τη δυνατότητα αξιοποίησης ενεργειακών καλλιεργειών αντιλαμβάνεται κανείς ότι οι δυνατότητες εκμετάλλευσης της βιομάζας για ενεργειακούς σκοπούς είναι τεράστιες.

Δεδομένου όμως του σχετικά χαμηλού ρυθμού ανάπτυξης της χρήσης βιομάζας των τελευταίων ετών, που οφείλεται κύρια στη δυσκολία προσαρμογής της αγροτικής οικονομίας σε νέες διαδικασίες και μεθόδους και την περιπλοκότητα των εφαρμογών βιοενέργειας, ένας στόχος για την Ελλάδα είναι ως το 2020 είναι τα 300 MW. Τα προβλεπόμενα μεγέθη θα προέρχονται από τρεις διαφορετικές χρήσεις :

- Συμπαράγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού
- Παραγωγή θερμότητας
- Παραγωγή υγρών βιοκαυσίμων

### 1.7.1.6 Θερμικά ηλιακά συστήματα

Τα ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού για οικιακή χρήση γνώρισαν εντυπωσιακή εξάπλωση τα τελευταία είκοσι πέντε χρόνια στην Ελλάδα. Οι εγκατεστημένοι συλλέκτες σήμερα είναι 3.000.000 m<sup>2</sup> σε σύνολο περίπου 13.500.000 m<sup>2</sup> στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Παράλληλα αναπτύχθηκε η εγχώρια βιομηχανία κατασκευής η οποία κατέχει το 30% της αγοράς στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Η ελληνική βιομηχανία είναι παρούσα με σημαντικές εξαγωγές στις εντυπωσιακά αναπτυσσόμενες αγορές της Αυστρίας και της Γερμανίας. Παρ όλη τη μεγάλη ανάπτυξη των εφαρμογών στον ελληνικό χώρο υπάρχουν ακόμη σημαντικές δυνατότητες για την περαιτέρω ανάπτυξη της αγοράς αυτών των συστημάτων. Ο ρυθμός εγκαταστάσεις των ηλιακών συλλεκτών έχει σταθεροποιηθεί περίπου στα 150.000 m<sup>2</sup> ετησίως. Οι μέχρι σήμερα εφαρμογές αφορούν κατά 95% την εγκατάσταση οικιακών θερμοσιφωνικών συστημάτων. Το 5% αφορά κεντρικά ηλιακά συστήματα που έχουν εγκατασταθεί κυρίως σε ξενοδοχεία, βιομηχανίες, ειδικά κτίρια και θερμοκήπια. Οι εφαρμογές στον ευρύτερο Δημόσιο τομέα είναι ελάχιστες και αντιστοιχούν σε περίπου 0,5% της εγκατεστημένης επιφάνειας συλλεκτών. Μέχρι σήμερα υπάρχουν επίσης ελάχιστα παραδείγματα εφαρμογών για ψύξη και θέρμανση. Η διείσδυση σε μεγάλη κλίμακα σε όλους αυτο ίς το υς το μείς είναι ώριμη και εφικτή. Αλλά και τα περιθώρια κλασικών οικιακών εφαρμογών είναι ακόμη μεγάλα. Εκτιμάται ότι οι εγκαταστάσεις ηλιακών συλλεκτών μπορούν να φτάσουν ακόμη και τα 7.000.000 m<sup>2</sup> μέχρι το 2015.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### 2.1 Εισαγωγή στις επαγωγικές μηχανές

Από τα διάφορα είδη ηλεκτρικών μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος, ο τριφασικός ασύγχρονος ή επαγωγικός κινητήρας (induction motor), χρησιμοποιείται ευρύτατα στις βιομηχανικές εφαρμογές. Ενδεικτικό της καθολικής χρήσης της μηχανής αυτής είναι ότι, οι επαγωγικοί κινητήρες απορροφούν το 60% περίπου, της συνολικά παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Τα πλεονεκτήματα του ασύγχρονου κινητήρα, με κυριότερο την απλή κατασκευαστική δομή του δρομέα, θα εξηγηθούν στη συνέχεια. Οι επαγωγικές μηχανές χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά ως κινητήρες, εξαιτίας των μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν όταν λειτουργούν ως γεννήτριες.

Η αρχή λειτουργίας των ασύγχρονων κινητήρων διατυπώθηκε από τον N. Tesla (Εικόνα 1.1) στα τέλη της δεκαετίας του 1880. Επαγωγικοί κινητήρες με μορφή αντίστοιχη της σημερινής, ήταν εμπορικά διαθέσιμοι από το 1896. Από τότε έως το 1970, οι βελτιώσεις στην ποιότητα των υλικών κατασκευής, στις τεχνικές χύτευσης και στη μόνωση των τυλιγμάτων, επέτρεψε τη δραστική μείωση του μεγέθους και του κόστους κατασκευής των επαγωγικών κινητήρων. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι ένας σημερινός ασύγχρονος κινητήρας των 100hp, έχει τις ίδιες διαστάσεις με ένα κινητήρα 7.5hp του 1897.

Η μείωση στις διαστάσεις των επαγωγικών κινητήρων δεν είχε συνοδευτεί από ουσιαστική βελτίωση του βαθμού απόδοσης, έως την πετρελαϊκή κρίση του 1973, εξαιτίας του μικρού κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας. Όμως, στη συνέχεια, όλοι οι κατασκευαστές ανέπτυξαν επαγωγικούς κινητήρες με το χαρακτηρισμό υψηλής απόδοσης (high efficiency induction motors). Οι κινητήρες αυτοί, αν και έχουν μεγαλύτερο κόστος από τους τυπικούς επαγωγικούς κινητήρες, αποκτούν όλο και μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς. Η τυπική μορφή ενός επαγωγικού κινητήρα υψηλής απόδοσης εικονίζεται στο Σχήμα 2.1.

Σήμερα περισσότερο από το μισό της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται στις αναπτυγμένες χώρες μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια στις ηλεκτρικές μηχανές, ελευθερώνοντας το κοινωνικό σύνολο από τα δεσμά της χειρωνακτικής εργασίας. Ανάμεσα σε πολλούς τύπους ηλεκτρικών μηχανών, η τριφασικές ασύγχρονες μηχανές -μηχανές επαγωγής- συνεχίζουν να απολαμβάνουν την ίδια εμπιστοσύνη όπως και έναν αιώνα πριν. Τουλάχιστον το 90% των βιομηχανικών κινητήριων συστημάτων χρησιμοποιούν ασύγχρονους τριφασικούς κινητήρες, κατά πλειοψηφία με δρομέα τύπου κλωβού.

Η πλειοψηφία των ασύγχρονων μηχανών λειτουργεί χωρίς έλεγχο καθώς τροφοδοτούνται απευθείας από το εκάστοτε τριφασικό δίκτυο, ωστόσο το ποσοστό των υπό έλεγχο μηχανών που προορίζονται για συστήματα ελέγχου μεταβλητής ταχύτητας αυξάνει σταθερά καθώς οι μηχανές dc χρησιμοποιούνται σπανιότερα. Οι τελευταίες έχουν μειονεκτήματα όπως το υψηλό κόστος αγοράς, η αυξημένη αδράνεια του δρομέα, η κατασκευαστική πολυπλοκότητα και το υψηλό κόστος συντήρησης που προκύπτει λόγω των εγγενών προβλημάτων που συσχετίζονται με τη λειτουργία του συλλέκτη και των ψηκτρών, του συστήματος που πετυχαίνει την ανόρθωση της τάσεως σε μια dc μηχανή. Τα πλεονεκτήματα αυτών των μηχανών με σημαντικότερα τον απλό έλεγχό τους και την ταχεία απόκτηση ροπής δυσκολεύονται όλο και περισσότερο να αντισταθμίσουν τα μειονεκτήματα καθώς η εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος και των μικροεπεξεργαστών δίνει πλέον τη δυνατότητα υλοποίησης συστημάτων ελέγχου ac μηχανών υψηλής αποδόσεως, με βελτιστοποιημένες αποκρίσεις σε δυναμικές ή στατικές καταστάσεις λειτουργίας. Αντίθετα, η εξέλιξη στο σχεδιασμό των ηλεκτρικών μηχανών γίνεται με αργά

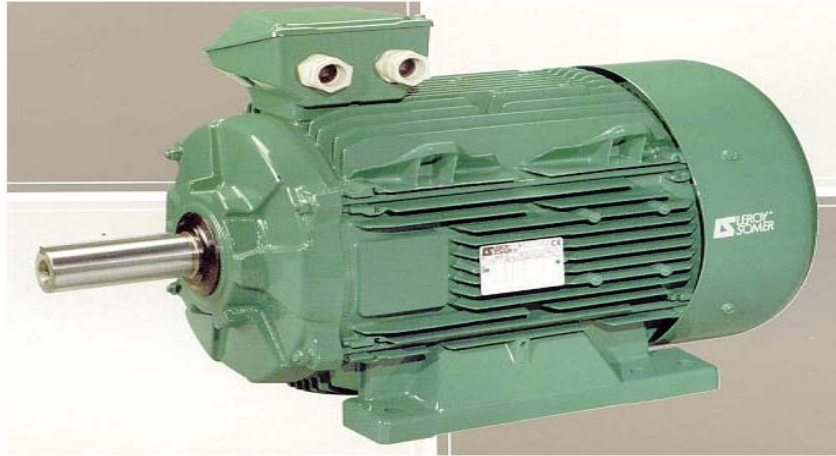
βήματα σε σχέση με τα πεδία των ηλεκτρονικών ισχύος και της αρχιτεκτονικής υπολογιστών, πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι η έρευνα και η ανάπτυξη σε αυτήν την περιοχή ξεκίνησε περισσότερο από εκατό χρόνια πριν, όταν ξεκίνησε και η κατασκευή των ηλεκτρικών μηχανών, και διαφαίνεται πως δεν θα υπάρξει κάποιος κορεσμός σε αυτό το πεδίο. Έτσι τα μειονεκτήματα των dc μηχανών, τα οποία κατά το πλείστον σχετίζονται με κατασκευαστικά ζητήματα φαίνεται να αποκτούν μεγαλύτερο ειδικό βάρος και να καταδικάζουν τις μηχανές συνεχούς ρεύματος σε περιορισμένη και μάλλον εξειδικευμένη χρήση σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος.



Εικ. Nicola Tesla

Ο Nicola Tesla γεννήθηκε στις 10 Ιουλίου 1865 στο Smilian της Αυστρίας, ήταν από τους πρωτοπόρους στον τομέα του ηλεκτρολόγου μηχανικού εφευρέτης της επαγωγικής μηχανής, ένθερμος υποστηρικτής του εναλλασσόμενου ρεύματος, σε αντίθεση με τον Τόμας Έντισον που ήταν υπέρ του συνεχούς ρεύματος και κατ' επέκταση της dc μηχανής, τα ενδιαφέροντα και οι ανακαλύψεις του κυριαρχούν στις μέρες μας όσο λίγων άλλων. Έζησε σε Αυστρία, Ουγγαρία, Γαλλία και ΗΠΑ όπου και απεβίωσε στις 7 Ιανουαρίου του 1943 στη Νέα Υόρκη σε ηλικία 86 ετών.

Έχει εκτιμηθεί ότι περισσότερα από πενήντα δισεκατομμύρια δολάρια θα μπορούσαν να εξοικονομηθούν ετησίως με αντικατάσταση όλων των μη ελεγχόμενων μηχανών με ελεγχόμενες. Τα οφέλη αυτά γίνονται ακόμη σημαντικότερα αν λάβουμε υπόψη μας την όλο και μεγαλύτερη βαρύτητα που δίνεται στα ενεργειακά ζητήματα τα τελευταία χρόνια όπως επιβάλλεται από τα νέα οικονομικά δεδομένα σε συνδυασμό με την ανάγκη για διοξίνη και αειφόρο ανάπτυξη φιλική προς το περιβάλλον. Παρότι η αρχή λειτουργίας των μηχανών επαγωγής έχει μείνει αναλλοίωτη, σημαντική τεχνολογική πρόοδος έχει επιτελεστεί, ειδικά τις τελευταίες δεκαετίες. Σε σύγκριση με τους προγόνους τους οι επαγωγικές μηχανές είναι μικρότερες, ελαφρύτερες, πιο αξιόπιστες και αποδοτικές. Οι αποκαλούμενες βιομηχανίες υψηλής απόδοσης στις οποίες τυλίγματα μειωμένης αντίστασης και σιδηρομαγνητικά υλικά χαμηλών απωλειών εξασφαλίζουν σημαντική μείωση κατανάλωσης ενέργειας, είναι ευρέως διαθέσιμες. Είναι ακριβότερες από τις συμβατικές μηχανές ωστόσο για τις περισσότερες εφαρμογές οι απλοί περίοδοι αποπληρωμής είναι μικρή. Μια συντηρητική εκτίμηση θέλει τη διάρκεια ζωής μιας επαγωγικής μηχανής να είναι 12 χρόνια. Συνεπώς η αντικατάσταση των συμβατικών συστημάτων με συστήματα αυξημένες αποδόσεως, αγορά που θα έχει καθαρή περίοδο αποπληρωμής λίγα χρόνια (περίπου 2), αποτελεί ζήτημα κοινής λογικής.



**Σχ. 2.1** Επαγωγική μηχανή υψηλής απόδοσης

Ο έλεγχος των μηχανών επαγωγής είναι πολύ πιο πολύπλοκος από αυτών των dc μηχανών. Οι δύο κύριες πηγές δυσκολιών είναι : η ανάγκη εξόδου μεταβλητής συχνότητας και η μη γραμμικότητα και πολυπλοκότητα του αναλυτικού μοντέλου της μηχανής που εντείνεται ακόμα περισσότερο αν ληφθεί υπόψη η αβεβαιότητα για τις τιμές των παραμέτρων του.

Ωστόσο, όπως είπαμε, οι ασύγχρονες μηχανές, όχι τυχαία, είναι τόσο διαδεδομένες στη βιομηχανία που σε πολλές εγκαταστάσεις είναι και οι μόνες που συναντώνται. Αυτές οι απλές στην κατασκευή και εύρωστες στη λειτουργία μηχανές, που επινοήθηκαν στα τέλη του 19ου αιώνα ακόμη διατηρούν αδιαμφισβήτητα την πρωτοκαθεδρία τους στις βιομηχανικές εφαρμογές καθώς υλοποιούν ένα απλό αλλά έξυπνο σχήμα ηλεκτρομηχανικής μετατροπής ενέργειας.

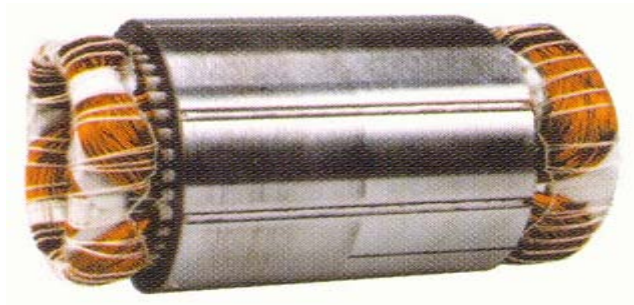
## **2.2 Κατασκευαστική δομή των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος**

Στις μηχανές συνεχούς ρεύματος ο στάτης αποτελείται από το ζύγωμα, πάνω στον οποίο στηρίζονται οι μαγνητικοί πόλοι. Οι μαγνητικοί πόλοι προεξέχουν από το κυλινδρικό ζύγωμα και ονομάζονται έκτυποι πόλοι (salient poles). Το τύλιγμα της διέγερσης, που φέρουν οι πόλοι του στάτη, τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα και παράγει ένα σταθερό και ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο. Το τύλιγμα του οπλισμού τοποθετείται σε αυλακώσεις, στον κυλινδρικό δρομέα.

Στις μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος, με έμφαση τις σύγχρονες γεννήτριες, οι ρόλοι του στάτη και του δρομέα είναι αντεστραμμένοι, σε σχέση με τις μηχανές συνεχούς ρεύματος. Η μορφή του δρομέα αλλάζει δραστικά, ανάλογα με το είδος της μηχανής εναλλασσόμενου ρεύματος. Ο δρομέας των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος μπορεί να έχει κυλινδρική δομή με αυλακώσεις, εντός των οποίων τοποθετείται το τύλιγμα. Εναλλακτικά, ο δρομέας μπορεί να έχει πόλους οι οποίοι να προεξέχουν (salient pole rotor), όπως οι πόλοι του στάτη στις μηχανές συνεχούς ρεύματος. Στην κατασκευαστική δομή του δρομέα των επαγωγικών κινητήρων, θα αναφερθούμε λεπτομερέστερα στη συνέχεια.

Αντίθετα από το δρομέα, ο στάτης όλων των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος έχει την ίδια κατασκευαστική δομή. Ο στάτης είναι μια κυλινδρική δομή από ελάσματα μονωμένα μεταξύ τους. Στο εσωτερικό του φέρει αυλακώσεις, μέσα στις οποίες τοποθετείται το

τύλιγμα του στάτη, όπως εικονίζεται στο Σχ. 2.2. Στη συνέχεια θεωρούμε ότι το τύλιγμα του στάτη είναι τριφασικό, οπότε η μηχανή χαρακτηρίζεται ως τριφασική. Όταν το τριφασικό τύλιγμα του στάτη διαρρέετε από ένα τριφασικό σύστημα ρευμάτων, αναπτύσσεται το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.



**Σχ. 2.2** Κατασκευαστική δομή του στάτη, των τριφασικών μηχανών

Εκτός από τις τριφασικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος, υπάρχουν οι μονοφασικές και οι διφασικές. Οι μηχανές αυτές φέρουν στο στάτη μονοφασικό ή διφασικό τύλιγμα αντίστοιχα. Η χρήση τους είναι περιορισμένη, σε σχέση με τις τριφασικές μηχανές, εξαιτίας των λειτουργικών μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν.

### **2.3 Αρχή λειτουργίας των επαγωγικών μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος**

Οι μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τις σύγχρονες (synchronous) και τις ασύγχρονες ή επαγωγικές μηχανές. Οι σύγχρονες μηχανές, αντίθετα από τις επαγωγικές, όπως είπαμε χρησιμοποιούνται κυρίως ως γεννήτριες.

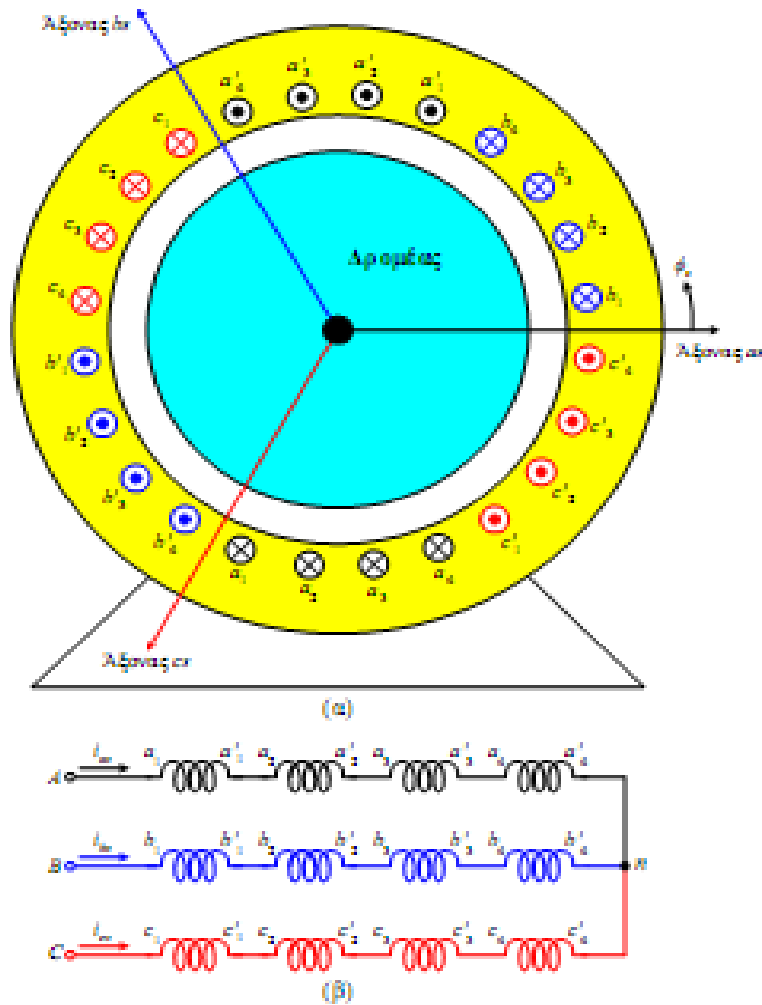
Οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, όλων των κατηγοριών, έχουν την ίδια αρχή λειτουργίας. Σύμφωνα μ' αυτή, ο δρομέας του κινητήρα στρέφεται από τη ροπή, η οποία τείνει να ευθυγραμμίσει τα μαγνητικά πεδία που αναπτύσσουν τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα.

Αν το μαγνητικό πεδίο του στάτη μπορούσε να στραφεί, τότε η αναπτυσσόμενη ροπή θα ανάγκαζε το δρομέα να ακολουθεί το μαγνητικό πεδίο του στάτη. Επομένως, η λειτουργία όλων κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος στηρίζεται στη δυνατότητα παραγωγής από το τύλιγμα του στάτη ενός στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου.

Στους σύγχρονους κινητήρες η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι ίση με την ταχύτητα που στρέφεται το πεδίο του στάτη. Αντίθετα, στους ασύγχρονους κινητήρες, η ταχύτητα του δρομέα είναι μικρότερη από εκείνη του στρεφόμενου πεδίου του στάτη και εξαρτάται από το μέγεθος του φορτίου.

### 2.3.1 Το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο

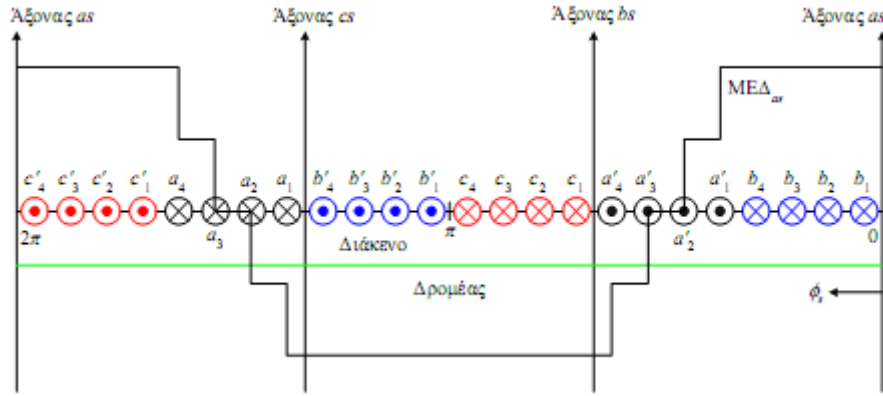
Όπως και στην ανάλυση των μηχανών συνεχούς ρεύματος, θεωρούμε αρχικά μια μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος, ο στάτης της οποίας φέρει ένα στοιχειώδες τριφασικό τύλιγμα. Το τύλιγμα του στάτη, όπως εικονίζεται στο Σχ. 2.3α, δημιουργεί ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο με δύο πόλους (διπολική μηχανή). Το τριφασικό τύλιγμα είναι σε σύνδεση αστέρα (Σχ. 2.3β).



Σχ. 2.3 (α) Τύλιγμα στάτη, (β) Τριφασικό τύλιγμα σε αστέρα

Στην τριφασική μηχανή, η κάθε φάση του τυλίγματος είναι μετατοπισμένη κατά  $120^\circ$ , σε σχέση με τις άλλες δύο. Οι άξονες  $a_s, b_s, c_s$ , δηλώνουν τη θετική φορά των μαγνητικών πεδίων, που παράγουν τα τρία τυλίγματα μόνα τους. Τα τρία τυλίγματα έχουν την ίδια αντίσταση και τον ίδιο αριθμό σπειρών, οπότε το τριφασικό τύλιγμα του στάτη ονομάζεται συμμετρικό. Οι πλευρές των ομάδων (coil sides), κάθε τυλίγματος είναι τοποθετημένες σε αυλάκια (slots), τα οποία σχηματίζουν γωνία (span)  $180^\circ$  στη διπολική μηχανή. Η φορά του ρεύματος σε κάθε πλευρά των ομάδων, οι οποίες αποτελούνται από ορισμένο αριθμό σπειρών, εικονίζεται στο Σχ. 5.3α. Τα άκρα των τεσσάρων ομάδων κάθε τυλίγματος συνδέονται σε σειρά, με τον τρόπο που εικονίζεται στο Σχ. 5.3β. Τα άκρα  $a_4, b_4$  και  $c_4$  από τα τρία τυλίγματα συνδέονται μεταξύ τους, σε σύνδεση αστέρα.





Σχ. 2.4 Αναπτυσσόμενη ΜΕΔ από φάση as

Στη στοιχειώδη μηχανή του Σχ. 2.3α, οι πλευρές των ομάδων κάθε τυλίγματος, είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες στην επιφάνεια του στάτη, σε γωνία  $60^\circ$ . Στις πραγματικές μηχανές, οι πλευρές των ομάδων κατανέμονται σε μεγαλύτερη γωνία. Έτσι, στην ίδια αυλάκωση τοποθετούνται οι πλευρές από δύο ομάδες. Επιπλέον, οι ομάδες δεν έχουν τον ίδιο αριθμό σπειρών. Το τύλιγμα του Σχ. 2.3α ονομάζεται full-pitch, επειδή οι αντίθετες πλευρές των ομάδων σχηματίζουν γωνία  $180^\circ$  (διπολική μηχανή). Συχνά, οι αντίθετες πλευρές των ομάδων σχηματίζουν γωνία μικρότερη από  $180^\circ$ , οπότε το τύλιγμα ονομάζεται fractional-pitch.

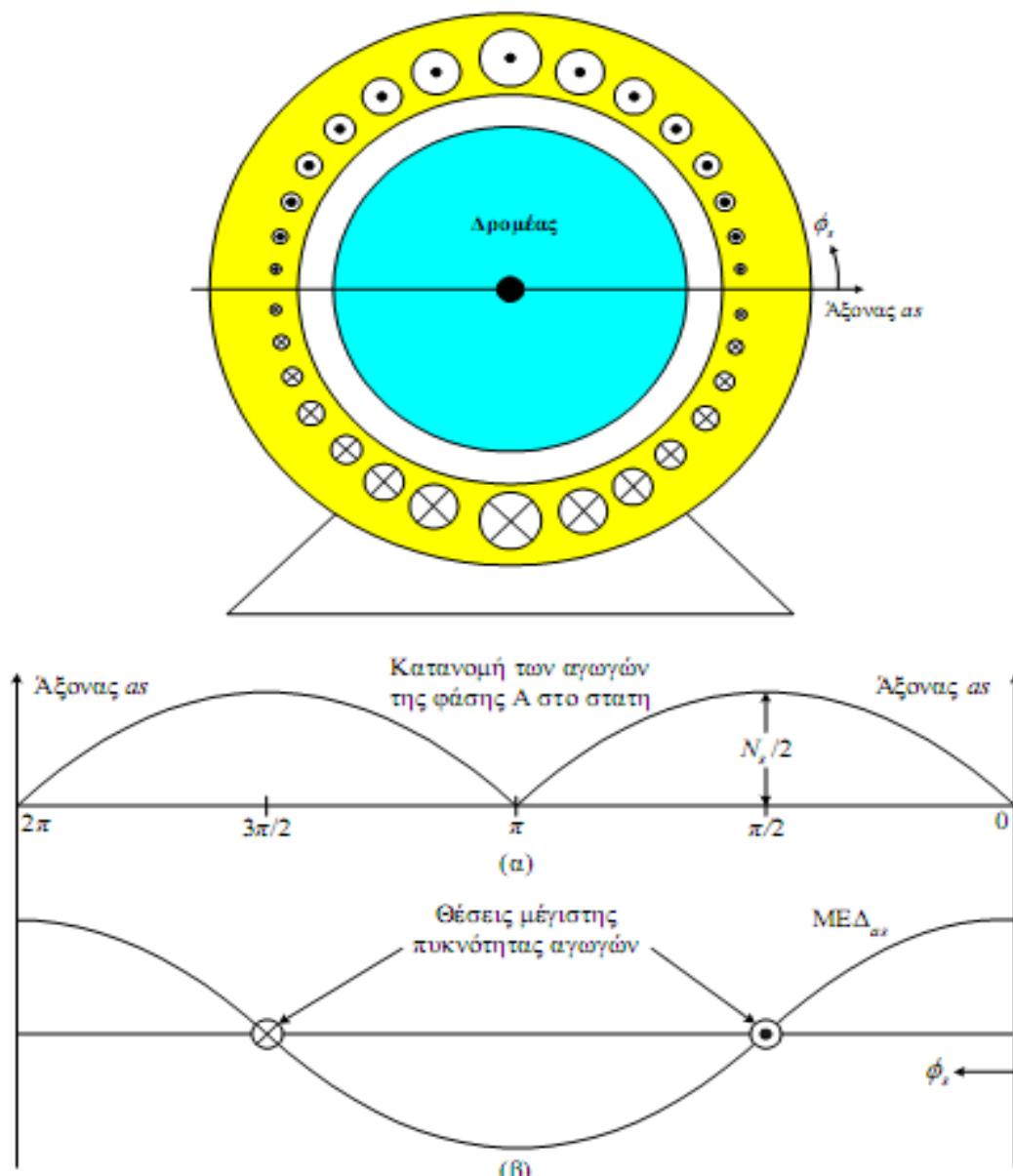
Στο Σχ. 2.4 εικονίζεται το ανάπτυγμα της στοιχειώδους μηχανής. Ως αρχή των αξόνων θεωρείται ο άξονας as στα δεξιά του σχήματος. Ακόμη, στο Σχ. 2.4 εικονίζεται η μαγνητεγερτική δύναμη ΜΕΔ, που αναπτύσσεται από το τύλιγμα της φάσης as. Η ΜΕΔ<sub>as</sub>

μεταβάλλεται βηματικά στο κέντρο των αγωγών του τυλίγματος. Σημειώνουμε ότι, το μαγνητικό πεδίο διατρέχει ακτινικά το διάκενο. Η ακτινική διεύθυνση του πεδίου οφείλεται στο μικρό πλάτος του διακένου σχετικά με τη διάμετρο του δρομέα και τη μεγάλη μαγνητική του αντίσταση, σε σχέση μ' εκείνη του σιδήρου στο στάτη και το δρομέα. Η ΜΕΔ που αναπτύσσεται από το τύλιγμα bs (ΜΕΔ<sub>bs</sub>) έχει την ίδια μορφή με την ΜΕΔ<sub>as</sub>, αλλά είναι μετατοπισμένη κατά  $120^\circ$  προς τα αριστερά. Αντίστοιχα, η ΜΕΔ<sub>cs</sub> είναι μετατοπισμένη κατά  $240^\circ$  προς τα αριστερά ως προς την ΜΕΔ<sub>as</sub>. Οι άξονες as, bs, cs, βρίσκονται στο μέσο της μέγιστης θετικής ΜΕΔ κάθε τυλίγματος.

Οι κυματομορφές των ΜΕΔ που αναπτύσσουν τα τυλίγματα της στοιχειώδους μηχανής στο διάκενο, είναι μη ημιτονοειδείς συναρτήσεις της χωρικής γωνίας  $\phi_s$ . Αυτό είναι ανεπιθύμητο, ιδιαίτερα στις μηχανές μεγάλης ισχύος, γιατί προκαλεί την ανάπτυξη αρμονικών τάσεων και ρευμάτων. Για την παραγωγή ημιτονοειδούς ΜΕΔ στο διάκενο της μηχανής, τα τυλίγματα του στάτη πρέπει να έχουν ημιτονοειδή κατανομή, όπως εικονίζεται στο Σχ. 2.5α. Τότε, η ΜΕΔ έχει την ημιτονοειδή μορφή του Σχ. 2.5β και ορίζεται από την παρακάτω σχέση, για τη φάση as :

$$ME\Delta_{as} = \frac{N_s}{2} i_{as} \cos \Phi_s \quad (2.1)$$

Όπου  $i_{as}$  είναι το ρεύμα στη φάση as του τυλίγματος και  $N_s$  είναι ο ισοδύναμος αριθμός σπειρών ενός ημιτονοειδούς κατανεμημένου τυλίγματος, ο οποίος δίνει την ίδια θεμελιώδη συνιστώσα με το πραγματικό τύλιγμα. Οι ΜΕΔ που αναπτύσσονται από τα τυλίγματα των φάσεων bs και cs, ορίζονται από τις σχέσεις :



Σχ. 2.5 (α) Ημιτονοειδή κατανομή τυλιγμάτων στάτη, (β) ημιτονοειδής μορφή ΜΕΔ

$$ΜΕΔ_{bs} = \frac{N_s}{2} i_{bs} \cos \Phi_s \quad (2.2)$$

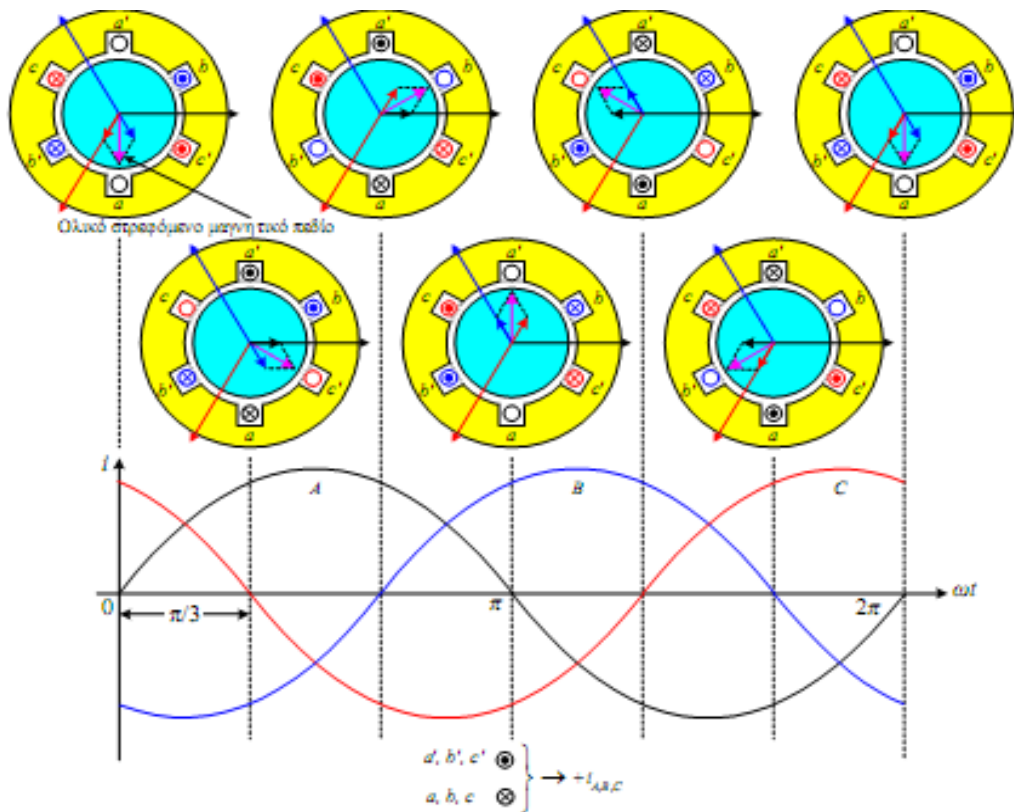
$$ΜΕΔ_{cs} = \frac{N_s}{2} i_{cs} \cos \Phi_s \quad (2.3)$$

Η ολική ΜΕΔ στο διάκενο, από τα τρία τυλίγματα, είναι ίση με το άθροισμα των επιμέρους ΜΕΔ :

$$ΜΕΔ_s = \frac{N_s}{2} [i_{as} \cos \Phi_s + i_{bs} \cos (\Phi_s - 2\pi/3) + i_{cs} \cos (\Phi_s + 2\pi/3)] \quad (2.4)$$

Τα συμμετρικά ρεύματα στο τριφασικό τύλιγμα της μηχανής, ορίζονται από τις σχέσεις :





Σχ. 2.6 Στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο

$$i_{as} = I_{ms} \cos(\omega_e t) \quad (2.5)$$

$$i_{bs} = I_{ms} \cos(\omega_e t - 2\pi/3) \quad (2.6)$$

$$i_{cs} = I_{ms} \cos(\omega_e t + 2\pi/3) \quad (2.7)$$

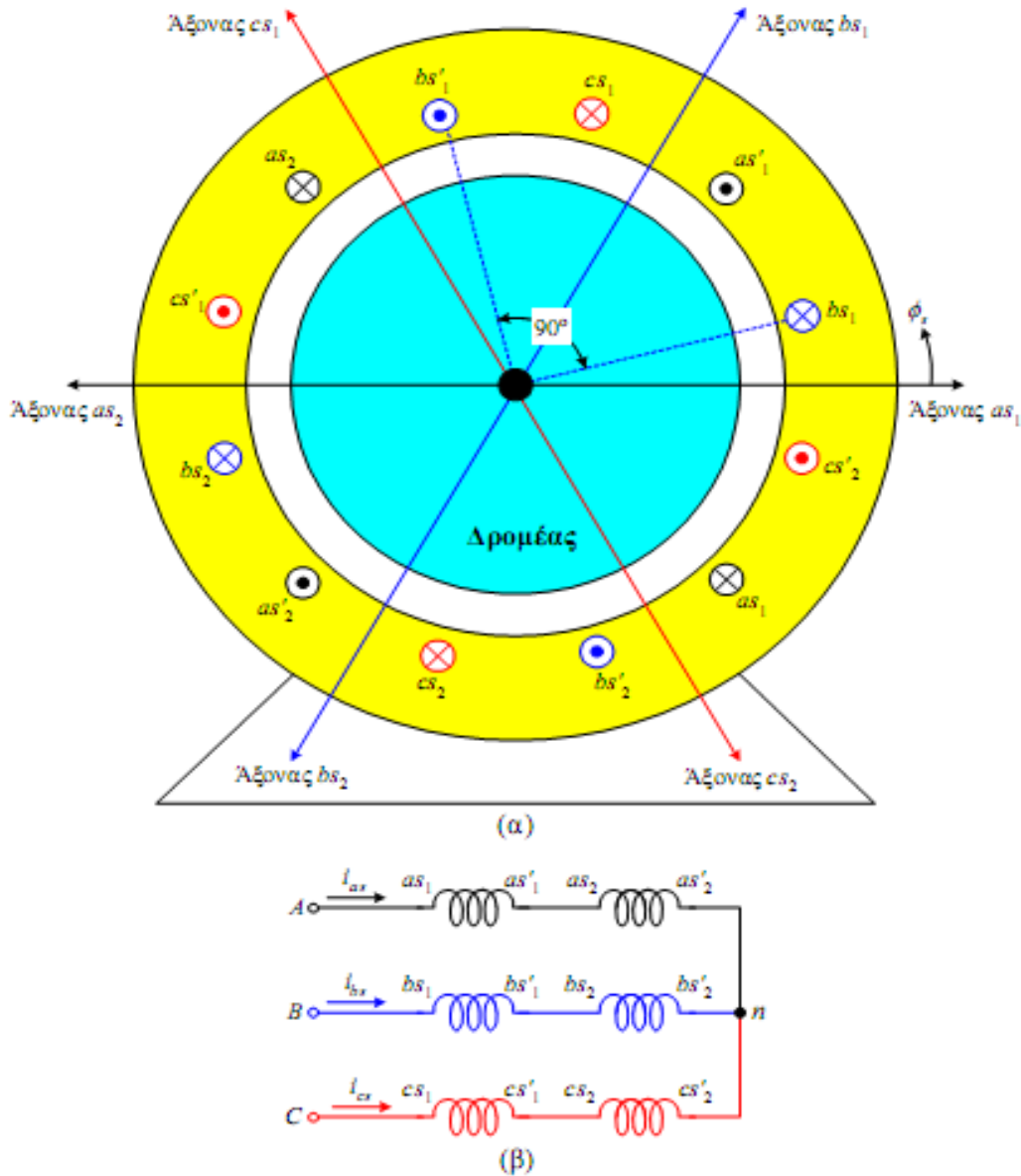
Όπου  $\omega_e$  είναι η κυκλική συχνότητα των ρευμάτων. Αντικαθιστώντας ορίζεται η ολική ΜΕΔ στο διάκενο της μηχανής :

$$ME\Delta_s = \frac{N_s}{2} \frac{3}{2} I_{ms} \cos(\omega_e t - \Phi_s) \quad (2.8)$$

Η Εξ. (2.8) παριστά μια ΜΕΔ με ημιτονοειδή κατανομή, η οποία στρέφεται με γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  σε σχέση με το στάτη της μηχανής, με φορά αντίθετη των δεικτών του ρολογιού. Η ΜΕΔ έχει ένα ζεύγος πόλων. Επομένως, η ροή των τριφασικών ρευμάτων από το τριφασικό τύλιγμα του στάτη δημιούργησε ένα μαγνητικό πεδίο, ο βόρειος και ο νότιος πόλος του οποίου κάνουν μια πλήρη περιστροφή σε κάθε περίοδο των ρευμάτων.

Η δημιουργία του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου γίνεται φανερή από το Σχ. 2.6. Η θετική φορά των ρευμάτων σε καθένα από τα τρία τυλίγματα του στάτη, αντιστοιχεί σ' εκείνη του Σχ. 2.3α. Κάθε τύλιγμα από τη ροή του αντίστοιχου ρεύματος παράγει ένα μαγνητικό πεδίο, η θετική φορά του οποίου (βόρειος πόλος) εικονίζεται στο Σχ. 2.6 και είναι ίδια μ' εκείνη στο Σχ. 2.3α. Στο Σχ. 2.6 εικονίζονται τα μαγνητικά πεδία που παράγει κάθε τύλιγμα του στάτη μόνο του καθώς και το ολικό πεδίο της μηχανής σε επτά διακριτές χρονικές στιγμές, οι οποίες αντιστοιχούν σε γωνίες των ρευμάτων  $60^\circ$ . Η διαδοχή φάσης των ρευμάτων είναι ABC. Παρατηρούμε ότι στη διπολική μηχανή που εξετάζουμε το ολικό μαγνητικό πεδίο στρέφεται κατά 60 μηχανικές μοίρες σε κάθε  $60^\circ$  μεταβολή της φασικής

γωνίας των ρευμάτων με αντιωρολογιακή φορά, όπως ήδη γνωρίζουμε από την Εξ.(2.8). Αν η σειρά διαδοχής φάσης των ρευμάτων αντιστραφεί, τότε θα αντιστραφεί και η φορά περιστροφής του μαγνητικού πεδίου (ωρολογιακή).



Σχ. 2.7 (α) Τυλίγματα στάτη σε τετραπολική μηχανή, (β) Τυλίγματα σε αστέρα

Στο Σχ. 2.7 εικονίζονται τα τυλίγματα του στάτη σε μια τετραπολική μηχανή. Το τυλίγμα της κάθε φάσης αποτελείται από δύο επιμέρους τυλίγματα, τα οποία συνδέονται σε σειρά. Τα τρία τυλίγματα συνδέονται σε αστέρα. Οι αντίθετες πλευρές των ομάδων κάθε τυλίγματος (span) σχηματίζουν γωνία  $90^0$ . Η ΜΕΔ που αναπτύσσεται στο διάκενο των μηχανών με P πόλους, ορίζεται με αντίστοιχο τρόπο από τη σχέση :

$$ME\Delta_s = \frac{N_s}{P} \frac{3}{2} I_{ms} \cos \left( \omega_e t - \frac{P}{2} \Phi_s \right) \quad (2.9)$$

Η ταχύτητα περιστροφής της ΜΕΔ είναι μειωμένη και ίση με  $\omega_e / (P / 2)$ . Η ταχύτητα της ΜΕΔ ονομάζεται σύγχρονη ταχύτητα. Το μαγνητικό πεδίο αποτελείται από  $P$  πόλους.

### 2.3.2 Είδη επαγωγικών μηχανών

Οι επαγωγικές μηχανές διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με την κατασκευαστική δομή του δρομέα τους:

- σε κινητήρες με βραχυκυκλωμένο δρομέα ή κλωβό (squirrel cage rotor)
- και σε κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα (wound rotor).

Οι μηχανές με βραχυκυκλωμένο κλωβό είναι οι πλέον διαδεδομένοι. Ο δρομέας των μηχανών αυτών αποτελείται από ελάσματα μονωμένα μεταξύ τους, τα οποία προσαρμίζονται στον άξονα. Τα ελάσματα φέρουν οδοντώσεις, οι οποίες σχηματίζουν αυλάκια κατά μήκος του δρομέα. Η γεωμετρική μορφή των αυλακώσεων καθορίζει την ηλεκτρική συμπεριφορά του κινητήρα, δηλαδή τη χαρακτηριστική ταχύτητας –ροπής. Στις κλάσεις (classes) των επαγωγικών κινητήρων με βραχυκυκλωμένο κλωβό, ανάλογα με τη μορφή των αυλακώσεων και στην ιδιαίτερη μορφή της χαρακτηριστικής ταχύτητας –ροπής κάθε κλάσης, θα αναφερθούμε συνέχεια.

Στα αυλάκια του δρομέα τοποθετούνται ράβδοι από χαλκό ή ορείχαλκο, τα άκρα των οποίων συνδέονται μεταξύ τους με δακτύλιους βραχυκύκλωσης (shorting rings). Έτσι, σχηματίζεται το τύλιγμα κλωβού του δρομέα. Στους επαγωγικούς κινητήρες μικρής ισχύος, το τύλιγμα κλωβού κατασκευάζεται με χύτευση αλουμινίου στα αυλάκια του δρομέα. Στην περίπτωση αυτή, οι δακτύλιοι βραχυκύκλωσης και τα πτερύγια εξαερισμού χυτεύονται μαζί με τους αγωγούς του κλωβού, οι οποίοι δεν είναι μονωμένοι ως προς το σίδηρο του δρομέα. Όμως, τα ρεύματα κυκλοφορούν κυρίως από τον κλωβό, καθώς η αγωγιμότητα του αλουμινίου είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη του σιδήρου. Είναι φανερό ότι, ο δρομέας του επαγωγικού κινητήρα με βραχυκυκλωμένο κλωβό, δεν συνδέεται ηλεκτρικά με καμία πηγή. Στο γεγονός αυτό οφείλεται η απλή κατασκευή και η ευρεία χρήση του επαγωγικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού.

Ο δρομέας των επαγωγικών κινητήρων με δακτυλιοφόρο δρομέα φέρει αυλακώσεις, μέσα στις οποίες τοποθετείται ένα τριφασικό τύλιγμα, αντίστοιχο μ' εκείνο του στάτη. Οι τρεις φάσεις του τυλίγματος στο δρομέα συνδέονται σχεδόν πάντα σε αστέρα. Τα τρία άκρα του τυλίγματος αστέρα καταλήγουν σε ισάριθμους δακτύλιους, που φέρει ο δρομέας. Μέσω των δακτυλίων και των ψηκτρών που εφάπτονται σ' αυτούς, είναι δυνατή η σύνδεση ρυθμιστικών αντιστάσεων στο τύλιγμα του δρομέα. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η τροποποίηση της χαρακτηριστικής ταχύτητας –ροπής του κινητήρα, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας.

### 2.3.3 Ηλεκτρομαγνητική δομή της επαγωγικής μηχανής

Ο επαγωγικός κινητήρας έχει στο στάτη ένα συμμετρικό τριφασικό τύλιγμα, με ωμική αντίσταση  $R_s$ , αυτεπαγωγή  $L_{st}$  και ισοδύναμο αριθμό σπειρών  $w_s$  ανά φάση (Σχ. 2.9). Όταν το τύλιγμα του στάτη τροφοδοτηθεί από μια συμμετρική τριφασική πηγή με τάση  $u$  και συχνότητα  $\omega_e$ , δημιουργείται το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη  $\Phi_s$ . Η συνιστώσα

$\Phi_{sr}$  του πεδίου του στάτη (κοινή ροή, mutual flux), διασχίζει ακτινικά το διάκενο και συνδέει το τύλιγμα του δρομέα. Η συνιστώσα  $\Phi_{ls}$  ονομάζεται ροή σκέδασης (leakage flux) και συνδέει μόνο τις σπείρες του στάτη. Το μέγεθος της ροής σκέδασης εξαρτάται από τη σύζευξη μεταξύ των τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα. Η σύζευξη των τυλιγμάτων στις ηλεκτρικές μηχανές είναι πολύ μικρότερη από εκείνη στους μετασχηματιστές, εξαιτίας του διακένου. Το ολικό πεδίο του στάτη είναι ίσο με :

$$\Phi_s = \Phi_{sr} + \Phi_{ls} \quad (2.10)$$

Το τύλιγμα του δρομέα έχει τη μορφή πλήρους τριφασικού τυλίγματος, με τον ίδιο αριθμό πόλων μ' εκείνο του στάτη, στον κινητήρα με δακτυλιοφόρο δρομέα. Στον κινητήρα με βραχυκυκλωμένο κλωβό το τύλιγμα του δρομέα αποτελείται από ράβδους, τα άκρα των οποίων συνδέονται με δακτυλίους βραχυκύκλωσης. Το τύλιγμα κλωβού μπορεί να θεωρηθεί αντίστοιχο με ένα πλήρες συμμετρικό τριφασικό τύλιγμα, με αριθμό πόλων ίσο μ' εκείνο του στάτη.

Καθώς το στρεφόμενο πεδίο του στάτη (συνιστώσα  $\Phi_{sr}$ ) τέμνει τους αγωγούς του τυλίγματος του δρομέα, επάγει σ' αυτούς συμμετρικές τριφασικές τάσεις  $E_r$ . Το πλάτος και η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων, εξαρτάται από τη σχετική ταχύτητα του δρομέα ως προς το στρεφόμενο πεδίο του στάτη. Το τύλιγμα του δρομέα έχει ωμική αντίσταση  $R_r$ , αυτεπαγωγή  $L_{rot}$  και ισοδύναμο αριθμό σπειρών  $w_r$  ανά φάση. Εξαιτίας της επαγωγικής φύσης του βραχυκυκλωμένου τυλίγματος του δρομέα, το ρεύμα στο δρομέα  $I_r$  καθυστερεί ως προς την επαγόμενη τάση  $E_r$ . Στο Σχ. 2.9 εικονίζεται μόνο η μία φάση των τυλιγμάτων στο στάτη και το δρομέα.

Τα τριφασικά ρεύματα που ρέουν στο δρομέα, ως συνέπεια των επαγόμενων τάσεων από το στρεφόμενο πεδίο του στάτη, προκαλούν την ανάπτυξη του στρεφόμενου πεδίου του δρομέα  $\Phi_r$ . Η συνιστώσα  $\Phi_{rs}$  του πεδίου του δρομέα, συνδέει το τύλιγμα του στάτη.

Η συνιστώσα  $\Phi_{lr}$  αντιπροσωπεύει τη ροή σκέδασης. Έτσι, ισχύει :

$$\Phi_l = \Phi_{lr} + \Phi_{rs} \quad (5.11)$$

Το διανυσματικό διάγραμμα των παραπάνω μεγεθών εικονίζεται στο Σχ. 2.9. Η ολική μαγνητική ροή στο διάκενο του κινητήρα  $\Phi_m$ , είναι ίση με το διανυσματικό άθροισμα των κοινών ροών του στάτη και του δρομέα :

$$\Phi_m = \Phi_{sr} + \Phi_{rs} \quad (5.12)$$

Η αλληλεπίδραση των μαγνητικών πεδίων του στάτη και του δρομέα, τα οποία στρέφονται με την ίδια ταχύτητα, προκαλεί την ανάπτυξη μιας σταθερής ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Η ροπή είναι ανάλογη με το εξωτερικό γινόμενο των πεδίων :

$$T_e = C_1 (B_{sr} \times B_{rs}) \quad (2.13)$$

ή αντίστοιχα για τα πεδία :

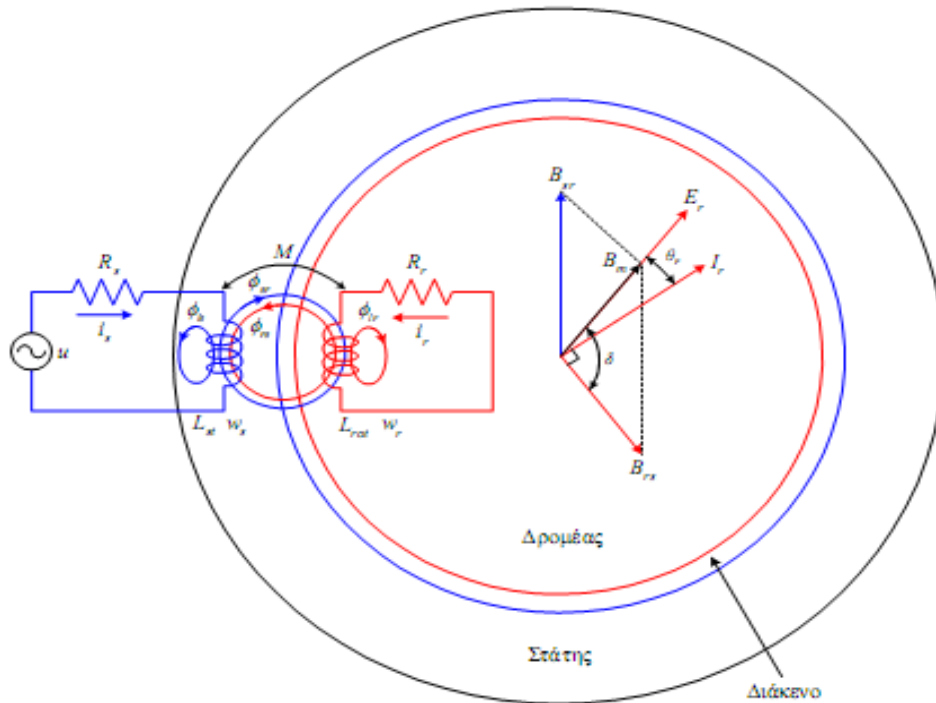
$$T_e = C_2 (B_m \times B_{rs}) \quad (2.14)$$

$$\Rightarrow T_e = C_T B_m B_{rs} \sin\delta = C_T B_m B_{rs} \cos\theta_r \quad (2.15)$$

και η φορά της είναι η ίδια με τη φορά περιστροφής των πεδίων του στάτη και του δρομέα.

Από τα προηγούμενα προκύπτει ότι, τα ρεύματα στο δρομέα του κινητήρα προέρχονται από τις τάσεις εξ επαγωγής που προκαλεί το στρεφόμενο πεδίο του στάτη. Επομένως, ο δρομέας δεν απαιτείται να τροφοδοτηθεί από κάποια εξωτερική πηγή ενέργειας. Οι μηχανές με τροφοδότηση μόνο στο στάτη, ονομάζονται απλής διέγερσης (singly excited).

Αντίστοιχα, οι μηχανές που τροφοδοτούνται από εξωτερικές πηγές τόσο στο στάτη όσο και στο δρομέα, όπως οι ασύγχρονες και οι μηχανές συνεχούς ρεύματος, ονομάζονται διπλής διέγερσης (doubly excited).



Σχ. 2.9 Μια φάση τυλιγμάτων στάτη και δρομέα

### 2.3.4 Η ολίσθηση

Η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του στάτη, εξαρτάται από τη συχνότητα των ρευμάτων εξόδου  $\omega_e = 2\pi f_e$  και τον αριθμό των πόλων  $P$ , σύμφωνα με την Εξ. (2.9). Η ταχύτητα του στρεφόμενου πεδίου ονομάζεται σύγχρονη ταχύτητα  $n_s$  και ορίζεται από την παρακάτω σχέση σε rpm :

$$n_s = \frac{60 f_e}{P/2} = \frac{120 f_e}{P} \quad (2.16)$$

Στον επαγωγικό κινητήρα, η ανάπτυξη της ροπής οφείλεται στην αλληλεπίδραση των μαγνητικών πεδίων του στάτη και του δρομέα. Όμως, το πεδίο του δρομέα οφείλεται στις τάσεις εξ' επαγωγής, οι οποίες αναπτύσσονται στο δρομέα μόνο όταν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ του δρομέα και του στρεφόμενου πεδίου. Επομένως, η ταχύτητα του δρομέα δεν μπορεί να είναι ίση με τη σύγχρονη, καθώς τότε δεν θα επάγονταν τάσεις στο δρομέα, με συνέπεια το ρεύμα και η ροή του δρομέα να ήταν μηδενικά. Έτσι, η ροπή θα μηδενίζονταν και η ταχύτητα του κινητήρα θα μειώνονταν σε μια τιμή μικρότερη από τη σύγχρονη.

Η διαφορά της ταχύτητας του δρομέα  $n_r$  από τη σύγχρονη  $n_s$  ονομάζεται ταχύτητα ολίσθησης (slip speed) και ορίζεται από τη σχέση :

$$n_{slip} = n_s - n_r \quad (2.17)$$

Η ποσοστιαία διαφορά της ταχύτητας του κινητήρα από τη σύγχρονη ταχύτητα ονομάζεται ολίσθηση (slip) :

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100\% \quad (2.18)$$

Όταν ο κινητήρας είναι ακίνητος η ολίσθηση είναι ίση με τη μονάδα ( $s = 1$ ). Αν ο δρομέας στρέφονταν με τη σύγχρονη ταχύτητα, η ολίσθηση θα ήταν μηδέν ( $s = 0$ ). Από την Εξ. (2.18) προκύπτει η παρακάτω σχέση της ταχύτητας του κινητήρα, ως συνάρτηση της σύγχρονης ταχύτητας και της ολίσθησης :

$$n_r = (1-s) n_s \quad (2.19)$$

Η ονομασία ασύγχρονος κινητήρας, προέρχεται από τη διαφορά της ταχύτητας του δρομέα από τη σύγχρονη, η οποία είναι ανάλογη με τη ροπή του φορτίου.

### 2.3.5 Ισοδύναμο κύκλωμα της επαγωγικής μηχανής

Η λειτουργία του επαγωγικού κινητήρα στηρίζεται στην ανάπτυξη τάσεων εξ επαγωγής στο τριφασικό τύλιγμα του δρομέα. Επομένως, η αρχή λειτουργίας του επαγωγικού κινητήρα είναι ίδια μ' εκείνη του μετασχηματιστή. Για το λόγο αυτό, ο ασύγχρονος κινητήρας ονομάζεται και στρεφόμενος μετασχηματιστής (rotating transformer).

Προκειμένου να λάβουμε το ισοδύναμο κύκλωμα του συμμετρικού τριφασικού επαγωγικού κινητήρα, θεωρούμε την ηλεκτρομαγνητική δομή ανά φάση του Σχ. 2.9, από την οποία προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις :

$$u = R_s i_s + L_{st} \frac{d i_s}{dt} - M \frac{d i_r}{dt} \quad (2.20)$$

$$0 = R_r i_r + L_{rot} \frac{d i_r}{dt} - M \frac{d i_s}{dt} \quad (2.21)$$

Όπου  $M$  είναι ο συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής μεταξύ των τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα. Αν θεωρήσουμε ημιτονοειδή μεγέθη και μόνιμη κατάσταση ισορροπίας, οι Εξ. (2.20)– (2.21) λαμβάνουν τη μορφή :

$$V = R_s I_s + j\omega_e L_{st} I_s - j \omega_e M I_r \quad (2.22)$$

$$0 = R_r I_r + j s \omega_e L_{rot} I_r - j s \omega_e M I_s \quad (2.23)$$

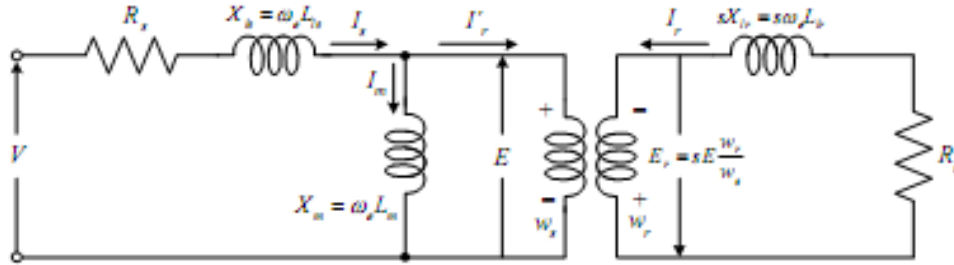
Οι εξισώσεις του επαγωγικού κινητήρα διαφέρουν από εκείνες του μετασχηματιστή, μόνο στο δευτερεύον κύκλωμα (δρομέα).

Στο Σχ. 2.10 εικονίζεται το ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή, τροποποιημένο ως προς το δρομέα, για τις ανάγκες του επαγωγικού κινητήρα. Στον κινητήρα, αντίθετα από το μετασχηματιστή, η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων και των ρευμάτων στο δρομέα δεν είναι σταθερή και ίση με τη συχνότητα του πρωτεύοντος (στάτη). Στον επαγωγικό κινητήρα, η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων  $f_r$  εξαρτάται από την ολίσθηση, όπως προκύπτει από την Εξ. (2.23) και ορίζεται από τη σχέση :

$$f_r = s f_e \quad (2.24)$$

Όταν ο κινητήρας είναι ακίνητος, η συχνότητα του δρομέα είναι ίση με τη συχνότητα του στάτη. Καθώς η ταχύτητα τείνει προς τη σύγχρονη, η συχνότητα των τάσεων και των ρευμάτων στο δρομέα τείνει στο μηδέν. Εκτός από τη συχνότητα των επαγόμενων τάσεων και το πλάτος των τάσεων μεταβάλλεται ανάλογα με την ολίσθηση. Έτσι, η επαγόμενη

τάση είναι μέγιστη κατά την εκκίνηση του κινητήρα, όπου  $n_r = 0$ ,  $s = 1$  και ελάχιστη όταν η ταχύτητα τείνει προς τη σύγχρονη ( $s \rightarrow 0$ ). Οι Εξ. (2.22), (2.23) του κινητήρα, με κατάλληλος χειρισμούς, λαμβάνουν την παρακάτω μορφή :



Σχ. 2.10 Ηλεκτρομαγνητικό ισοδύναμο μηχανής ανά φάση

$$V = (R_s + j X_{ls}) I_s + j X_m (I_s - I_r') \quad (2.25)$$

$$0 = \left(\frac{R_r'}{s} + j X_{lr}'\right) I_r' + j X_m (I_r' - I_s) \quad (2.26)$$

Στις Εξ. (2.25)–(2.26), ορίζονται τα παρακάτω μεγέθη, τα οποία εμφανίζονται και στο ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα:

$X_{ls}$  είναι η αντίδραση σκέδασης του στάτη, η οποία εκφράζει τη ροή σκέδασης  $\Phi_{ls}$

$$X_{ls} = \omega_e (L_{st} - M \frac{W_s}{W_r}) \quad (2.27)$$

$X_{lr}$  είναι η αντίδραση σκέδασης του δρομέα, η οποία εκφράζει τη ροή σκέδασης  $\Phi_{lr}$

$$X_{lr} = \omega_e (L_{rot} - M \frac{W_r}{W_s}) \quad (2.27)$$

$X_m$  είναι η αντίδραση μαγνήτισης, η οποία παριστά τη σύζευξη μεταξύ των τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα :

$$X_m = \omega_e M \frac{W_r}{W_s} \quad (2.29)$$

Τα μεγέθη του δρομέα αναφέρονται στο στάση, μέσω του λόγου σπειρών των δύο τυλιγμάτων  $W_s/W_r$ , από τις σχέσεις :

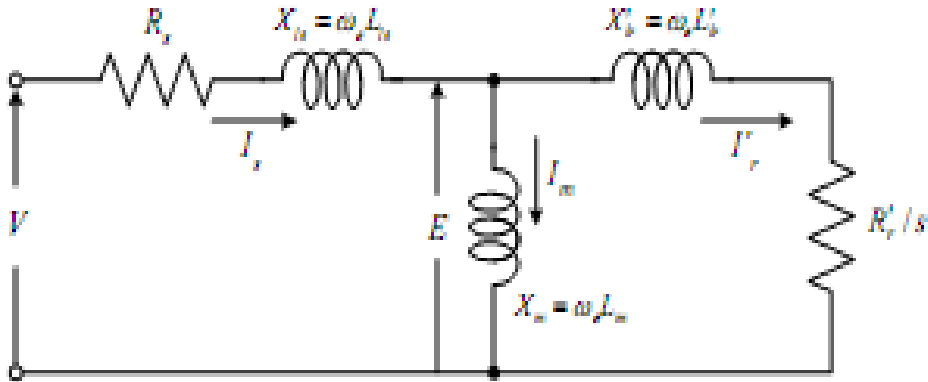
$$R_r' = R_r \left(\frac{W_s}{W_r}\right)^2 \quad (2.30) \quad X_{lr}' = X_{lr} \left(\frac{W_s}{W_r}\right)^2 \quad (2.31)$$

$$I_r' = I_r \left(\frac{W_r}{W_s}\right) \quad (2.32) \quad X_{ls} + X_m = \omega_e L_{st} \quad (2.33)$$

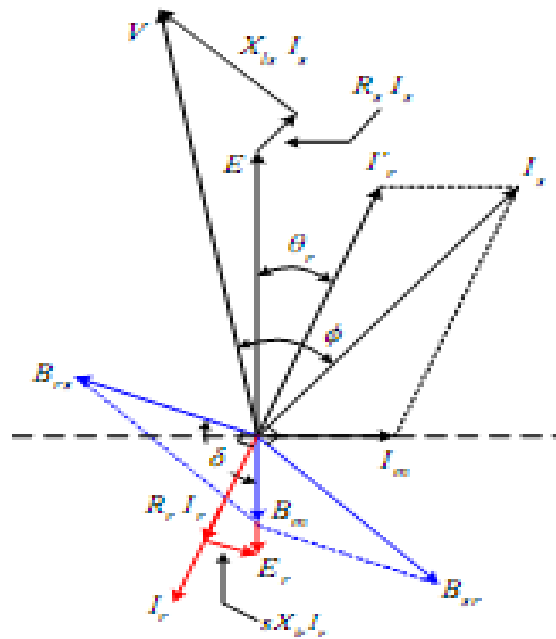
$$X_{lr}' + X_m = \omega_e L_{rot}' \quad (2.34)$$

Το τελικό ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα, από τις Εξ. (2.25)–(2.26), εικονίζεται στο Σχ. 2.11. Στο ισοδύναμο κύκλωμα, η τάση του δρομέα είναι σταθερή  $E$  και η συχνότητα είναι ίση μ' εκείνη του στάτη  $\omega_e$ . Οι επιπτώσεις από τη μεταβολή της ταχύτητας έχουν ενσωματωθεί στην ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του δρομέα  $X_{lr}' + R_r'/s$ , η οποία εξαρτάται από την ολίσθηση.

Στο Σχ. 2.12 παρουσιάζεται το διάγραμμα στρεφόμενων ανυσμάτων (phasors), των τάσεων και των ρευμάτων του κινητήρα. Τα δύο πρώτα τεταρτημόρια αναφέρονται στα μεγέθη του κινητήρα, ανοιγμένα στο στάτη. Εικονίζονται ακόμη, τα μεγέθη στην πλευρά του δρομέα και τα μαγνητικά πεδία.



Σχ. 2.11 Τελικό ισοδύναμο επαγωγικού κινητήρα



Σχ. 2.12 Διάγραμμα στρεφόμενων ανυσμάτων

### 2.3.6 Απώλειες των επαγωγικών μηχανών

Ο βαθμός απόδοσης του τριφασικού επαγωγικού κινητήρα, εκφράζει την ικανότητά του να μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια εισόδου σε μηχανική. Κατά τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας, ένα ποσοστό της ισχύος εισόδου καταναλώνεται από τον κινητήρα, με αποτέλεσμα την ανύψωση της θεοκρασίας του. Αυτό το ποσοστό αντιπροσωπεύει τις απώλειες της μηχανής, οι οποίες πρέπει να είναι οι ελάχιστες δυνατές. Οι ολικές απώλειες των επαγωγικών κινητήρων, απαρτίζονται από τις παρακάτω επιμέρους συνιστώσες:



- Απώλειες χαλκού ή ωμικές απώλειες (copper, winding losses). Οι απώλειες χαλκού οφείλονται στη ροή των ρευμάτων από τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα. Οι απώλειες χαλκού στο στάτη ορίζονται από τη σχέση :

$$P_{cu, s} = 3R_s I_s^2 \quad (2.35)$$

και στο δρομέα από τη σχέση :

$$P_{cu, r} = 3R'_r I_r^2 \quad (2.36)$$

Οι ολικές απώλειες χαλκού είναι ίσες με το άθροισμα των απωλειών στο στάτη και το δρομέα :

$$P_{cu} = P_{cu, s} + P_{cu, r} \quad (2.37)$$

Οι απώλειες χαλκού εξαρτώνται από το μέγεθος των αντιστάσεων των τυλιγμάτων και το μέγεθος των ρευμάτων στο στάτη  $I_s$  και το δρομέα  $I_r$ , τα οποία είναι συνάρτηση της ροπής του φορτίου. Οι απώλειες χαλκού στο στάτη και το δρομέα συμβάλλουν κατά 33–40% και 15–22% αντίστοιχα, στις ολικές απώλειες των συμβατικών επαγωγικών κινητήρων υπό ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας.

- Απώλειες σιδήρου ή μαγνητικές απώλειες (core, iron losses). Οι απώλειες σιδήρου προκύπτουν από το άθροισμα των απωλειών υστέρησης και δινορευμάτων στο στάτη και το δρομέα. Εξαρτώνται από το μέγεθος της ολικής μαγνητικής ροής στο διάκενο  $\Phi_m$  και τη συχνότητα μεταβολής της, ενώ είναι ανεπηρέαστες από τη ροπή του φορτίου. Οι απώλειες σιδήρου στο στάτη προσεγγίζονται από τη σχέση :

$$P_{iron, s} = k_e \omega_e^2 \Phi_m^2 + k_h \omega_e \Phi_m^n \quad (2.38)$$

και στο δρομέα από την :

$$P_{iron, r} = k_e (s\omega_e)^2 \Phi_m^2 + k_h s \omega_e \Phi_m^n \quad (2.39)$$

όπου  $k_e$  είναι ο συντελεστής απωλειών δινορευμάτων και  $k_h$  ο συντελεστής απωλειών υστέρησης. Ο εκθέτης  $n$  λαμβάνει τιμές από 1.5 έως 2.5 και συνήθως θεωρείται  $n = 2$ . Στην περίπτωση αυτή, οι ολικές απώλειες σιδήρου του επαγωγικού κινητήρα είναι ίσες με :

$$P_{iron, s+r} = [ k_e (1+s^2) \omega_e^2 + k_h (1+s^2) \omega_e ] \Phi_m^n \quad (2.40)$$

Οι απώλειες σιδήρου στο δρομέα είναι σημαντικά μικρότερες από εκείνες στο στάτη, εξαιτίας της μικρότερης συχνότητας  $s\omega_e$ . Οι απώλειες σιδήρου αποτελούν τη δεύτερη σημαντικότερη συνιστώσα των ολικών απωλειών, με ποσοστό περίπου 20%. Στο ισοδύναμο κυκλώματος Σχ. 2.11, οι μαγνητικές απώλειες μοντελοποιούνται με μια αντίσταση  $R_m$  σε παράλληλη σύνδεση με την αντίδραση μαγνήτισης. Η τιμή της αντίστασης απωλειών σιδήρου, υπολογίζεται από τη σχέση :

$$P_{iron, s+r} = \frac{E^2}{R_m} \quad (2.41)$$

Αντικαθιστώντας  $E = \omega_e \Phi_m$  :

$$R_m = \frac{1}{k_e (1+s^2) + \frac{(1+s)k_h}{\omega_e}} \quad (2.42)$$

- Μηχανικές απώλειες (mechanical losses). Οι μηχανικές απώλειες  $P$ , περιλαμβάνουν τις απώλειες τριβών (friction), λόγω της περιστροφής του άξονα και τη συνιστώσα αερισμού (windage) από τη λειτουργία του ανεμιστήρα. Οι

απώλειες τριβών –αερισμού, μεταβάλλονται προσεγγιστικά ανάλογα με το τετράγωνο της ταχύτητας :

$$P_{fw} = C_{fw} n_r^2 \quad (2.43)$$

όπου,  $C_{fw}$  είναι ο συντελεστής μηχανικών απωλειών. Οι μηχανικές απώλειες αποτελούν το 8–10% των ολικών απωλειών στο ονομαστικό φορτίο.

- Κατανεμημένες απώλειες (stray losses). Πρόκειται για πρόσθετες απώλειες της μηχανής, οι οποίες οφείλονται στην αύξηση της ροής σκέδασης με το φορτίο και στις υψηλής συχνότητας διακυμάνσεις της ροής αυτής. Ο προσδιορισμός των κατανεμημένων απωλειών  $P_{stray}$  είναι εξαιρετικά δύσκολος. Έτσι, συνήθως λαμβάνονται ίσες με το 1% της ισχύος εξόδου της μηχανής, στη λειτουργία με το ονομαστικό φορτίο. Οι κατανεμημένες απώλειες αποτελούν το 8–20% των ολικών απωλειών, ανάλογα με την ιπποδύναμη του κινητήρα.

### 2.3.7 Ισχύς και ροπή επαγωγικών μηχανών

Ο τριφασικός επαγωγικός κινητήρας μετατρέπει την ηλεκτρική ισχύ εισόδου σε μηχανική. Η ηλεκτρική ισχύς εισόδου ορίζεται από τη σχέση :

$$P_{in} = 3VI_s \cos\phi \quad (2.44)$$

όπου  $V$  είναι η φασική τάση,  $I_s$  το φασικό ρεύμα και  $\phi$  η διαφορά φάσης μεταξύ της τάσης και του ρεύματος. Η ισχύς που απομένει, αν από την ισχύ εισόδου αφαιρεθούν οι απώλειες χαλκού και οι μαγνητικές απώλειες στο στάτη, είναι η ισχύς που μέσω του διακένου μεταφέρεται στο δρομέα. Η ισχύς αυτή ονομάζεται ισχύς διακένου (air gap power). Από το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα, η ισχύς διακένου μπορεί να καταναλωθεί μόνο στην αντίσταση  $R'_r$ . Επομένως, η ισχύς διακένου ορίζεται από τη σχέση :

$$P_{ag} = 3I_r'^2 \left(\frac{R'_r}{s}\right) = 3EI_r' \cos\theta_r \quad (2.45)$$

Ένα τμήμα της ισχύος διακένου χάνεται ως απώλειες χαλκού στο δρομέα και ένα τμήμα ως απώλειες σιδήρου στο δρομέα. Η ισχύς που απομένει  $P_m$ , μετατρέπεται σε μηχανική. Η ισχύς αυτή ονομάζεται αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύς και ορίζεται από την παρακάτω σχέση, αν αγνοήσουμε τις μικρές απώλειες σιδήρου στο δρομέα.

$$P_m = P_{ag} - P_{cu,r} = 3I_r'^2 \left(\frac{R'_r}{s}\right) - 3I_r'^2 R'_r = P_{ag} (1 - s) \quad (2.46)$$

Συνήθως, οι απώλειες σιδήρου του δρομέα ενσωματώνονται στις μαγνητικές απώλειες του στάτη. Οι απώλειες χαλκού του δρομέα, από την Εξ. (2.46), υπολογίζονται από το γινόμενο της ισχύος διακένου με την ολίσθηση :

$$P_{cu,r} = sP_{ag} \quad (2.47)$$

Όταν ο κινητήρας δεν στρέφεται ( $s=1$ ), όλη η ισχύς διακένου μετατρέπεται σε θερμότητα στην αντίσταση του δρομέα. Αυτό συμβαίνει γιατί η ισχύς εξόδου είναι μηδενική. Η ωφέλιμη ισχύς εξόδου του επαγωγικού κινητήρα, είναι μικρότερη από την αναπτυσσόμενη ισχύ κατά τις μηχανικές και τις κατανεμημένες απώλειες :

$$P_{out} = P_m - P_{fw} - P_{stray} \quad (2.48)$$

Αντίστοιχα, η πραγματική ροπή στον άξονα του κινητήρα, εξαιτίας των τριβών και των κατανεμημένων απωλειών είναι μικρότερη από την εσωτερική ροπή. Η εσωτερική ροπή

ονομάζεται αναπτυσσόμενη ή ηλεκτρομαγνητική ροπή (developed torque). Η ηλεκτρομαγνητική ροπή ορίζεται από την αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύ και την κυκλική ταχύτητα του κινητήρα, ή ισοδύναμα από την ισχύ διακένου και τη σύγχρονη ταχύτητα :

$$T_e = \frac{P_m}{\omega_r} = \frac{(1-s)P_{ag}}{(1-s)\omega_s} = \frac{P_{ag}}{\omega_s} \quad (2.49)$$

### 2.3.8 Χαρακτηριστική ταχύτητας - ροπής

Η ροπή που αναπτύσσει ένας επαγωγικός κινητήρας μεταβάλλεται με την ταχύτητα, με τον τρόπο που εικονίζεται στο Σχ. 2.13α. Προκειμένου να ερμηνεύσουμε τη χαρακτηριστική αυτή, θεωρούμε ότι ο κινητήρας λειτουργεί αρχικά χωρίς φορτίο (Σχ. 2.14α). Τότε, η ταχύτητα του κινητήρα είναι περίπου ίση με τη σύγχρονη. Το μαγνητικό πεδίο του στάτη  $B_{sr}$  παράγεται από το ρεύμα  $I_s$ . Το ολικό μαγνητικό πεδίο  $B_m$  είναι ανάλογο με το ρεύμα μαγνήτισης  $I_m$  (Σχ. 2.11). Το ρεύμα μαγνήτισης εξαρτάται από την τάση  $E$ , όταν ο κινητήρας είναι ακόρεστος. Επειδή η πτώση τάσης στη σύνθετη αντίσταση του στάτη  $R_s + jX_{ls}$  είναι πολύ μικρή, η τάση  $E$  είναι σταθερή και περίπου ίση με την τάση εξόδου  $V$ . Επομένως, το ολικό μαγνητικό πεδίο στο διάκενο του κινητήρα είναι σταθερό και ανεξάρτητο από τη ροπή του φορτίου.

Η τάση που επάγεται στο τύλιγμα του δρομέα  $E_r$  είναι πολύ μικρή, εξαιτίας της μικρής ολίσθησης. Έτσι, το ρεύμα του δρομέα  $I_r$  και το πεδίο που αυτό αναπτύσσει  $B_{rs}$ , είναι μικρά. Επειδή η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων είναι μικρή, η αντίδραση του δρομέα είναι πολύ μικρή σε σχέση με την ωμική του αντίσταση και η διαφορά φάσης μεταξύ  $I_r$  και  $E_r$  είναι ελάχιστη. Μολονότι το ρεύμα του δρομέα είναι πολύ μικρό στη λειτουργία χωρίς φορτίο, το ρεύμα εξόδου του στάτη είναι αρκετά μεγάλο, καθώς παρέχει το ρεύμα μαγνήτισης. Το μέτρο της αναπτυσσόμενης ροπής δίνεται από τη σχέση :

$$T_e = C_T B_m B_{rs} \sin \delta \quad (2.50)$$

Επειδή το μαγνητικό πεδίο  $B_{rs}$  είναι μικρό, η ροπή που αναπτύσσει ο κινητήρας είναι τόση όση να υπερνικήσει τις απώλειές του.

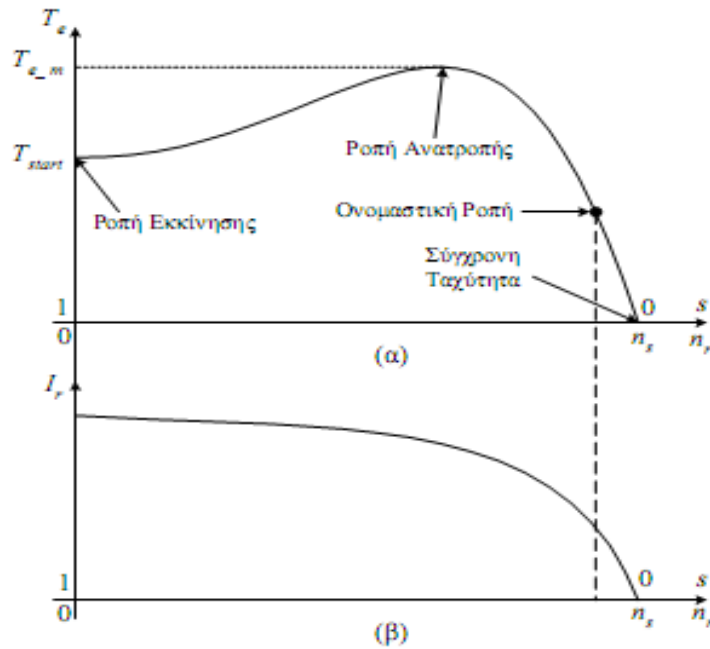
Όταν η ροπή του φορτίου αυξηθεί στην ονομαστική τιμή, η ταχύτητα του κινητήρα μειώνεται και η ολίσθηση αυξάνει. Έτσι, η τάση που επάγεται στο δρομέα αυξάνεται. Η αυξημένη τάση  $E_r$  προκαλεί την αύξηση του ρεύματος και του μαγνητικού πεδίου στο δρομέα. Ταυτόχρονα, η αύξηση της συχνότητας στο δρομέα έχει ως αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη διαφορά φάσης μεταξύ των  $E_r$  και  $I_r$  (Σχ. 2.14β). Η αντίδραση του δρομέα  $sX_{lr}$  είναι τώρα παραπλήσια της ωμικής του αντίστασης  $R_r$ . Η αύξηση του πεδίου  $B_{rs}$  τείνει να αυξήσει την αναπτυσσόμενη ροπή. Αντίθετα, η αύξηση της γωνίας  $\delta$ , η οποία είναι μεγαλύτερη από  $90^\circ$ , τείνει να μειώσει τη ροπή. Καθώς η επίδραση του πεδίου είναι μεγαλύτερη από την επίδραση της γωνίας, η ροπή αυξάνεται.

Η επίδραση του μαγνητικού πεδίου του δρομέα  $B_{rs}$  υπερισχύει της γωνίας  $\delta$ , μέχρι μια τιμή του φορτίου, η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη ροπή (Σχ. 2.13α). Η μέγιστη ροπή ονομάζεται ροπή ανατροπής (pull out torque, breakdown torque). Η ροπή ανατροπής είναι 2 έως 3 φορές μεγαλύτερη της ονομαστικής. Όταν η ροπή του φορτίου γίνει μεγαλύτερη από τη ροπή ανατροπής, η επίδραση του  $\sin \delta$  είναι εντονότερη από εκείνη του μαγνητικού πεδίου και η ροπή που αναπτύσσει ο κινητήρας μειώνεται. Το αποτέλεσμα στην περίπτωση αυτή είναι ο κινητήρας να σταματήσει (παθητικό φορτίο).

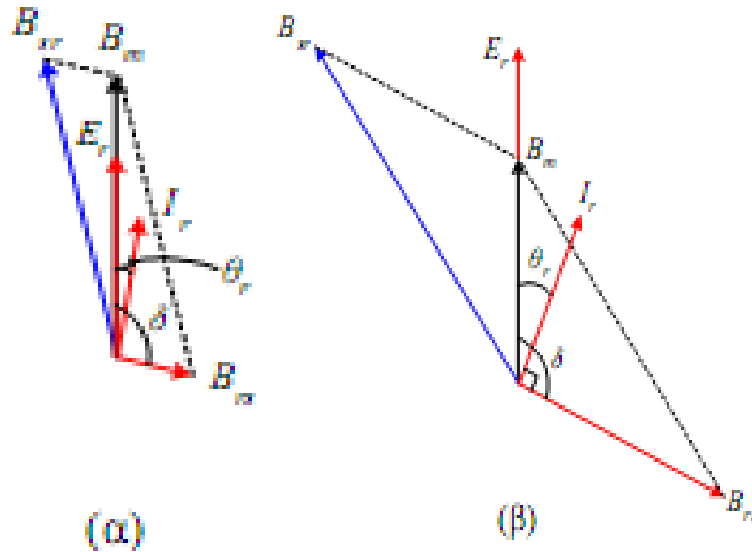
Η μεταβολή του ρεύματος του δρομέα με την ταχύτητα εικονίζεται στο Σχ. 2.13β. Σε μικρές τιμές της ολίσθησης, η μεταβολή του ρεύματος στο δρομέα και της ροπής είναι

γραμμική με την ολίσθηση. Αυτό οφείλεται στην αμελητέα αντίδραση του δρομέα  $X'_{lr}$ , συγκριτικά με την  $R'_r / s$ . Σε ροπές μεγαλύτερες από την ονομαστική, η συχνότητα των ρευμάτων στο δρομέα είναι αρκετά μεγάλη και η αντίδραση του δρομέα είναι συγκρίσιμη με την  $R'_r / s$ . Έτσι, ο συντελεστής ισχύος του δρομέα  $\cos\theta_r = \sin\delta$  μειώνεται. Η μεταβολή του ρεύματος του δρομέα και της ροπής περιορίζεται, σε ροπές μεγαλύτερες από την ονομαστική. Σε ροπές υψηλότερες από τη ροπή  $r$  ανατροπής, ο συντελεστής ισχύος του δρομέα γίνεται πολύ μικρός και η ροπή μειώνεται αντί να αυξάνει. Ακόμη, το ρεύμα του δρομέα είναι περίπου σταθερό.

Η ροπή που αναπτύσσει ο κινητήρας στη μηδενική ταχύτητα ονομάζεται ροπή εκκίνησης ( $T_{start}$ ). Η ροπή εκκίνησης είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική ροπή, συνήθως της τάξης του 150% της ονομαστικής.



**Σχ. 2.13** (α) Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας περιστροφής,  
 (β) αντίστοιχη χαρακτηριστική ρεύματος-ταχύτητας περιστροφής



Σχ. 2.14 Μεταβολή μαγνητιτών πεδίων επαγωγικής μηχανής (α) κενό φορτίο, (β) υπό μεγάλο φορτίο

### 2.3.9 Υπολογισμός αναπτυσσόμενης ροπής

Για τον υπολογισμό της ροπής που αναπτύσσει ο επαγωγικός κινητήρας, από την Εξ. (5.49), απαιτείται η γνώση της ισχύος διακένου. Ο υπολογισμός της ισχύος διακένου προϋποθέτει τον υπολογισμό του ρεύματος στο δρομέα. Για τον υπολογισμό του ρεύματος δρομέα στο ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα (Σχ. 2.15α), αντικαθιστούμε το τμήμα του κυκλώματος αριστερά σημείων Α–Β, με το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin. Η τάση και η σύνθετη αντίσταση Thevenin ορίζονται από τις σχέσεις :

$$V_T = \frac{jX_m}{R_s + j(X_{ls} + X_m)} V = V_T \angle \theta_T \quad (2.51)$$

$$Z_T = \frac{jX_m(R_s + jX_{ls})}{R_s + j(X_{ls} + X_m)} = R_T + jX_T \approx R_s + jX_{ls} \quad (2.52)$$

Το νέο ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα εικονίζεται στο Σχ. 2.15β. Το μέτρο του ρεύματος στο δρομέα είναι ίσο με :

$$I_r' = \frac{V_T}{\sqrt{(R_T + R_r/s)^2 + (X_T + X_{lr}')^2}} \quad (2.53)$$

Η ισχύς διακένου είναι :

$$P_{ag} = 3I_r'^2 \frac{R_r'}{s} = \frac{3V_T^2}{(R_T + R_r/s)^2 + (X_T + X_{lr}')^2} \frac{R_r'}{s} \quad (2.54)$$

και η ροπή :

$$T_e = \frac{P_{ag}}{\omega_s} = \frac{3V_T^2}{(R_T + R_r/s)^2 + (X_T + X_{lr}')^2} \frac{R_r'}{s\omega_s} \quad (2.55)$$

Από την Εξ. (2.55) προκύπτει ότι, η ροπή του κινητήρα μεταβάλλεται ανάλογα με το τετράγωνο της τάσης εξόδου. Επομένως, μια μικρή μεταβολή στην τάση V, προκαλεί σημαντική μεταβολή στην αναπτυσσόμενη ροπή. Στο Σχ. 2.16 εικονίζεται η πλήρης χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα, από την Εξ. (2.55). Η

επαγωγική μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια, όταν η ταχύτητα του δρομέα είναι μεγαλύτερη από τη σύγχρονη, οπότε η ολίσθηση γίνεται αρνητική. Η ολίσθηση είναι μεγαλύτερη από τη μονάδα στο δεύτερο τεταρτημόριο, όπου η φορά περιστροφής του κινητήρα είναι αντίθετη από τη φορά του στρεφόμενου πεδίου του στάτη. Η λειτουργία με  $s > 1$  επιτυγχάνεται με την αλλαγή της σύνδεσης δύο φάσεων στα τυλίγματα του στάτη, οπότε αντιστρέφεται η φορά των μαγνητικών πεδίων και ο κινητήρας υφίσταται πέδηση.

Ο κινητήρας αναπτύσσει τη μέγιστη ροπή όταν η ισχύς διακένου, η οποία καταναλώνεται στην ισοδύναμη αντίσταση  $R_r'/s$  είναι μέγιστη. Σύμφωνα με το θεώρημα μέγιστης μεταφοράς ισχύος, η ισχύς διακένου είναι μέγιστη όταν ισχύει η σχέση :

$$\frac{R_r'}{s} = \sqrt{R_T^2 + (X_T + X_{lr}')^2} \quad (2.56)$$

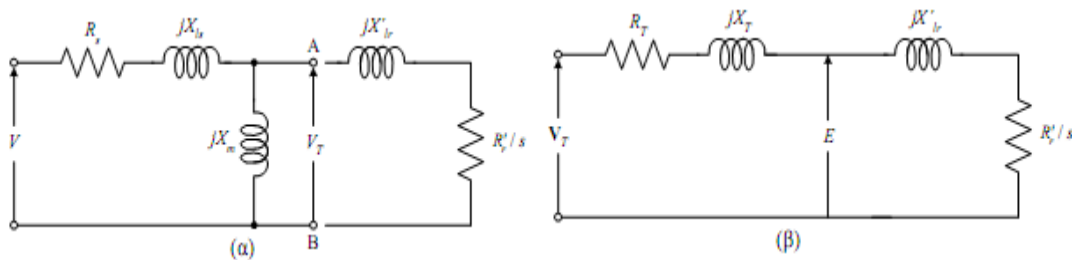
από την οποία προκύπτει η τιμή της ολίσθησης  $s$  που αντιστοιχεί στη ροπή ανατροπής :

$$S_m = \frac{R_r'}{\sqrt{R_T^2 + (X_T + X_{lr}')^2}} \approx \frac{R_r'}{X_{ls} + X_{lr}'} \quad (2.57)$$

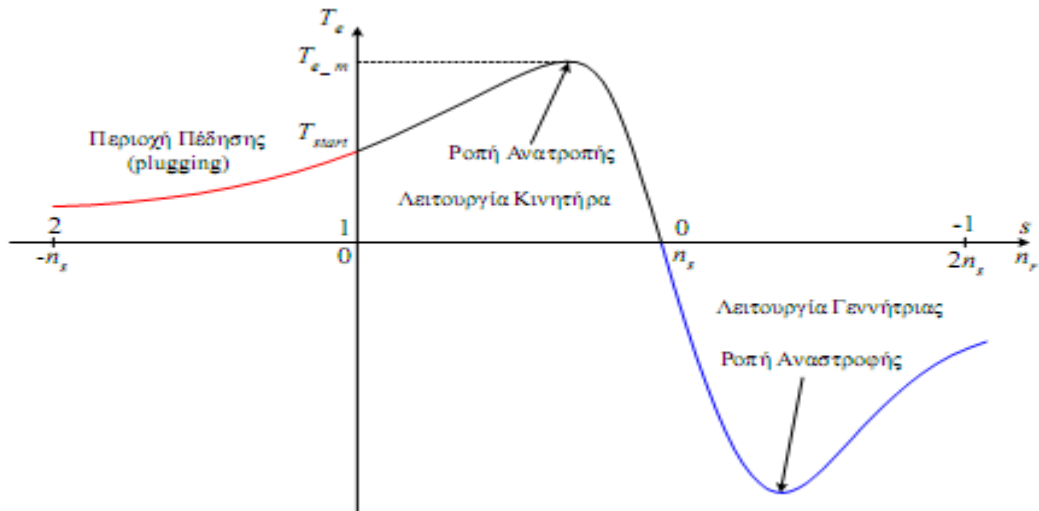
Από την Εξ. (2.57), η τιμή της ολίσθησης στη ροπή ανατροπής είναι ανάλογη με την αντίσταση του δρομέα. Επομένως, όσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση του δρομέα, σε τόσο μικρότερη ταχύτητα θα εμφανίζεται η μέγιστη ροπή. Αντικαθιστώντας την Εξ. (2.57) στην Εξ. (2.55), προκύπτει η ροπή ανατροπής :

$$T_{e,m} = \frac{3V_T^2}{2\omega_s [R_T + \sqrt{R_T^2 + (X_T + X_{lr}')^2}]} \approx \frac{3V_T^2}{2\omega_s [X_{ls} + X_{lr}']} \quad (2.58)$$

Η ροπή ανατροπής είναι ανάλογη με το τετράγωνο της τάσης εξόδου και αντιστρόφως ανάλογη των αντιδράσεων του στάτη και του δρομέα. Έτσι, οι αντιδράσεις σκέδασης πρέπει να είναι μικρές, όταν είναι επιθυμητή μια μεγάλη ροπή ανατροπής.



Σχ. 15 (α) Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα, (β) ισοδύναμο κατά Thevenin



Σχ. 2.16 Χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας σε λειτουργία κινητήρα - γεννήτριας

### 2.3.10 Κλάσεις επαγωγικών μηχανών

Η μορφή της χαρακτηριστικής ροπής –ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων εξαρτάται από την ωμική αντίσταση του δρομέα  $R_r'$  και την ολική αντίδραση σκέδασης  $X_{ls} + X_{lr}'$ . Ένας επαγωγικός κινητήρας με μεγάλη αντίσταση στο δρομέα, εμφανίζει τη μέγιστη ροπή σε μικρή ταχύτητα και έχει υψηλή ροπή εκκίνησης. Όμως, οι απώλειες ισχύος στην ονομαστική λειτουργία είναι υψηλές, εξαιτίας της μεγάλης ολίσθησης ( $P_{cu, r} = sP_{ag}$ ). Αντίθετα, ένας κινητήρας με μικρή αντίσταση στο δρομέα παρουσιάζει μικρή ροπή εκκίνησης, μεγάλο ρεύμα εκκίνησης, αλλά και υψηλό βαθμό απόδοσης στην ονομαστική λειτουργία. Ταυτόχρονα, η μεταβολή της ταχύτητας με το φορτίο είναι περιορισμένη. Ο συνδυασμός της επιθυμητής υψηλής αντίστασης κατά την εκκίνηση και της μικρής αντίστασης στην κανονική λειτουργία, επιτυγχάνεται ιδανικά στους κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα. Κατά την εκκίνηση των κινητήρων δακτυλιοφόρου δρομέα, προστίθενται εξωτερικές αντιστάσεις σε σειρά με το τύλιγμα του δρομέα, το οποίο έχει μικρή αντίσταση. Οι αντιστάσεις αυτές αφαιρούνται στην κανονική λειτουργία του κινητήρα. Με τον τρόπο αυτό οι χαρακτηριστικές ροπής –ταχύτητας του κινητήρα μεταβάλλονται όπως στο Σχ. 2.17.

Η επιθυμητή μεταβολή της αντίστασης του δρομέα ανάλογα με την τιμή της ολίσθησης,

μπορεί να επιτευχθεί και στους κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού, με την κατάλληλη σχεδίαση των αυλακώσεων του δρομέα. Όταν οι αυλακώσεις είναι κοντά στην επιφάνεια του δρομέα, οι ράβδοι του τυλίγματος κλωβού είναι σε ισχυρή σύζευξη με το τύλιγμα του στάτη. Επομένως, μόνο ένα μικρό τμήμα της ροής δεν συνδέει το τύλιγμα του στάτη. Έτσι, η αντίδραση σκέδασης  $X_{lr}'$  είναι μικρή.

Αντίθετα, όταν οι ράβδοι είναι τοποθετημένες βαθιά μέσα στο δρομέα, η ροή και η αντίδραση σκέδασης του δρομέα είναι υψηλές. Η ωμική αντίσταση του τυλίγματος κλωβού εξαρτάται από το μέγεθος των αυλακώσεων, η οποία επιβάλει τη διατομή των ράβδων. Όσο μεγαλύτερη είναι η διατομή των ράβδων, τόσο μικρότερη είναι η ωμική αντίσταση του κλωβού.

Οι επαγωγικοί κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες, ανάλογα με τη διαμόρφωση των αυλακώσεων του δρομέα, οι οποίες ονομάζονται κλάσεις

σχεδίασης. Στους κινητήρες κλάσης A, η διαμόρφωση των αυλακώσεων επιβάλλει τη χρήση ράβδων μεγάλης διατομής, οι οποίες βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του δρομέα. Έτσι, το τύλιγμα κλωβού εμφανίζει μικρή αντίσταση και μικρή αντίδραση. Οι κινητήρες κλάσης A έχουν μικρή ροπή εκκίνησης και μεγάλο ρεύμα εκκίνησης. Όμως, η ολίσθηση του κινητήρα στο ονομαστικό φορτίο είναι πολύ μικρή, με αποτέλεσμα ο βαθμός απόδοσης να είναι υψηλός. Η χαρακτηριστική ροπής –ταχύτητας του κινητήρα εικονίζεται στο Σχ. 2.18. Στους κινητήρες κλάσης D, οι ράβδοι του κλωβού βρίσκονται και πάλι κοντά στην επιφάνεια του δρομέα αλλά έχουν μικρή διατομή. Έτσι, η αντίσταση του κλωβού είναι μεγάλη, ενώ η αντίδραση σκέδασης είναι μικρή. Ως αποτέλεσμα, οι κινητήρες κλάσης D έχουν μεγάλη ροπή

εκκίνησης και μικρό ρεύμα εκκίνησης. Όμως, η ολίσθηση στο ονομαστικό φορτίο είναι μεγάλη, με αποτέλεσμα τις υψηλές απώλειες στο δρομέα και το μικρό βαθμό απόδοσης. Επιπλέον, η διακύμανση της ταχύτητας με το φορτίο είναι σημαντική.

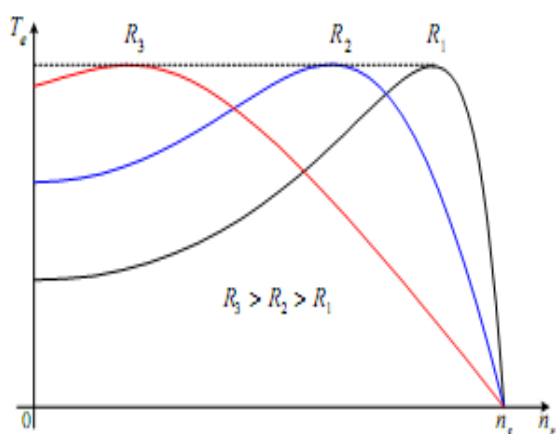
Η αντίσταση του δρομέα στους κινητήρες κλάσης A και D είναι σταθερή. Αντίθετα, στους κινητήρες με κλάση σχεδίασης B και C, η αντίσταση του δρομέα μεταβάλλεται με την ολίσθηση (ταχύτητα). Έτσι, οι κινητήρες αυτοί συνδυάζουν την υψηλή ροπή εκκίνησης των κινητήρων κλάσης D και τον υψηλό βαθμό απόδοσης στην ονομαστική λειτουργία των κινητήρων κλάσης A.

Στους κινητήρες με κλάση B, η μεταβολή της αντίστασης του δρομέα με την ολίσθηση,

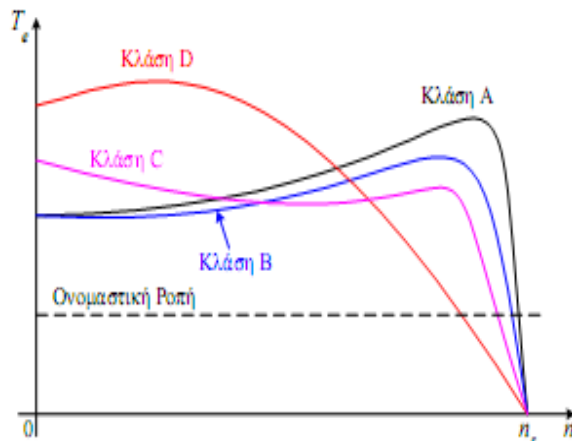
επιτυγχάνεται κατασκευάζοντας το δρομέα με βαθιά αυλάκια. Στην ονομαστική λειτουργία, όπου η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων στο δρομέα είναι μικρή, το ρεύμα ρέει ομοιόμορφα σ' όλη τη διατομή των ράβδων. Έτσι, η ενεργός διατομή των ράβδων είναι μεγάλη και η αντίσταση του δρομέα μικρή, όπως στους κινητήρες κλάσης A. Κατά την εκκίνηση, όπου η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων είναι μεγάλη, οι αντιδράσεις σκέδασης των ράβδων είναι υψηλές. Το ρεύμα του δρομέα ρέει μόνο από τις περιοχές των ράβδων που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του δρομέα, οι οποίες έχουν μικρές αντιδράσεις. Με τον τρόπο αυτό η ενεργός διατομή των ράβδων μειώνεται και η αντίσταση του δρομέα εμφανίζεται αυξημένη κατά την εκκίνηση, όπως στους κινητήρες κλάσης D. Η ροπή εκκίνησης των κινητήρων τάξης B είναι σχεδόν ίση μ' εκείνη των κινητήρων τάξης A, αλλά το ρεύμα εκκίνησης είναι μειωμένο κατά 25% περίπου.

Στους κινητήρες κλάσης C, η μεταβολή της αντίστασης του δρομέα με την ταχύτητα είναι εντονότερη και επιτυγχάνεται κατασκευάζοντας το δρομέα με διπλό κλωβό. Ο κινητήρας φέρει ένα τύλιγμα κλωβού, το οποίο αποτελείται από ράβδους μεγάλης διατομής τοποθετημένες στο εσωτερικό του δρομέα. Ένας δεύτερος ανεξάρτητος κλωβός από ράβδους μικρής διατομής, βρίσκεται στην επιφάνεια του δρομέα. Στην κανονική λειτουργία του κινητήρα, το ρεύμα του δρομέα ρέει και από τα δύο τυλίγματα κλωβού και ο κινητήρας εμφανίζει μικρή αντίσταση στο δρομέα. Κατά την εκκίνηση, το ρεύμα κυκλοφορεί κυρίως από το εξωτερικά τοποθετημένο τύλιγμα κλωβού, με την υψηλή αντίσταση. Το μειονέκτημα των κινητήρων με διπλό κλωβό είναι το μεγαλύτερο κόστος κατασκευής τους, σε σχέση με τις υπόλοιπες κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα.





Σχ. 2.17 Χαρακτηριστική ροπής ταχύτητας



Σχ. 2.18 Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας ανάλογα την κλάση του κινητήρα

### 2.3.11 Πειραματικός προσδιορισμός παραμέτρων ισοδύναμου κυκλώματος

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος του επαγωγικού κινητήρα, πραγματοποιούνται τρία πειράματα. Οι ακριβείς συνθήκες των πειραμάτων αυτών περιγράφονται στην τυποποίηση 112 της IEEE. Αντίστοιχες τυποποιήσεις έχουν εκδώσει και άλλοι οργανισμοί.

Στον προσδιορισμό της ωμικής αντίστασης του στάτη  $R_s$ , χρησιμοποιείται το πείραμα συνεχούς ρεύματος (dc test). Η διάταξη μέτρησης εικονίζεται στο Σχ. 2.19. Τα τυλιγμάτα του στάτη είναι συνδεδεμένα σε αστέρα και τροφοδοτούνται από μια πηγή συνεχούς τάσης. Η τάση της πηγής ρυθμίζεται έτσι ώστε, το ρεύμα  $I_{s,dc}$  να είναι ίσο με το ονομαστικό. Εξαιτίας της συνεχούς τάσης εξόδου, δεν επάγονται ρεύματα στο δρομέα και η αντίδραση του στάτη είναι μηδενική. Επομένως, η τιμή του ρεύματος περιορίζεται μόνο από την ωμική αντίσταση των δύο τυλιγμάτων του στάτη, σε σύνδεση σειράς :

$$R_s = \frac{V_{dc}}{2I_{s,dc}} \quad (2.59)$$

Το ρεύμα επιλέγεται ίσο με το ονομαστικό, έτσι ώστε η μέτρηση της αντίστασης  $R_s$

να αντιστοιχεί στη θερμοκρασία του κινητήρα με το ονομαστικό φορτίο. Η αντίσταση των χάλκινων τυλιγμάτων των κινητήρων μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία. Ακόμη, εξαιτίας του επιδερμικού φαινομένου, το οποίο εμφανίζεται στην κανονική λειτουργία με εναλλασσόμενη τάση, η αντίσταση που προσδιορίζεται από το πείραμα συνεχούς ρεύματος είναι ελαφρά μικρότερη από την πραγματική.

Το πείραμα κενού (no-load test) χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της αντίδρασης μαγνήτισης  $X_m$ , των απωλειών του κινητήρα χωρίς φορτίο και της καμπύλης μαγνήτισης. Ο κινητήρας τροφοδοτείται με την ονομαστική τάση και λειτουργεί χωρίς φορτίο. Επομένως, η ισχύς που απορροφά ο κινητήρας από το δίκτυο είναι ίση με την ισχύ απωλειών, καθώς το φορτίο είναι μηδενικό. Η τριφασική ισχύς εισόδου, τα ρεύματα γραμμής  $I_{s,nl}$  και η πολική τάση  $V_{L,nl}$  μετρούνται με τα κατάλληλα όργανα. Επειδή ο κινητήρας λειτουργεί στο κενό, η ολίσθηση και το ρεύμα του δρομέα είναι σχεδόν μηδενικά. Έτσι, το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα αποκτά την απλοποιημένη μορφή του Σχ. 2.20. Το μέτρο της σύνθετης αντίστασης εισόδου του κινητήρα είναι ίσο με το λόγο της τάσης προς το ρεύμα :

$$\frac{V_{L,nl}}{\sqrt{3}I_{s,nl}} = \sqrt{R_s^2 + (X_{ls} + X_m)^2} \quad (2.60)$$

Από την Εξ. (2.60) υπολογίζεται η ολική αντίδραση του στάτη  $X_{ls} + X_m$ . Για τον ανεξάρτητο καθορισμό των δύο επιμέρους αντιδράσεων, πρέπει να διεξαχθεί και το τρίτο πείραμα. Με το πείραμα κενού μετράται η ισχύς που απορροφά ο κινητήρας  $P_{in, nl}$ . Η ισχύς αυτή είναι ίση με τις απώλειες του κινητήρα :

$$P_{in, nl} = P_{loss} = P_{cu, s} + P_{cu, r} + P_{iron} + P_{fw} + P_{stray} \quad (2.61)$$

Στην Εξ. (2.61), οι απώλειες χαλκού στο δρομέα είναι ελάχιστες. Μικρές είναι και οι κατανεμημένες απώλειες, στη λειτουργία κενού. Οι απώλειες χαλκού στο στάτη είναι ίσες με  $P_{cu, nl} = 3R_s I_{s, nl}^2$ . Επομένως, το άθροισμα των απωλειών σιδήρου και των μηχανικών είναι ίσο με :

$$P_{iron} + P_{fw} = P_{in, nl} - 3R_s I_{s, nl}^2 \quad (2.62)$$

Όταν ο κινητήρας λειτουργεί χωρίς φορτίο, το ρεύμα του στάτη είναι με μεγάλη ακρίβεια ίσο με το ρεύμα μαγνήτισης ( $I_{s, nl} \approx I_m$ ). Ακόμη, η τάση εξόδου είναι περίπου ίση με την τάση  $E$ . Έτσι, μεταβάλλοντας την τάση του στάτη και μετρώντας την τάση αυτή και το ρεύμα, προσδιορίζεται η καμπύλη μαγνήτισης του κινητήρα, η οποία έχει τη μορφή του Σχ. 2.21.

Με το πείραμα ακίνητου δρομέα (blocked rotor test), υπολογίζονται και οι υπόλοιπες παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος. Στο πείραμα αυτό ο δρομέας διατηρείται ακίνητος, ενώ ο κινητήρας τροφοδοτείται με την κατάλληλη μειωμένη τάση, έτσι ώστε το ρεύμα του στάτη να είναι ίσο με το ονομαστικό. Επειδή ο δρομέας δεν στρέφεται, η ολίσθηση είναι ίση με τη μονάδα. Επομένως, η σύνθετη αντίσταση του δρομέα είναι πολύ μικρότερη από την αντίδραση μαγνήτισης και το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα αποκτά την απλοποιημένη μορφή του Σχ. 2.22. Το μέτρο της σύνθετης αντίστασης εισόδου του κινητήρα είναι ίσο με το λόγο της φασικής τάσης εξόδου

$V_{L, br} / \sqrt{3}$  προς το ρεύμα του στάτη  $I_{s, br}$  :

$$\frac{V_{L, br}}{\sqrt{3} I_{s, br}} = |Z_{br}| = \sqrt{(R_s + R_r')^2 + (X_{ls} + X_{lr}')^2} \quad (2.63)$$

Από τη μέτρηση της ισχύος εισόδου  $P_{in, br}$ , υπολογίζεται ο συντελεστής ισχύς :

$$\cos \Phi_{br} = \frac{P_{in, br}}{\sqrt{3} V_{L, br} I_{s, br}} \quad (2.64)$$

και επειδή  $Z_{br} = R_{br} + jX_{br} = |Z_{br}| \sin \Phi_{br}$ , το άθροισμα των αντιστάσεων του στάτη και του δρομέα είναι ίσο με :

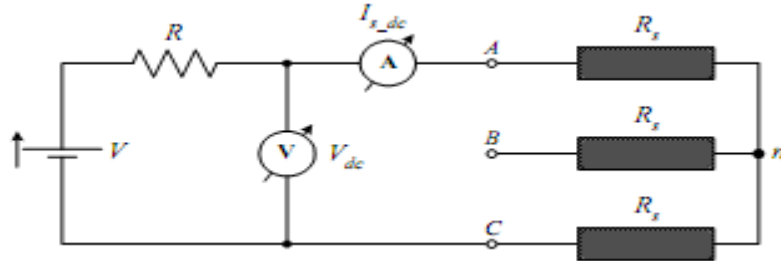
$$R_s + R_r' = \frac{V_{L, br}}{\sqrt{3} I_{s, br}} \cos \Phi_{br} \quad (2.65)$$

Αντίστοιχα, η ολική αντίδραση σκέδασης είναι ίση με :

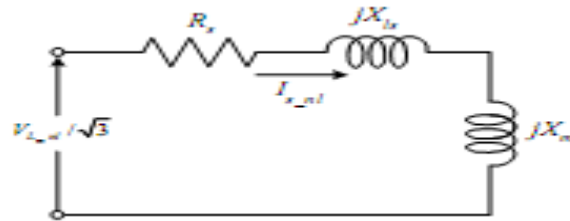
$$X_{br} = X_{ls} + X_{lr}' = \frac{V_{L, br}}{\sqrt{3} I_{s, br}} = \sqrt{\left(\frac{V_{L, br}}{\sqrt{3} I_{s, br}}\right)^2 - (R_s + R_r')^2} \quad (2.66)$$

Οι τιμές των αντιδράσεων στην Εξ. (2.66), αντιστοιχούν στη συχνότητα εξόδου του κινητήρα. Επειδή δεν υπάρχει κάποια απλή μέθοδος για τον ανεξάρτητο καθορισμό των επιμέρους αντιδράσεων, έχει προκύψει εμπειρικά ο παραπάνω πίνακας υπολογισμού, ανάλογα με το είδος και την κλάση σχεδίασης του κινητήρα.

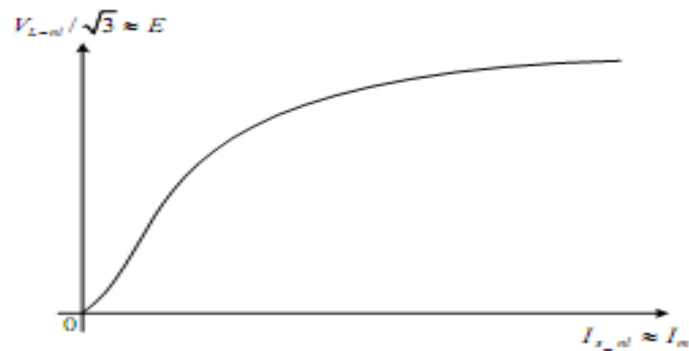
Η αντίσταση του δρομέα υπολογίζεται από την Εξ. (2.65), αν αφαιρέσουμε από την ολική αντίσταση, την αντίσταση του στάτη από το πείραμα συνεχούς ρεύματος. Όμως, η ενεργός αντίσταση του δρομέα στους κινητήρες κλάσης B και C, εξαρτάται από τη συχνότητα των ρευμάτων στο δρομέα. Στο πείραμα ακίνητου δρομέα, η συχνότητα των ρευμάτων στο δρομέα είναι ίση με τη συχνότητα του στάτη. Επομένως, για τον ακριβή καθορισμό της αντίστασης του δρομέα στους κινητήρες αυτούς, η συχνότητα της τάσης εξόδου του κινητήρα  $V_{L,br}$  πρέπει να είναι πολύ μικρότερη από τη συχνότητα του δικτύου.



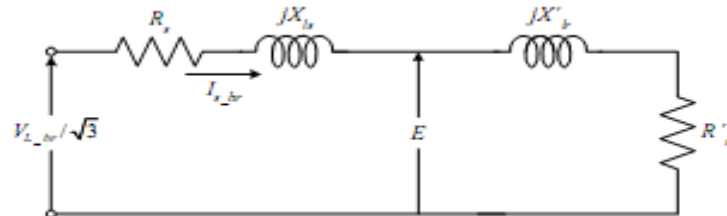
Σχ. 2.19 Μέτρηση αντίστασης στάτη για διάταξη συνεχούς ρεύματος



Σχ. 2.20 Απλοποιημένο ισοδύναμο κατά το πείραμα κενού φορτίου



Σχ. 2.21 Καμπύλη μαγνήτισης κατά το πείραμα κενού φορτίου



Σχ. 2.22 Απλοποιημένο ισοδύναμο στο πείραμα ακίνητου δρομέα

## 2.4 Δυναμικό μοντέλο d-q

Στο σημείο αυτό θα δοθεί το δυναμικό μοντέλο της επαγωγικής μηχανής σε dq πλαίσιο αναφοράς δύο κάθετων αξόνων. Το πλαίσιο αναφοράς των ποσοτήτων του μοντέλου της

μηχανής εν γένει μπορεί να στρέφεται με αυθαίρετη ταχύτητα. Η επιλογή τούτης της ταχύτητας σχετίζεται με ζητήματα ελέγχου και μοντελοποίησης. Η μοντελοποίηση της επαγωγικής μηχανής σε σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς κάνει όλες τις ποσότητες της μηχανής να φαίνονται ως ποσότητες dc κάτι που είναι ιδιαίτερα επιθυμητό στον έλεγχο. Άλλωστε ο έλεγχος τέτοιων ποσοτήτων παρουσιάζει πλεονεκτήματα και ευκολίες σε σχέση με τον έλεγχο αντίστοιχων εναλλασσόμενων. Ωστόσο, η μοντελοποίηση της μηχανής σε στατό πλαίσιο αναφοράς προσφέρει πλεονεκτήματα στην ανάλυση και κατανόηση της λειτουργίας του συστήματος.

#### 2.4.1 Σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς

Για τη σύνθεση του μοντέλου της επαγωγικής μηχανής στο σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς (εξισώσεις Kron) πρέπει οι μεταβλητές στάτη και δρομέα να αναχθούν σε τούτο το κοινό πλαίσιο αναφοράς. Υιοθετώντας την μοντελοποίηση του κυκλώματος στάτη και δρομέα με ένα ωμικό επαγωγικό (R-L) εν σειρά κύκλωμα, προκύπτουν οι εξής εξισώσεις για τις τάσεις του στάτη :

$$V_{qs}^s = R_s i_{qs}^s + \frac{d \Psi_{qs}^s}{dt} \quad (2.67)$$

$$V_{ds}^s = R_s i_{ds}^s + \frac{d \Psi_{ds}^s}{dt} \quad (2.68)$$

Όπου ο εκθέτης s δηλώνει ότι τα μεγέθη αναφέρονται σε στατό πλαίσιο αναφοράς.

Εφαρμόζοντας κατάλληλο αλγεβρικό μετασχηματισμό, από το  $d_s q_s$  στο  $d_e q_e$  πλαίσιο αναφοράς, οι εξισώσεις γίνονται :

$$V_{qs}^e = R_s i_{qs}^e + \frac{d \Psi_{qs}^e}{dt} + \omega_e \Psi_{ds}^e \quad (2.69)$$

$$V_{ds}^e = R_s i_{ds}^e + \frac{d \Psi_{ds}^e}{dt} - \omega_e \Psi_{qs}^e \quad (2.70)$$

Όπου ο εκθέτης e δηλώνει ότι οι ποσότητες αναφέρονται στο σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς. Ο τελευταίος όρος των εξισώσεων 2.69 και 2.70 μπορεί να οριστεί ως τάση ταχύτητας λόγω της περιστροφής των αξόνων.

Παρατηρούμε ότι οι πεπλεγμένες ροές του στάτη ευθέως  $d_e$  και εγκάρσιου  $q_e$  άξονα επάγουν ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις στον ( $q_e$ ) και ( $d_e$ ) άξονα αντίστοιχα με  $90^\circ$  προπορεία φάσεως. Αντίστοιχα για τον δρομέα ισχύουν :

$$V_{qr}^r = R_r i_{qr}^r + \frac{d \Psi_{qr}^r}{dt} \quad (2.71)$$

$$V_{dr}^r = R_r i_{dr}^r + \frac{d \Psi_{dr}^r}{dt} \quad (2.72)$$

Όπου όλες οι παράμετροι αναφέρονται στον δρομέα.

Εφαρμόζοντας κατάλληλο μετασχηματισμό από το  $d_r q_r$  στο  $d_e q_e$  πλαίσιο αναφοράς , οι εξισώσεις του δρομέα γίνονται :

$$V_{qr}^e = R_r i_{qr}^e + \frac{d \Psi_{qr}^e}{dt} + (\omega_e - \omega_r) \Psi_{dr}^e \quad (2.73)$$

$$V_{dr}^e = R_r i_{dr}^e + \frac{d \Psi_{dr}^e}{dt} - (\omega_e - \omega_r) \Psi_{qr}^e \quad (2.74)$$

Το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα επαγωγής στο σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς, όπως περιγράφεται από τις εξισώσεις 2.69, 2.70, 2.73, 2.74 για το στάτη και το δρομέα, τον ευθύ και τον εγκάρσιο άξονα είναι αυτό του σχήματος 23

Προφανώς για μηχανή βραχυκυκλωμένου δρομέα τύπου κλωβού οι τάσεις του δρομέα  $V_{qr}^e$  και  $V_{dr}^e$  είναι μηδενικές. Οι πεπλεγμένες ροές μπορούν εύκολα να εκφραστούν συναρτήσει των ρευμάτων με τη βοήθεια των ισοδύναμων κυκλωμάτων ευθέος και εγκάρσιου άξονα :

$$\Psi_{qs} = L_{ls} i_{qs} + L_m (i_{qs} + i_{qr}) \quad (2.75)$$

$$\Psi_{qr} = L_{lr} i_{qr} + L_m (i_{qs} + i_{qr}) \quad (2.76)$$

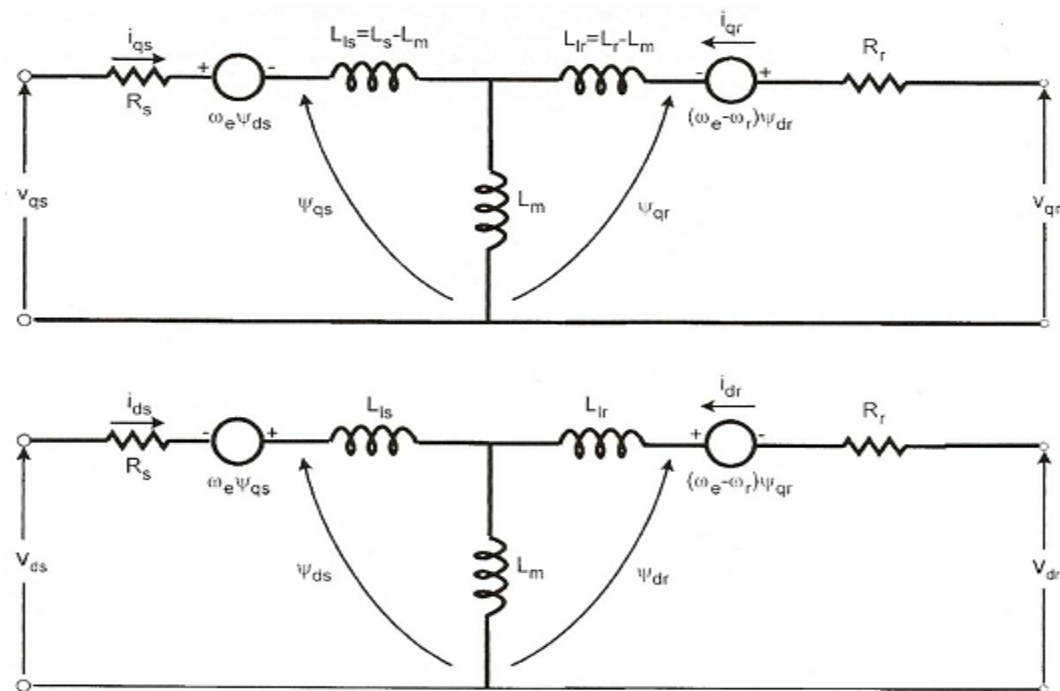
$$\Psi_{qm} = L_m (i_{qs} + i_{qr}) \quad (2.77)$$

$$\Psi_{ds} = L_{ls} i_{ds} + L_m (i_{ds} + i_{dr}) \quad (2.78)$$

$$\Psi_{dr} = L_{lr} i_{dr} + L_m (i_{ds} + i_{dr}) \quad (2.79)$$

$$\Psi_{dm} = L_m (i_{ds} + i_{dr}) \quad (2.80)$$

Όπου τα ρεύματα είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές και αναφέρονται στο σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς.



**Σχ. 2.23** Ισοδύναμο κύκλωμα για το δυναμικό μοντέλο επαγωγικής μηχανής σε σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο. Επάνω φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα εγκάρσιου και κάτω το ισοδύναμο κύκλωμα ευθέος άξονα.

Αντικαθιστώντας τις εκφράσεις των πεπλεγμένων ροών 2.75 - 2.80 στις εξισώσεις τάσεων στάτη 2.69, 2.70 και δρομέα 2.73, 2.74 λαμβάνουμε το δυναμικό μοντέλο του ηλεκτρικού μέρους της μηχανής σε μορφή πίνακα :

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_{qr} \\ V_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & \omega_e L_s & p L_m & \omega_e L_m \\ -\omega_e L_s & R_s + pL_s & -\omega_e L_s & p L_m \\ p L_m & (\omega_e - \omega_r)L_m & R_r + pL_r & (\omega_e - \omega_r)L_r \\ -(\omega_e - \omega_r)L_m & p L_m & -(\omega_e - \omega_r)L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{qs} \\ i_{qr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.81)$$

όπου  $p$  ο τελεστής Laplace.

Με χρήση του μοντέλου αυτής της μηχανής, γνώση των τάσεων εξόδου και της ταχύτητας είναι δυνατός ο υπολογισμός των ρευμάτων στάτη και δρομέα, ευθέως και εγκάρσιου άξονα. Αντίστοιχα, είναι δυνατός ο υπολογισμός των τάσεων εξόδου γνωρίζοντας τα ρεύματα του στάτη και την ταχύτητα περιστροφής. Η ταχύτητα αυτή περιστροφής του δρομέα προκύπτει από την επίλυση της εξίσωσης ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων η οποία συσχετίζει το ηλεκτρικό με το μηχανικό μέρος της μηχανής επαγωγής.

Γνωρίζοντας τη γενική έκφραση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής σε διανυσματική μορφή :

$$T_e = \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) \bar{\Psi}_m \times \bar{I}_r \quad (2.82)$$

Και αναλύοντας ροή διακένου και ρεύμα δρομέα στις  $d_e$  και  $q_e$  συνιστώσες τους όπως εξηγείται στο διανυσματικό διάγραμμα του σχήματος 24 έχουμε :

$$T_e = \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) (\Psi_{dm} i_{qr} - \Psi_{qm} i_{dr}) \quad (2.83)$$

Καθώς και τις ισοδύναμες εκφράσεις :

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) (\Psi_{dm} i_{qs} - \Psi_{qm} i_{ds}) = \\ &\frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) (\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}) = \\ &\frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) = \\ &\frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) (\Psi_{dr} i_{qr} - \Psi_{qr} i_{dr}) \quad (2.84) \end{aligned}$$



$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_{qr} \\ V_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 & pL_m & 0 \\ 0 & R_s + pL_s & 0 & pL_m \\ pL_m & -\omega_r L_m & R_r + pL_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r L_m & pL_m & \omega_r L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{qs} \\ i_{qr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.86)$$

Αντικαθιστώντας  $\omega_e=0$  στις εξισώσεις τάσεως στάτη 2.69, 2.70 και δρομέα 2.73, 2.74 λαμβάνουμε τις αντίστοιχες εξισώσεις για τα μεγέθη ανοιγμένα στο στατό πλαίσιο αναφοράς :

$$V_{qs}^s = R_s i_{qs}^s + \frac{d \Psi_{qs}^s}{dt} \quad (2.87)$$

$$V_{ds}^s = R_s i_{ds}^s + \frac{d \Psi_{ds}^s}{dt} \quad (2.88)$$

$$0 = R_r i_{qs}^e + \frac{d \Psi_{qr}^s}{dt} - \omega_r \Psi_{dr}^s \quad (2.89)$$

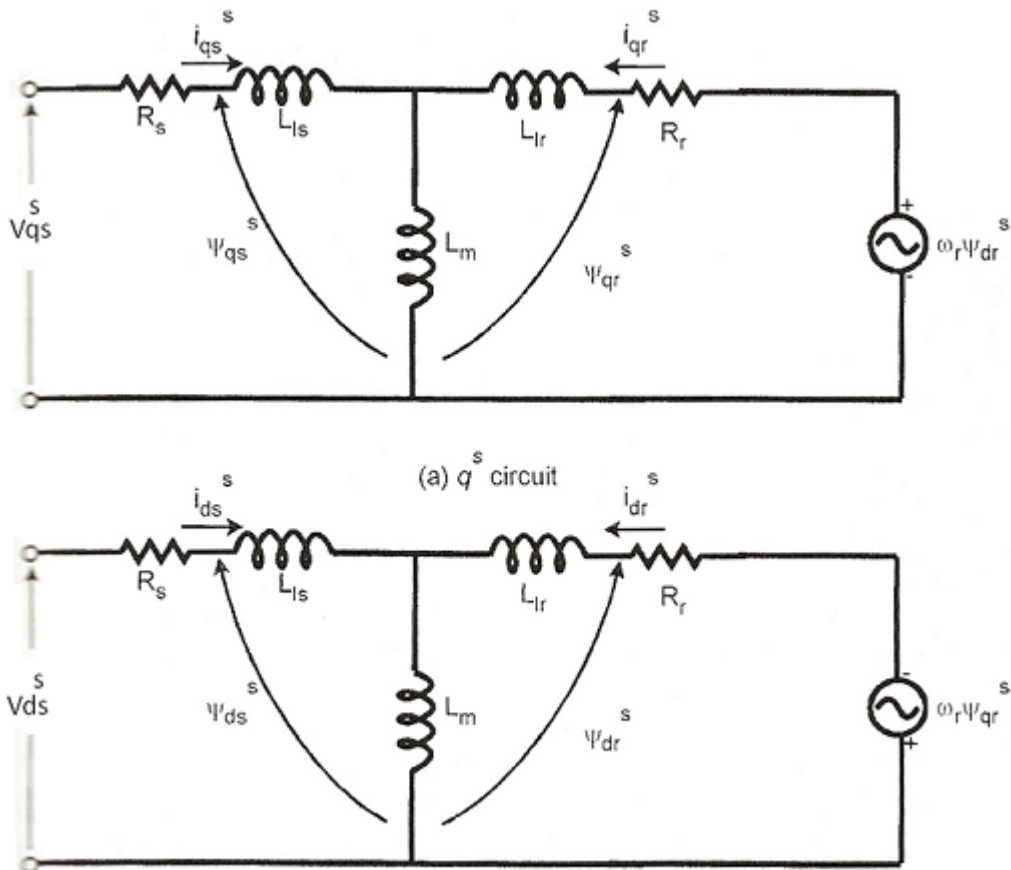
$$0 = R_r i_{dr}^s + \frac{d \Psi_{dr}^s}{dt} + \omega_r \Psi_{qr}^s \quad (2.90)$$

Όπου  $V_{dr}^s=0$  και  $V_{qr}^s=0$  για βραχυκυκλωμένο δρομέα τύπου κλωβού. Τα προκύπτοντα από τις παραπάνω εξισώσεις ισοδύναμα κυκλώματα ευθέως και εγκάρσιου άξονα φαίνονται στο σχήμα 25. Σε αντίθεση με τις dc ποσότητες του σύγχρονα στρεφόμενου πλαισίου αναφοράς εδώ που τα μεγέθη της μηχανής φαίνονται να εναλλάσσονται με τη σύγχρονη ταχύτητα.

Οι εξισώσεις της ηλεκτρομαγνητικής ροπής μπορούν επίσης να γραφούν συνάρτηση των πεπλεγμένων ροών και ρευμάτων ευθέως και εγκάρσιου άξονα στάτη και δρομέα στο στατό πλαίσιο αναφοράς. Οι εκφράσεις είναι όμοιες με αυτές στο σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο και έχουν ως εξής :

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) (\Psi_{dm}^s i_{qr}^s - \Psi_{qm}^s i_{dr}^s) = \\ & \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) (\Psi_{dm}^s i_{qs}^s - \Psi_{qm}^s i_{ds}^s) = \\ & \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) (\Psi_{ds}^s i_{qs}^s - \Psi_{qs}^s i_{ds}^s) = \\ & \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) L_m (i_{qs}^s i_{dr}^s - i_{ds}^s i_{qr}^s) = \\ & \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) (\Psi_{dr}^s i_{qr}^s - \Psi_{qr}^s i_{dr}^s) \quad (2.91) \end{aligned}$$





**Σχήμα 2.25.** Ισοδύναμο κύκλωμα για το δυναμικό μοντέλο επαγωγικής μηχανής σε στατό πλαίσιο αναφοράς δύο αξόνων. Εγκάρσιο και ευθέως άξονα ισοδύναμο, πάνω και κάτω αντίστοιχα.

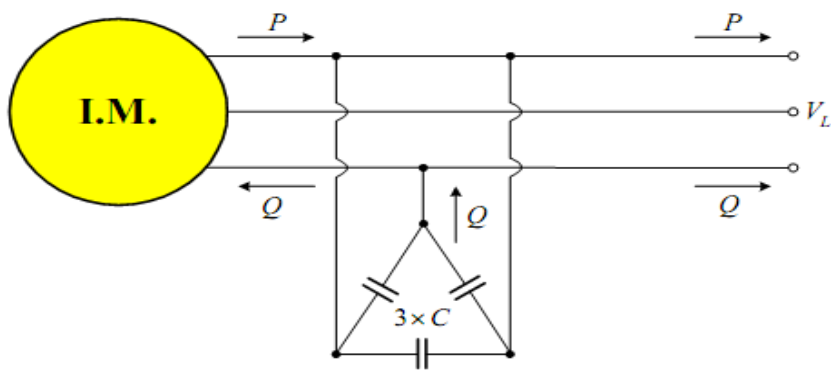
## 2.5 Η επαγωγική μηχανή ως γεννήτρια

Η επαγωγική μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια, όταν στρέφεται από μια κινητήρια μηχανή με ταχύτητα μεγαλύτερη της σύγχρονης (Σχ. 2.16). Η τριφασική ισχύς που παράγει η επαγωγική γεννήτρια, εξαρτάται από τη ροπή που εφαρμόζει η κινητήρια μηχανή. Η ροπή αυτή πρέπει να είναι μικρότερη από μια μέγιστη τιμή, η οποία ονομάζεται ροπή αναστροφής (push over torque). Η ροπή αναστροφής είναι μεγαλύτερη από τη ροπή ανατροπής. Η ταχύτητα της γεννήτριας αυξάνεται υπερβολικά, όταν η επιβαλλόμενη ροπή γίνει μεγαλύτερη από τη ροπή αναστροφής.

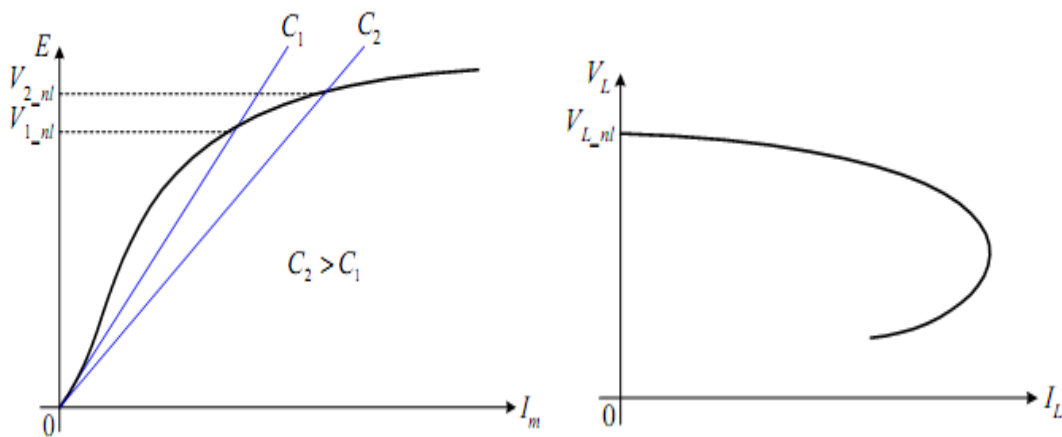
Το μεγάλο μειονέκτημα της επαγωγικής γεννήτριας είναι ότι δεν παράγει άεργο ισχύ. Επιπλέον, για την ανάπτυξη του μαγνητικού πεδίου πρέπει να καταναλώσει άεργο ισχύ. Για το λόγο αυτό, οι επαγωγικές γεννήτριες σπάνια χρησιμοποιούνται αυτόνομα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Συνήθως συνδέονται στο ηλεκτρικό δίκτυο, το οποίο τις τροφοδοτεί με την αναγκαία άεργο ισχύ και ρυθμίζει την τάση εξόδου τους. Η κυριότερη εφαρμογή τους είναι στις ανεμογεννήτριες, οι οποίες συνδέονται στο υπάρχον ισχυρό ηλεκτρικό δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή, η επαγωγική μηχανή προσφέρει απλή κατασκευή και τη δυνατότητα περιστροφής της με ταχύτητα η οποία μπορεί να μεταβάλλεται.

Για την αυτόνομη λειτουργία της επαγωγικής γεννήτριας απαιτείται η σύνδεση πυκνωτών, όπως εικονίζεται στο Σχ. 2.26. Οι πυκνωτές παρέχουν την άεργο ισχύ που απαιτεί η γεννήτρια και το φορτίο. Η τάση εξόδου της γεννήτριας στη λειτουργία χωρίς φορτίο, ορίζεται από το σημείο τομής της καμπύλης μαγνήτισης και της χαρακτηριστικής τάσης – ρεύματος των πυκνωτών (Σχ. 2.27). Η αυτοδιέγερση της επαγωγικής γεννήτριας, όπως και στις γεννήτριες συνεχούς ρεύματος, οφείλεται στον παραμένον μαγνητισμό.

Η χαρακτηριστική φορτίου εικονίζεται στο Σχ. 2.28, όταν η γεννήτρια τροφοδοτεί ένα επαγωγικό φορτίο. Η απότομη πτώση της τάσης εξόδου με την αύξηση του ρεύματος φορτίου, οφείλεται στην αύξηση της άεργου ισχύος που απαιτεί το φορτίο. Την άεργο ισχύ παρέχουν αποκλειστικά οι πυκνωτές C, με σταθερή τιμή. Εκτός από τη μεταβολή της τάσης εξόδου με το φορτίο, μεταβάλλεται και η ταχύτητα του κινητήρα. Έτσι, η συχνότητα των τάσεων εξόδου δεν είναι σταθερή.



Σχ. 2.26. Αυτόνομη λειτουργία επαγωγικής γεννήτριας αυτόνομα.



Σχ. 2.27 Τάση εξόδου επαγωγικής γεννήτριας Σχ. 2. 28 Χαρακτηριστική φορτίου επαγωγικής γεννήτριας

## 2.6 Έλεγχος της ταχύτητας των επαγωγικών μηχανών

Όταν ένας τριφασικός επαγωγικός κινητήρας τροφοδοτείται από το δίκτυο σταθερής τάσης και συχνότητας, στρέφεται με μια ταχύτητα η οποία είναι λίγο μικρότερη από τη σύγχρονη. Η μεταβολή της ταχύτητας από τη σύγχρονη εξαρτάται από το φορτίο και είναι τόσο μεγαλύτερη όσο υψηλότερη είναι η αντίσταση του δρομέα. Όμως, η λειτουργία του κινητήρα με μειωμένη ταχύτητα σημαίνει αύξηση της ολίσθησης και των απωλειών χαλκού στο δρομέα ( $P_{cu, r} = sP_{ag}$ ), με συνέπεια τη μείωση του βαθμού απόδοσης.

Ο έλεγχος της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων επιτυγχάνεται με δύο τρόπους:

- Με τη ρύθμιση της ολίσθησης.
- Με τη ρύθμιση της σύγχρονης ταχύτητας.

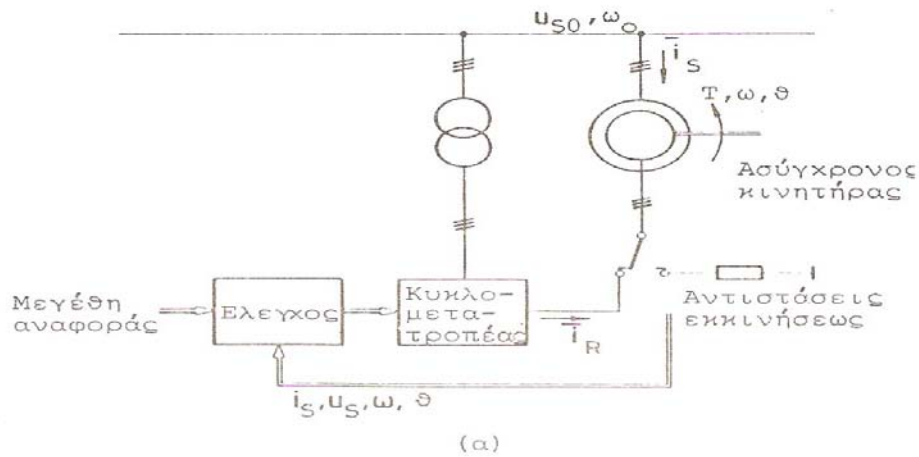
Η ρύθμιση της ολίσθησης, για δεδομένη ροπή φορτίου, επιτυγχάνεται με τη μεταβολή της αντίστασης του δρομέα στον κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα και με τον έλεγχο της τάσης εξόδου στον κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού.

Η ρύθμιση της σύγχρονης ταχύτητας από τη σχέση  $n_s = 120 f_e / P$ , επιτυγχάνεται είτε με τη μεταβολή του αριθμού των πόλων του τυλίγματος του στάτη, ή με τη μεταβολή της συχνότητας εξόδου.

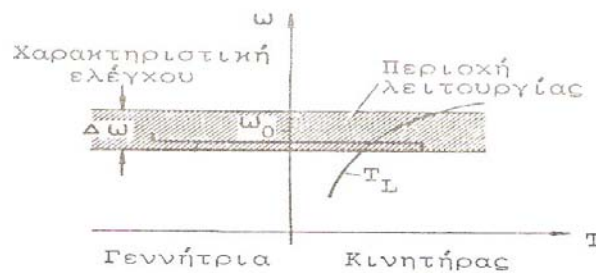
### 2.6.1 Έλεγχος ταχύτητας σε διάταξη διπλής εξόδου

Η παρακάτω μέθοδος εφαρμόζεται στις περιπτώσεις όπου δημιουργείται μεγάλη μεταβολή της ροπής φορτίου για μικρές ταχύτητας. Τα τυλίγματα του στάτη συνδέονται σε δίκτυο σταθερής τάσης και συχνότητας ενώ τα τυλίγματα του δρομέα τροφοδοτούνται μέσω μετατροπέα με τάση ρυθμιζιμου εύρους, φάσης και συχνότητας, δηλ. γίνεται διπλή τροφοδότηση. Όταν η μηχανή λειτουργεί με σταθερή συχνότητα δεν παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Στην παρούσα εφαρμογή θα ασχοληθούμε με την περίπτωση κατά την οποία η εναλλασσόμενη διέγερση του δρομέα μεταβάλλεται σε συχνότητα, εύρος και φάση και μπορεί να ρυθμιστεί η ταχύτητα, ροπή και η άεργος ισχύς ενώ οι μεταβατικές ταλαντώσεις της ταχύτητας έχουν καλή απόσβεση.

Η συνδεσμολογία του κινητήρα επαγωγής διπλής τροφοδότησης και η περιοχή λειτουργίας ρύθμισης της ταχύτητας  $\Delta W$  φαίνονται στο σχήμα 2.29. Με  $W_{so}$ , σταθερή συχνότητα πηγής  $V_{so}$  σταθερή τάση γραμμής της τριφασικής συμμετρικής πηγής με την οποία συνδέονται τα τυλίγματα του στάτη.



(α)



(β)

**Σχ. 2.29** (α) Συνδεσμολογία επαγωγικής μηχανής διπλής εξόδου, (β) περιοχή λειτουργίας ρύθμισης ταχύτητας

Ο δρομέας τροφοδοτείται με 3φ ρεύματα μεταβλητού εύρους, συχνότητας και φάσης. Η πηγή τάσης του μπορεί να είναι ένας κυκλομετατροπέας ή ένας αντιστροφέας παλμών μεταβλητού εύρους. Η τεχνική ελέγχου που θα παρουσιασθεί είναι η field oriented control ή με προσανατολισμό ως προς το πεδίο του συστήματος κίνησης ασύγχρονου κινητήρα σε διάταξη διπλής τροφοδότησης.

Επιλέγεται ένα σύστημα αναφοράς για τα ρεύματα και τις τάσεις, το οποίο έχει τον ορθό άξονα ευθυγραμμισμένο με το ρεύμα μαγνήτισης και μετατρέπουμε τις τάσεις και τα ρεύματα του κινητήρα στο νέο σύστημα συντεταγμένων.

Για την περίπτωση του κινητήρα διπλής τροφοδότησης η ροπή κίνησης είναι ανάλογη της κάθετης συνιστώσας του ρεύματος δρομέα, ενώ η ορθή συνιστώσα του ρεύματος δρομέα είναι ανάλογη του ρεύματος μαγνήτισης και χρησιμεύει για την ρύθμιση του. Στην περίπτωση βραχυκυκλωμένου δρομέα η κάθετη συνιστώσα του ρεύματος στάτη είναι ανάλογη με τη ροπή κίνησης, ενώ η ορθή συνιστώσα του ρεύματος στάτη είναι ανάλογη του ρεύματος μαγνήτισης και ρυθμίζεται μέσω αυτής. Το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται εδώ, είναι το μοντέλο σε δυναμική κατάσταση όπως περιγράφηκε πριν με μικρές αλλαγές. Η κύρια διαφοροποίηση είναι ότι υπάρχει πηγή τάσης στο δρομέα. Η εξίσωση τάσεων δρομέα είναι:

$$R_R \tilde{i}_R + L_R \frac{d\tilde{i}_R}{dt} + M \frac{d}{dt} (\tilde{i}_s e^{-j\theta}) = \bar{V}_R(t) \quad (2.92)$$

$$(\text{Όπου: } \bar{V}_R(t) = V_{R1} + V_{R2} e^{j\gamma} + V_{R3} e^{j2\gamma})$$

$$R_s s + M(1 + \sigma_s) \frac{d\bar{i}_s}{dt} + M \frac{d}{dt} (\bar{i}_R e^{j\theta}) = \bar{V}_s(t) \quad (2.93)$$

$$R_R \bar{i}_R + L_R \frac{d\bar{i}_R}{dt} + M \frac{d}{dt} (\bar{i}_s e^{-j\theta}) = \bar{V}_R(t) \quad (2.94)$$

$$j \frac{d\omega}{dt} = T(t) - T_L(t) = \frac{2}{3} \frac{m}{M} [\bar{i}_s (\bar{i}_R)^*] - T_L(\theta, \omega, t) \quad (2.95)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (2.96)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις γίνονται οι κατάλληλες μετατροπές ώστε να υπάρχει συσχέτιση μεταξύ του ρεύματος δρομέα, της τάσης του στάτη και ρεύματος μαγνήτισης, αφού ο έλεγχος θα γίνει μέσω του ρεύματος δρομέα. Το σύστημα αναφοράς το οποίο έχει άξονα τον άξονα του μαγνητικού πεδίου ονομάζεται “σύστημα προσανατολισμένο ως προς το πεδίο” ή “field oriented system of coordinates” και οι συντεταγμένες, συντεταγμένες πεδίου. Παρακάτω παρουσιάζονται τα τρία συστήματα αναφοράς της ασύγχρονης μηχανής και η συσχέτιση τους. Οι σχέσεις μεταξύ των γωνιών τους είναι:

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (2.97)$$

$$\frac{d\xi}{dt} = \omega_2 \quad (2.98)$$

$$\frac{d\mu}{dt} = \omega_{ms} \quad (2.99)$$

Μετά από μετατροπές καταλήγουμε για το ρεύμα δρομέα στο σύστημα αναφοράς του πεδίου σε συντεταγμένες πεδίου και είναι:

$$i_R e^{j\delta} = i_R e^{j(\theta + \xi - \mu)} = i_{Rc} \cos\delta + j i_{Rs} \sin\delta = i_{Rd} + j i_{Rq} \quad (2.100)$$

Τα  $I_{Rd}$   $I_{Rq}$  ονομάζονται d-q συνιστώσες του ανύσματος ρεύματος του δρομέα στο σύστημα αναφοράς πεδίου ή η ορθή και η κάθετη συνιστώσα του ρεύματος του δρομέα σε συντεταγμένες του πεδίου. Η ροπή κίνησης του κινητήρα είναι:

$$T(t) = K i_{ms} i_{Rq} \quad (2.101)$$

$$\text{Όπου } K = \frac{-2}{3} \frac{M}{1 + \sigma_s} \quad (2.102)$$

Αρα μέσω της κάθετης συνιστώσας του ρεύματος  $I_{Rq}$  μπορούμε να ρυθμίσουμε τη ροπή της ασύγχρονης μηχανής.

Από το σχήμα 2.30 παρατηρούμε ότι το ρεύμα μαγνήτισης  $I_{ms}$  ρυθμίζεται μέσω της ορθής συνιστώσας του ρεύματος δρομέα  $I_{Rd}$ . Οι εξισώσεις που περιγράφουν το μέτρο και τη γωνία του ρεύματος μαγνήτισης συναρτήσκει των ορθών και κάθετων συνιστωσών τάσης στάτη και του ρεύματος δρομέα είναι:

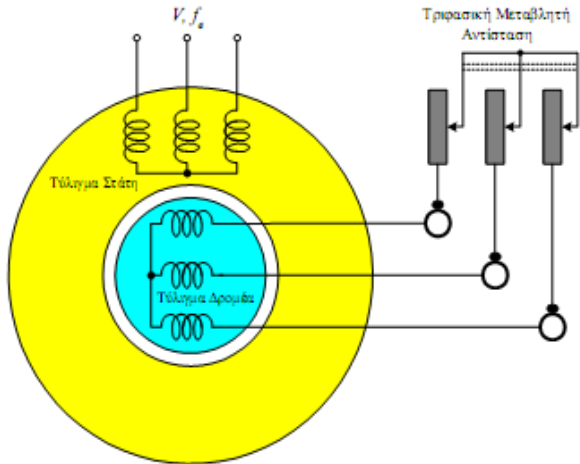
$$T_s \frac{di_{ms}}{dt} + i_{ms} = \frac{1 + \sigma_s}{R_s} u_{sd} + i_{Rd} \quad (2.103)$$

$$\frac{d\mu}{dt} = \omega_{ms} = \frac{1}{T_s i_{ms}} \left[ \frac{1 + \sigma_s}{R_s} u_{sd} + i_{Rq} \right] \quad (2.104)$$

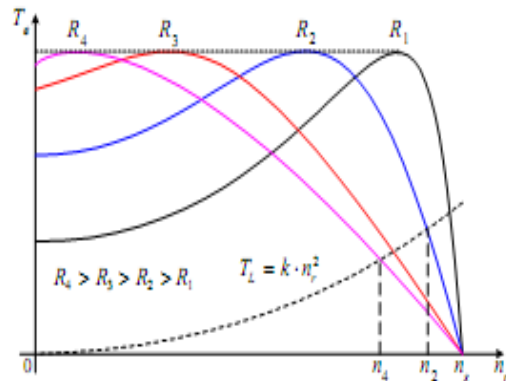
Οι κάθετες συνιστώσες d-q του ρεύματος δρομέα υπολογίζονται από τα φυσικά ρεύματα  $I_{r1}, I_{r2}, I_{r3}$  όπως φαίνεται παρακάτω αφού πρώτα το χωρικό άνυσμα ρεύματος μετατρέπεται σε ένα διφασικό σύστημα ρευμάτων  $i_{Ra}, i_{Rb}$  και στη συνέχεια γίνεται αναφορά τους στο



μεταβάλλεται ανάλογα με το τετράγωνο της ταχύτητας. Αυτή η χαρακτηριστική φορτίου είναι πολύ κοινή και απαντάται στις αντλίες, τους ανεμιστήρες και τα ανυψωτικά (pump, fan, crane). Η μεταβολή της ταχύτητας με τη ρύθμιση της αντίστασης είναι φανερή. Η ταχύτητα του κινητήρα μειώνεται από την τιμή  $n_2$  όταν  $R_r = R_2$  στην τιμή  $n_4$  όταν  $R_r = R_4$ . Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι, ο βαθμός απόδοσης της διάταξης μειώνεται με τη μείωση της ταχύτητας, εξαιτίας των εξωτερικών αντιστάσεων.



Σχ. 2.31 Μηχανή με ρυθμιστικές αντιστάσεις στον δακτυλιοφόρο δρομέα



Σχ. 2.32 Έλεγχος της ταχύτητας μέσω μεταβολής των αντιστάσεων δρομέα.

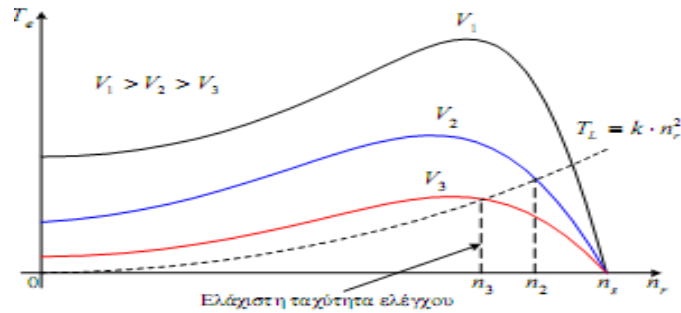
### 2.6.3 Έλεγχος ταχύτητας με ρύθμιση τάσης του στάτη

Στους επαγωγικούς κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού, η ρύθμιση της ολίσθησης (ταχύτητας) επιτυγχάνεται με τη μεταβολή της τάσης εξόδου των τυλιγμάτων του στάτη. Η συχνότητα των τάσεων είναι σταθερή και ίση με τη συχνότητα του δικτύου. Καθώς η ροπή που αναπτύσσει ο επαγωγικός κινητήρας είναι ανάλογη με το τετράγωνο της τάσης του στάτη, οι χαρακτηριστικές ροπές –ταχύτητας μεταβάλλονται όπως στο Σχ. 2.33, για διάφορες τιμές της τάσης. Η ροπή του φορτίου είναι ανάλογη με το τετράγωνο της ταχύτητας. Από το Σχ. 2.33 είναι φανερό ότι, η ταχύτητα του κινητήρα δεν μπορεί να ελεγχθεί σε τιμές πολύ μικρότερες από τη σύγχρονη. Η ελάχιστη δυνατή ταχύτητα είναι η  $n_3$ , που αντιστοιχεί στη ροπή ανατροπής για την τάση  $V_3$ . Ακόμη, το ρεύμα του κινητήρα είναι ανάλογο της τάσης. Έτσι, ο λόγος ροπής προς ρεύμα, η μέγιστη ροπή, ο συντελεστής ισχύος και ο βαθμός απόδοσης, μειώνονται με τη μείωση της ταχύτητας. Επομένως, ο έλεγχος της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων με τη ρύθμιση της τάσης του στάτη δεν είναι αποτελεσματικός.

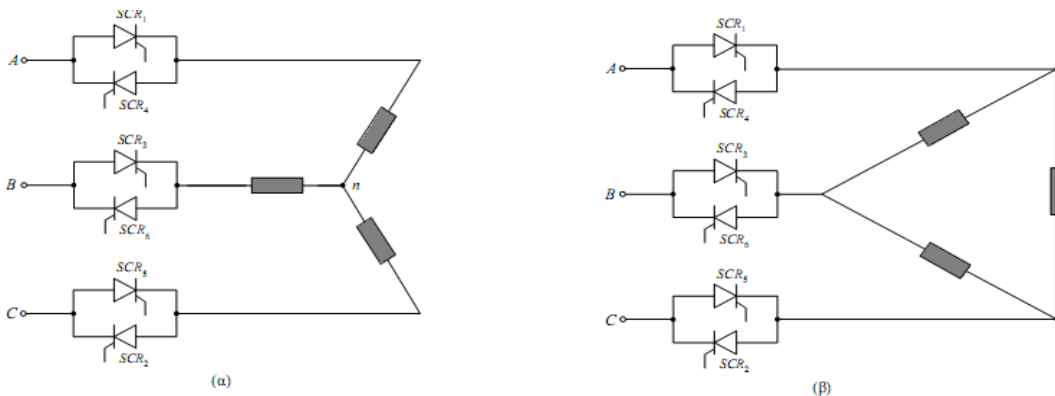
Ο έλεγχος της τάσης στα τυλίγματα του στάτη επιτυγχάνεται με κατάλληλους μετατροπείς ισχύος, οι οποίοι ονομάζονται ρυθμιστές εναλλασσόμενης τάσης (ac voltage controllers). Η κυκλωματική δομή του τριφασικού ρυθμιστή εναλλασσόμενης τάσης εικονίζεται στο Σχ. 2.34. Τα τυλίγματα του κινητήρα μπορεί να είναι σε σύνδεση αστέρα (Σχ. 2.34α), ή τριγώνου (Σχ. 2.34β).

Ο ρυθμιστής αποτελείται από έξι ελεγχόμενους ανορθωτές πυριτίου (SCR), οι οποίοι συνδέονται ανά δύο αντιπαράλληλα. Σε μικρές ισχύς χρησιμοποιούνται ως διακόπτες τρία TRIAC, στη θέση των έξι SCR. Το TRIAC συμπεριφέρεται όπως δύο αντιπαράλληλοι ελεγχόμενοι ανορθωτές πυριτίου, όμως έχει πολύ μικρότερη ικανότητα χειρισμού ισχύος

απ' αυτο ύψ. Οι SCR δέχο και παλμο ύψ έναυσης με τη σειρά αρίθμησής το  $\omega$  και με διαφορά φάσης  $60^\circ$ .



**Σχ. 2.33** Έλεγχος ταχύτητας επαγωγικής μηχανής με τη μεταβολή της τάσης στάτη



**Σχ. 2.34** Τριφασικός ρυθμιστής εναλλασσόμενης τάσης με το φορτίο συνδεδεμένο (α) σε αστέρα, (β) σε τρίγωνο

Οι ρυθμιστές εναλλασσόμενης τάσης χρησιμοποιούνται συνήθως στον έλεγχο της ταχύτητας επαγωγικών κινητήρων κλάσης D, σε εφαρμογές αντλιών και ανεμιστήρων, όπου δεν απαιτείται έλεγχος της ταχύτητας σε μικρές τιμές. Όμως, η κυριότερη εφαρμογή τους είναι στην εκκίνηση των επαγωγικών κινητήρων όλων των κατηγοριών, οπότε ονομάζονται soft starters. Οι ηλεκτρονικοί εκκινητές έχουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους εκκίνησης, με αυτομετασχηματιστή ή διακόπτη αστέρα-τρίγωνου. Κάποια από τα πλεονεκτήματα είναι:

- η ομαλή επιτάχυνση και επιβράδυνση,
- ο έλεγχος του ρεύματος,
- η μειωμένη συντήρηση,
- η προστασία από έλλειψη ή ασυμμετρία των φάσεων.

Επιπλέον, ένας εκκινητής με ρυθμιστή εναλλασσόμενης τάσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ελαχιστοποίηση των απωλειών του επαγωγικού κινητήρα, λειτουργώντας τον κινητήρα με μειωμένη τάση σε μικρά φορτία. (Ο επαγωγικός κινητήρας λειτουργεί με το μέγιστο βαθμό απόδοσης στο ονομαστικό φορτίο, όπου η κατανομή των επιμέρους απωλειών του είναι η βέλτιστη. Όταν το φορτίο μειώνεται, η βέλτιστη κατανομή των απωλειών διαταράσσεται και ο βαθμός απόδοσης μειώνεται. Μεταβάλλοντας την τάση εξόδου του κινητήρα ανάλογα με το φορτίο του, ώστε η μαγνητική ροή στο διάκενο να έχει πάντα τη βέλτιστη τιμή, επιτυγχάνουμε το μέγιστο βαθμό απόδοσης. Η βέλτιστη τιμή της μαγνητικής ροής εξαρτάται από το φορτίο και την ταχύτητα του κινητήρα).



## 2.6.4 Έλεγχος ταχύτητας με μεταβολή αριθμού των πόλων

Ο αριθμός των μαγνητικών πόλων που αναπτύσσονται από το τριφασικό τυλίγμα του στάτη μπορεί να μεταβληθεί, με τη μέθοδο των διαδοχικών πόλων (consequent poles), ή τοποθετώντας πολλαπλά τυλίγματα στο στάτη (multiple stator windings).

Στη μέθοδο των διαδοχικών πόλων, με κάποιες απλές αλλαγές στη σύνδεση των ομάδων του τυλίγματος του στάτη, ο αριθμός των πόλων του μεταβάλλεται με ένα λόγο 2 προς 1. Έτσι, ο επαγωγικός κινητήρας μπορεί να έχει δύο ή τέσσερις πόλους και σύγχρονη ταχύτητα 3000rpm ή 1500rpm αντίστοιχα.

Όταν ο λόγος 2 προς 1 στην ταχύτητα δεν είναι βολικός, τοποθετούνται στο στάτη περισσότερα από ένα ανεξάρτητα τριφασικά τυλίγματα, με τον επιθυμητό αριθμό πόλων. Ανάλογα με τη ζητούμενη ταχύτητα, τροφοδοτείται κάθε φορά το κατάλληλο τυλίγμα. Το μειονέκτημα των πολλαπλών τυλιγμάτων είναι ότι αυξάνουν το κόστος του κινητήρα. Ακόμη, η μέθοδος των πολλαπλών τυλιγμάτων μπορεί να συνδυασθεί με τη μέθοδο των διαδοχικών πόλων, για τη λειτουργία του κινητήρα σε περισσότερες ταχύτητες.

Πρέπει να σημειωθεί ότι, η μέθοδος ελέγχου της ταχύτητας με τη μεταβολή του αριθμών

των πόλων, μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε επαγωγικούς κινητήρες με βραχυκυκλωμένο κλωβό. Ο δρομέας των κινητήρων αυτών αναπτύσσει πάντα τόσους πόλους, όσοι είναι και οι πόλοι του στάτη. Αυτό δεν ισχύει στους κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα, όπου το τυλίγμα του δρομέα αναπτύσσει ένα καθορισμένο αριθμό πόλων, ανάλογο με την κατασκευή του.

## 2.6.5 Έλεγχος της ταχύτητας με τη μεταβολή της συχνότητας

### 2.6.5.1 Αντιστροφείς γενικά (INVERTERS)

Ο αντιστροφέας, μαζί με τον κινητήρα, αποτελούν τις δύο βασικές συνιστώσες ενός σύγχρονου συστήματος κίνησης με κινητήρα επαγωγής. Η χρήση του αντιστροφέα προσθέτει επιπλέον κόστος στο σύστημα κίνησης, το οποίο είναι συγκρίσιμο με το κόστος του κινητήρα. Ωστόσο, είναι τέτοιες οι δυνατότητες που ο αντιστροφέας μπορεί να δώσει στον έλεγχο του κινητήριου συστήματος που η χρήση του αποτελεί πια μονόδρομο σε συστήματα οδήγησης μεταβλητής ταχύτητας.

Οι αντιστροφείς διακρίνονται σε δύο βασικές τοπολογίες. Στους αντιστροφείς πηγής τάσεως και τους αντιστροφείς πηγής ρεύματος. Οι αντιστροφείς πηγής τάσεως, όπως υποδηλώνει και το όνομά τους λαμβάνουν d.c. τάση την οποία μετατρέπουν σε εναλλασσόμενη μεταβλητής συχνότητας. Ιδανικά, οι αντιστροφείς πηγής τάσεως απαιτούν στην είσοδό τους μια σθεναρή πηγή τάσεως. Ισοδύναμα απαιτούν μια πηγή τάσεως με μηδενική αντίσταση στο ισοδύναμό της κύκλωμα Thevenin ικανή να παρέχει όποιο ρεύμα ζητηθεί διατηρώντας σταθερό επίπεδο τάσεως. Σε αυτή την περίπτωση η τάση (τάσεις) εξόδου του αντιστροφέα δεν εξαρτώνται από τις διακυμάνσεις του φορτίου αλλά καθορίζονται αποκλειστικά από τις εντολές ελέγχου. Η d.c. τάση εξόδου του αντιστροφέα μπορεί να είναι σταθερή ή μεταβλητή και συνήθως λαμβάνεται με με χρήση διάταξης ανορθωτή και κατάλληλου φίλτρου. Σε εξειδικευμένες εφαρμογές (π.χ. ηλεκτρικό όχημα) η πηγή είναι μπαταρία, κυψέλη καυσίμου, φωτοβολταϊκό πάνελ και άλλα. Σε αυτές τις περιπτώσεις δίνεται ιδιαίτερη σημασία στα χαρακτηριστικά της πηγής καθώς εκεί εντοπίζεται ίσως η κυριότερη πηγή προβλημάτων σε τέτοια συστήματα, αλλά και το σημαντικότερο πεδίο πιθανών και ουσιαστικών βελτιώσεων. Στους μετατροπείς πηγής

τάσεως, τα διακοπτικά στοιχεία παραμένουν πάντα ορθά πολωμένα (forward-biased) λόγω της d.c. τάσεως εξόδου γι' αυτό και μπορεί να είναι GTOs (Gate Turn Off thyristors), BJTs (Bipolar Junction Transistors), IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistors), power MOSFETs (power Metal-oxide semiconductor field effect transistors) και IGSTs (Integrated Gate Commutated Thyristors). Τα διακοπτικά στοιχεία συνοδεύονται πάντα από μια δίοδο ελεύθερης διέλευσης που συνδέεται αντιπαράλληλα με αυτά και που επιτρέπει την αντίστροφη ροή ρεύματος (τη ροή ρεύματος και ισχύος προς το σύστημα εξόδου).

Οι αντιστροφείς πηγής ρεύματος αποτελούν σε μεγάλο βαθμό τη δυική τοπολογία των αντιστροφέων πηγής τάσεως. Απαιτούν τη δυική τροφοδότηση των τελευταίων και συγκεκριμένα μια στιβαρή πηγή ρεύματος, με άπειρη εσωτερική αντίσταση (ισοδύναμη αντίσταση στο κύκλωμα Thevenin). Η πηγή ρεύματος μπορεί να προκύψει από πηγή τάσεως με τη σύνδεση μεγάλων αυτεπαγωγών σε σειρά και τον έλεγχο της τάσεως με ανατροφοδότηση του ρεύματος εξόδου της διάταξης σε κατάλληλο βρόχο ελέγχου. Σε αυτή την περίπτωση, όπως και στους αντιστροφείς πηγής τάσεως η τάση εξόδου τους, έτσι εδώ το ρεύμα εξόδου των αντιστροφέων πηγής ρεύματος δεν εξαρτάται από το φορτίο αλλά αποκλειστικά από τις εντολές ελέγχου. Στους μετατροπείς πηγής ρεύματος τα ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία πρέπει να αντέχουν σε ανάστροφη πόλωση γι' αυτό χρησιμοποιούνται μόνο GTOs και thyristors. Βέβαια μπορούν και χρησιμοποιηθούν και στοιχεία που απαιτούν ορθή πόλωση εφ' όσον συνδεθεί σε σειρά με αυτά δίοδος ελεύθερης διέλευσης. Οι αντιστροφείς πηγής ρεύματος χρησιμοποιούνται λιγότερο συχνά σε συστήματα οδήγησης μεταβλητής ταχύτητας μηχανών επαγωγής από τους αντιστροφείς πηγής τάσεως κυρίως λόγω της χαμηλότερης ποιότητας των ρευμάτων εξόδου. Ωστόσο, έχουν και σημαντικά πλεονεκτήματα όπως αντοχή σε υπερρεύματα ακόμα και με βραχυκύκλωμα στον αντιστροφέα και στο φορτίο. Επίσης η απουσία διόδων ελευθέρως διελεύσεως αυξάνει περισσότερο την αξιοπιστία. Χαρακτηριστική είναι και η ανωτερότητά τους στον έλεγχο της φασικής γωνίας των ρευμάτων εξόδου. Ωστόσο, η ρύθμιση του πλάτους των ρευμάτων εξόδου μπορεί να γίνει μόνο μέσω ανορθωτή.

### 2.6.5.2 Εφαρμογή στις επαγωγικές μηχανές

Η βέλτιστη μέθοδος για τον έλεγχο της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων κάθε είδους, είναι με τη ρύθμιση της συχνότητας εξόδου του στάτη. Έτσι, μεταβάλλεται η σύγχρονη ταχύτητα, δηλαδή η ταχύτητα περιστροφής των μαγνητικών πεδίων και μαζί τους η ταχύτητα του κινητήρα. Η σύγχρονη ταχύτητα που αντιστοιχεί στην ονομαστική συχνότητα  $f_b$  ονομάζεται βασική συχνότητα.

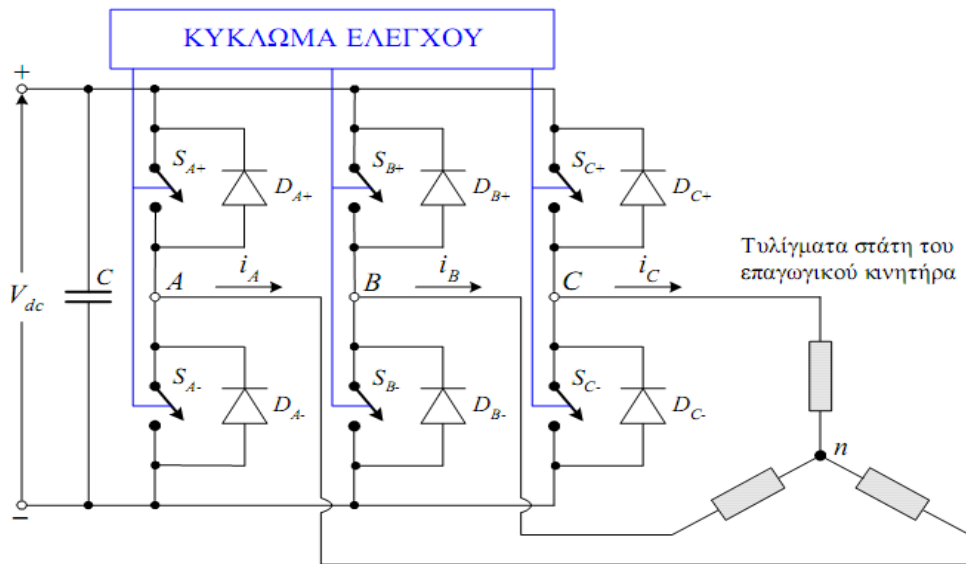
Καθώς η συχνότητα των τάσεων εξόδου μπορεί να ρυθμιστεί σε τιμές μικρότερες αλλά και μεγαλύτερες της ονομαστικής, η ταχύτητα του κινητήρα μπορεί να μεταβληθεί από το μηδέν, μέχρι μια τιμή πολλαπλάσια της βασικής. Το άνω όριο της ταχύτητας περιορίζεται από τη μηχανική αντοχή του κινητήρα. Εκτός από την ευρεία περιοχή ρύθμισης της ταχύτητας, η μέθοδος εξασφαλίζει τη λειτουργία του κινητήρα με μικρή ολίσθηση σε κάθε ταχύτητα. Έτσι, ο βαθμός απόδοσης διατηρείται υψηλός.

Όταν η ταχύτητα του κινητήρα ρυθμίζεται σε τιμές μικρότερες της βασικής, η μείωση της συχνότητας συνοδεύεται από αντίστοιχη μείωση της τάσης. Ειδικότερα, ο λόγος της τάσης προς τη συχνότητα  $V/f$  διατηρείται σταθερός. Με τον τρόπο αυτό η μαγνητική ροή στο διάκενο του κινητήρα παραμένει περίπου σταθερή ( $\Phi_m = E/f_e$ ). Στο Σχ. 2.35α εικονίζονται οι χαρακτηριστικές ροπής –ταχύτητας του κινητήρα, σε διάφορες συχνότητες μικρότερες από τη βασική, όταν μαγνητική ροή διατηρείται σταθερή. Παρατηρούμε ότι η ροπή

ανατροπής (μέγιστη ροπή), δεν μεταβάλλεται με τη μεταβολή της συχνότητας. Έτσι, ο κινητήρας μπορεί να ελέγξει φορτία, τα οποία απαιτούν μεγάλη ροπή σε μικρές ταχύτητες. Επιπλέον, η δυναμική συμπεριφορά του κινητήρα είναι εξαιρετική.

Στην ονομαστική ταχύτητα, ο κινητήρας τροφοδοτείται με την ονομαστική τάση και τη βασική συχνότητα. Για την αύξηση της ταχύτητας, σε τιμές πέρα από την ονομαστική, η συχνότητα γίνεται μεγαλύτερη από τη βασική. Όμως, η τάση εξόδου διατηρείται σταθερή στην ονομαστική τιμή, για την προστασία της μόνωσης των τυλιγμάτων. Επειδή η τάση δεν ακολουθεί την αύξηση της συχνότητας, η μαγνητική ροή μειώνεται καθώς η συχνότητα αυξάνει. Το αποτέλεσμα είναι η μείωση της μέγιστης ροπής ανατροπής με το τετράγωνο της συχνότητας, όπως εικονίζεται στο Σχ. 2.35β. Αν και η μέθοδος ελέγχου της ταχύτητας με τη ρύθμιση της συχνότητας προσφέρει πολύ καλύτερα χαρακτηριστικά λειτουργίας απ' όλες τις άλλες μεθόδους, η χρήση της έχει γενικευτεί μόλις τα τελευταία χρόνια. Στο Σχ. 2.36 εικονίζεται η δομή του τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης.

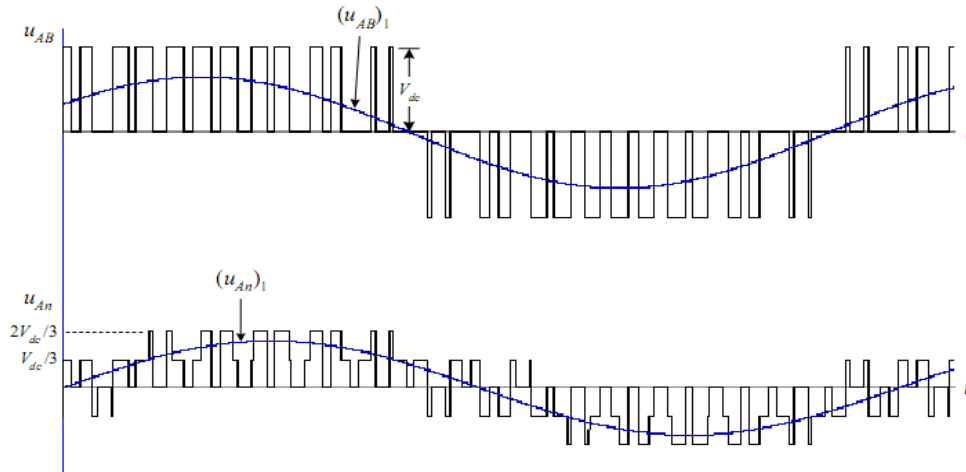
Ο αντιστροφέας ονομάζεται πηγής τάσης, επειδή τροφοδοτείται από μια πηγή συνεχούς τάσης. Η συνεχής τάση εισόδου του αντιστροφέα  $V_{dc}$ , προέρχεται από την ανόρθωση της τάσης του δικτύου, την οποία εξομαλύνει ο πυκνωτής  $C$ . Οι αντιστροφείς που τροφοδοτούνται από πηγές συνεχούς ρεύματος ονομάζονται αντιστροφείς πηγής ρεύματος και χρησιμοποιούνται στον έλεγχο κινητήρων μεγάλης ισχύος. Οι έξι διακόπτες του αντιστροφέα πηγής τάσης, είναι συνήθως MOSFET ισχύος (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) ή IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Αντιπαράλληλα με κάθε διακόπτη συνδέεται μια διόδος, η οποία εξασφαλίζει την αμφίδρομη ροή της ισχύος μεταξύ της dc εισόδου και της ac εξόδου. Οι διακόπτες οδηγούνται από το κύκλωμα ελέγχου, με κάποια από τις πολλές τεχνικές διαμόρφωσης εύρους παλμού PWM (Pulse Width Modulation).



Σχ. 2.36 Δομή του 3-φασικού αντιστροφέα πηγής τάσης

Το χαρακτηριστικό όλων των τεχνικών PWM είναι η ρύθμιση εκτός από τη συχνότητα και της τάσης εξόδου του κινητήρα. Όμως, οι διακόπτες του αντιστροφέα λειτουργούν με μια συχνότητα, η οποία είναι πολύ μεγαλύτερη από τη θεμελιώδη  $f_e$ . Η συχνότητα  $f_s$

ονομάζεται συχνότητα μετάβασης (switching frequency). Στο Σχ. 2.37 παρουσιάζεται ενδεικτικά η κυματομορφή της πολικής και της φασικής τάσης στον κινητήρα, όταν τροφοδοτείται από ένα PWM αντιστροφέα. Ο κινητήρας εξαιτίας της επαγωγικής συμπεριφοράς του, φιλτράρει τις συνιστώσες υψηλής συχνότητας των ρευμάτων και ανταποκρίνεται μόνο στη θεμελιώδη συνιστώσα τους. Τα μικρά αρμονικά ρεύματα αυξάνουν τις απώλειες χαλκού και σιδήρου του κινητήρα.



Σχ. 2.37 Κυματομορφή της πολικής και φασικής τάσης.

### 3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

#### 3.1.1 Ο άνεμος

Είναι γνωστό από τη φυσική ότι όταν μία αέρια μάζα θερμανθεί, εκτονώνεται, γίνεται ελαφρύτερη και κινείται προς τα πάνω. Ο αέρας της ατμόσφαιρας θερμαίνεται κυρίως από την επαφή του με τη θερμή επιφάνεια της γης. Ο θερμός αέρας είναι ελαφρύτερος και έχει μικρότερη πυκνότητα από τον ψυχρό. Ένα στρώμα αέρα, που θα έρθει σε επαφή με την γήινη επιφάνεια θα θερμανθεί και θα ανέλθει. Τη θέση του θα καλύψει ένα στρώμα ψυχρότερου αέρα, που με τη σειρά του θα θερμανθεί και θα ανέλθει. Αυτή η κυκλική ανοδική η καθοδική κίνηση των θερμών και ψυχρών ρευστών μαζών, ονομάζεται κατακόρυφη μεταφορά. Αυτή η διαδικασία συν την περιστροφή της γης δημιουργεί τον άνεμο που όλοι γνωρίζουμε.

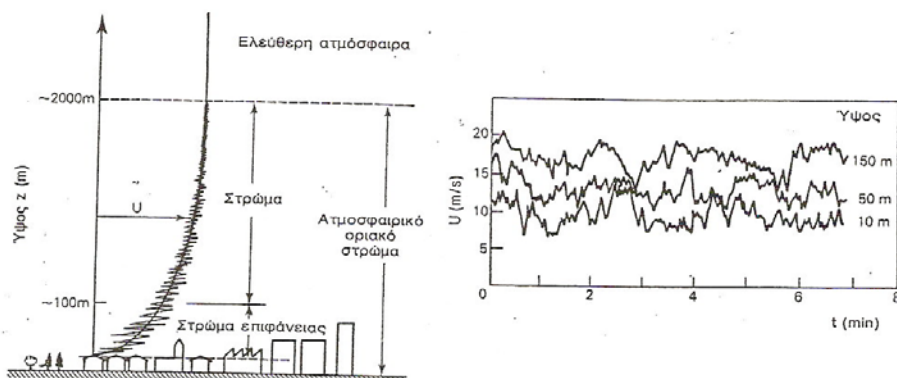
Είναι κατανοητό, ότι ο ατμοσφαιρικός αέρας οποίος περιβάλλει τη γη βρίσκεται σε διαρκή κίνηση, εξ αιτίας μιας σειράς παραμέτρων, των οποίων οι πιο σημαντικές είναι :

- Η ηλιακή ακτινοβολία και ο τρόπος που επιδρά στη γη
- Η ανομοιογένεια του ανάγλυφου της γης (στεριά, θάλασσα, υψομετρικές διαφορές)
- Η περιστροφική κίνηση της γης

Στην Ευρώπη οι άνεμοι επηρεάζονται από τα ανατολικά ρεύματα του Ατλαντικού, τα ψυχρά βόρεια και τα θερμά τοπικά της Σαχάρας. Έτσι οι άνεμοι που πνέουν είναι μεν για το χειμώνα νοτιοδυτικοί, ενώ για το καλοκαίρι οι δυτικοί και βορειοδυτικοί άνεμοι.

#### 3.1.2 Το ατμοσφαιρικό στρώμα

Καθώς η ατμόσφαιρα βρίσκεται σε σχετική κίνηση με τη γη, στο κατώτατο τμήμα της λόγω του ιξώδους του αέρα δημιουργείται ένα στρώμα αέρα, το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, μέσα στο οποίο η σχετική ταχύτητα μεταβάλλεται από μηδέν πάνω στην επιφάνεια της γης, μέχρι μεγαλύτερες τιμές, σχήμα 3.1.



Σχ. 3.1 Ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα και μεταβολή ταχύτητας ανέμου σε σχέση με το ύψος

Τα χαρακτηριστικά του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, καθορίζονται κυρίως από τη μορφή της επιφάνειας της γης (τραχύτητα επιφάνειας), αλλά και από τον άνεμο και την κατάσταση της ατμόσφαιρας. Για ομαλό έδαφος και αδύναμο άνεμο το πάχος του οριακού στρώματος μπορεί να είναι της τάξης των 200 μέτρων, ενώ για ανώμαλη επιφάνεια και έντονο άνεμο είναι δυνατό να φθάσει μέχρι τα 2000 μέτρα. Αυτό πρέπει να το έχουμε υπόψη μας όταν δίνεται η μέση ταχύτητα του ανέμου σε μια περιοχή ή αν έχουμε διαθέσιμες μετρήσεις του ανέμου. Αυτά τα δεδομένα, πρέπει να συνοδεύονται από το ύψος στο οποίο αναφέρονται, ώστε να μπορούμε να τα αναγάγουμε στο ύψος που μας ενδιαφέρει.

### 3.1.3 Μεταβολή ταχύτητας ανέμου με το ύψος

Οι εκφράσεις που χρησιμοποιούμε σήμερα για να υπολογίσουμε την διανομή της ταχύτητας μέσα στο επιφανειακό στρώμα είναι :

$$\text{Λογαριθμικός νόμος : } U(z) = \frac{U^*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (3.1)$$

$$\text{Εκθετικός νόμος : } U(z) = U(z_0)\left(\frac{z}{z_0}\right)^\alpha \quad (3.2)$$

Όπου  $U(z)$  η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος  $Z$ ,  $U^*$  η ταχύτητα τύρβης,  $\alpha$  ο εκθέτης του εκθετικού νόμου,  $k$  η σταθερά Von Karman ( $k=0,35$ ) και  $Z_0$  η παράμετρος τραχύτητας ή μήκος τραχύτητας.

Συνήθως στα μετεωρολογικά προβλήματα χρησιμοποιείται ο εκθετικός νόμος λόγω της απλότητάς του. Ο εκθέτης αποτελεί μια ένδειξη της μορφής της επιφάνειας του εδάφους. Υπάρχουν πίνακες που δίνουν τιμές για τον εκθέτη και βασίζονται σε πειραματικές προσεγγίσεις.

Ενδεικτικές τιμές για τον εκθέτη είναι  $\alpha=0,17$  για ανοιχτά πεδία, όπως είναι η θάλασσα ή ο χώρος ενός αεροδρομίου,  $\alpha=0,20$  για μικρές πόλεις με χαμηλές κατασκευές και  $\alpha=0,25$  για πόλεις με μεγάλες και πολυώροφες κατασκευές.

### 3.1.4 Μεταβολή ταχύτητας ανέμου σε σύνθετη τοπογραφία

Σε μια σύνθετη τοπογραφία, η ταχύτητα του ανέμου μπορεί να μεταβάλλεται σημαντικά μεταξύ κοντινών περιοχών. Αυτή η διαφοροποίηση έχει δύο όψεις. Από τη μία προσφέρει τη δυνατότητα να μεγιστοποιήσουμε την απόδοση μίας μηχανής ή ενός αιολικού πάρκου, από την άλλη κινδυνεύουμε να οδηγηθεί σε αποτυχία η όλη η επένδυση αν δεν γίνει προσεκτική επιλογή της θέσης.

Ο θεωρητικός υπολογισμός των επιδράσεων της ανώμαλης τοπογραφίας στην ταχύτητα του ανέμου μπορεί να γίνει πολύ δύσκολα και μόνο με τη χρήση υπολογιστών. Έχουν δημιουργηθεί διάφορα μοντέλα πρόβλεψης που επιχειρούν να λύσουν το πρόβλημα αυτό. Τα αποτελέσματα είναι αποδεκτά για περιπτώσεις τοπογραφίας με μικρές κλίσεις ενώ για απότομες κλίσεις δεν υπάρχει αξιόπιστο μοντέλο.

Παρά τη δυσκολία που υπάρχει στον υπολογισμό του ανέμου σε ανώμαλη τοπογραφία, σε απλούστερες περιπτώσεις υπάρχουν εμπειρικοί κανόνες που μπορούν να εφαρμοστούν και να δώσουν ποιοτικές και ποσοτικές εκτιμήσεις.

Αν εξετάσουμε έναν λόφο, σχήμα 3.2, ο άνεμος που τον συναντάει, επιταχύνεται στην κορυφή και επιβραδύνεται στους πρόποδες. Έστω  $H$  το ύψος του λόφου και  $2L$  το πλάτος του λόφου σε ύψος  $H/2$ . Υπάρχει ένα ύψος  $l$  πάνω από την κορυφή,

όπου η σχετική η επιτάχυνση,  $\Delta S$  γίνεται μέγιστη :

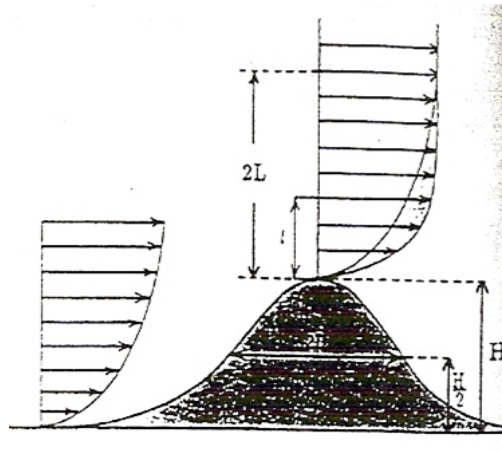
$$l = 0.3 Z_0 \left(\frac{L}{Z_0}\right)^{0.67}, \Delta S_l = 2\frac{l}{L} \quad (3.3)$$

όπου  $l$  το ύψος πάνω από την κορυφή του λόφου, ενώ  $Z_0$  είναι το ύψος τραχύτητας που εξαρτάται από τη μορφή της επιφανείας του εδάφους.

Το προφίλ της ταχύτητας αποτελείται από τρία μέρη: ανάμεσα στο επίπεδο της γης και το ύψος  $l$  το προφίλ είναι λογαριθμικό, ανάμεσα στο ύψος  $l$  και  $2L$  ένα διαφοροποιημένο λογαριθμικό προφίλ, ενώ από το ύψος  $2L$  και πάνω το προφίλ του ανέμου παραμένει αμετάβλητο,  $\Delta S=0$

$$\Delta S = \begin{cases} \frac{2h}{L}, & h \leq l \\ \frac{2h \ln(H/2L)}{L \ln(H/2L)}, & l < h \leq 2L \\ 0, & 2L < h \end{cases} \quad (3.4)$$

Οι παραπάνω σχέσεις μπορούν να δώσουν ικανοποιητικά αποτελέσματα όταν η κάθετη στην κατεύθυνση του ανέμου διάσταση του λόφου είναι πολύ μεγαλύτερη από  $2L$  και το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί ως δυσδιάστατο. Στην πραγματικότητα, η επιτάχυνση της ροής είναι μικρότερη, καθώς η ροή του ανέμου τείνει να κινηθεί γύρω από το λόφο.



Σχ. 3.2 Προσπίπτων άνεμος σε λόφο ύψους  $H$

### 3.1.5 Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το χρόνο

Η ταχύτητα του ανέμου σε μία ορισμένη θέση στο χώρο δεν παραμένει σταθερή στο χρόνο, αλλά μεταβάλλεται κατά μέγεθος και διεύθυνση. Σημαντικά μεγέθη, αναφορικά με τα ανεμολογικά δεδομένα είναι η μέση ταχύτητα ανέμου, η τυπική απόκλιση και ο βαθμός της τύρβης.

Η μέση ταχύτητα του ανέμου υπολογίζεται δεδομένης μίας σειράς μετρήσεων από την σχέση :

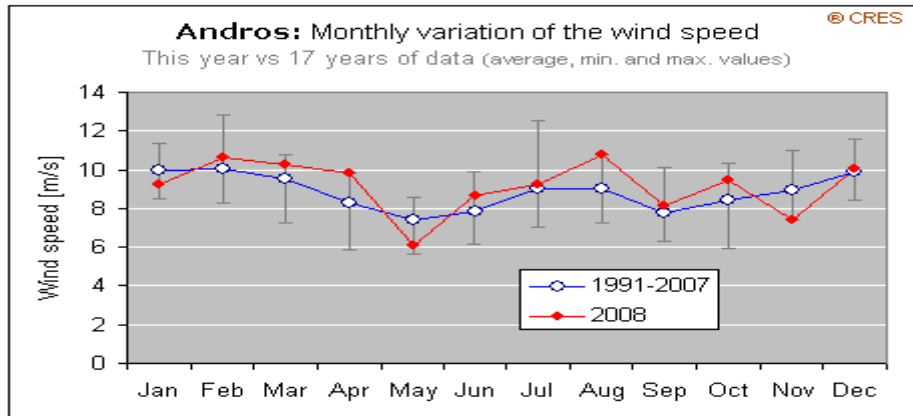
$$\bar{V} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V_n \quad (3.5)$$

Η τυπική απόκλιση δείχνει πόσο οι μετρήσεις αποκλίνουν από τη μέση τιμή του ανέμου :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (V_n - \bar{V})^2} \quad (3.6)$$

όπου  $\bar{V}$  η μέση ταχύτητα του ανέμου,  $V_n$  η ταχύτητα του ανέμου στο n σημείο των μετρήσεων και  $n=1,2,3,\dots,N$  ο αριθμός των μετρήσεων.

Στο σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η διακύμανση της μέσης μηνιαίας ταχύτητας ανέμου κατά την διάρκεια του 2008 από μετρήσεις που έγιναν στην Άνδρο και αντιπαραβάλλονται με μετρήσεις προηγούμενων 17 ετών.



Σχ. 3.3 Ταχύτητα ανέμου για το νησί της Άνδρου από ΚΑΠΕ

Με τον όρο τύρβη ονομάζουμε τη διαταραχή της ταχύτητας του ανέμου και έχει ιδιαίτερη σημασία για την απόδοση των αιολικών μηχανών, αλλά και τον υπολογισμό της αντοχής λόγω των εναλλασσόμενων φορτίων που αναπτύσσονται και που οδηγούν στην κόπωση των υλικών της μηχανής.

Ο βαθμός της τύρβης  $S$  ορίζεται ως η τυπική απόκλιση της πρώτης μέτρησης από τη μέση τιμή των δέκα λεπτών :

$$S = \frac{\sigma}{\bar{V}} \quad (3.6)$$

Η διάρκεια πνοής του ανέμου σε μια περιοχή είναι απαραίτητο στοιχείο για τον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας μιας μηχανής. Η καμπύλη διάρκειας πνοής του ανέμου που εκφράζει το ποσοστό του χρόνου για τις οποίες πνέει άνεμος ταχύτητας μεγαλύτερης μίας συγκεκριμένης τιμής. Η καμπύλη πυκνότητας πιθανότητας ταχύτητας  $P(V)$  αποτελεί μία άλλη καμπύλη ισοδύναμη με την καμπύλη διάρκειας πνοής του ανέμου και εκφράζει την πυκνότητα πιθανότητας ο άνεμος να έχει ταχύτητα μεταξύ δύο τιμών. Οι δύο καμπύλες παρουσιάζουν την ίδια πληροφορία με διαφορετικό τρόπο. Η καμπύλη πυκνότητας πιθανότητας μπορεί να προκύψει με παραγωγή της καμπύλης διάρκειας πνοής του ανέμου. Το εμβαδόν της επιφάνειας που ορίζεται κάτω από τις καμπύλες διάρκειας πνοής ανέμου και πυκνότητας πιθανότητας είναι ίσο με τη μονάδα ή 8760 ώρες, δηλαδή το 100% του έτους.

### 3.1.6 Μετρήσεις Αιολικού δυναμικού

Οι μετρήσεις του Αιολικού δυναμικού πραγματοποιούνται με τα ανεμόμετρα, τα οποία καταγράφουν την ταχύτητα του ανέμου και την κατεύθυνση του, μετατρέποντας την



κινητική ενέργεια του αέρα, σε μηχανική ροπή που στρέφει έναν άξονα συνδεδεμένο με την μετρητική συσκευή.

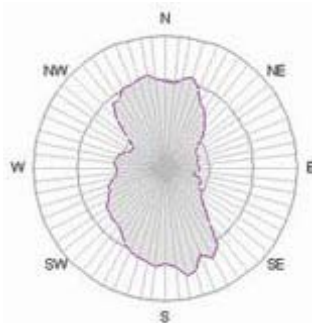
Υπάρχουν άλλες διατάξεις όπως τα ανεμόμετρα Sonic, Laser Doppler και άλλα που μετράνε την θερμική ενέργεια που μεταφέρεται από τον αέρα, σε ένα ηλεκτρισμένο καλώδιο εκτεθειμένο στον άνεμο. Στην πράξη για εφαρμογές αιολικής ενέργειας, οι μηχανικές διατάξεις είναι οι πιο διαδεδομένες λόγω της απλότητάς της κατασκευής τους καθώς και της μικρής κατανάλωσης ενέργειας, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε απομονωμένους μετρητικούς σταθμούς.

Οι πιο συνηθισμένες μονάδες μέτρησης είναι μέτρα ανά δευτερόλεπτο (m/sec), χιλιόμετρα ανά ώρα (km/h), ναυτικά μίλια ανά ώρα (mph) γνωστά και ως knots. Οι μετρήσεις Αιολικού δυναμικού, συνήθως γίνονται ανά δέκα λεπτά, αλλά και η χρήση ανεμολογικών δεδομένων σε ωριαία ο βάση είναι επίσης αποδεκτή.

### 3.1.7 Ρόδο ανέμου

Μία σημαντική πληροφορία που δεν φαίνεται στις κατανομές ταχύτητας που περιγράψαμε πιο πάνω είναι η συχνότητα εμφάνισης κάθε κατεύθυνσης. Ο πίνακας διπλής εισόδου της συχνότητας πνοής ανέμου ανά διεύθυνση μπορεί να παρασταθεί γραφικά με το ροδόγραμμα ανέμου. Το ροδόγραμμα ανέμου μιας περιοχής είναι αρκετά εποπτικό διάγραμμα που δίνει αμέσως την κατεύθυνση ανέμου που επικρατεί στην περιοχή και τη διάρκειά του πνοής ανέμου από κάθε κατεύθυνση. Στο κέντρο εμφανίζεται το ποσοστό της άπνοιας ετησίως.

Για να φτιάξει κανείς το ρόδο ανέμου μιας περιοχής είναι απαραίτητο να κάνει μετρήσεις. Οι μετρήσεις πρέπει να έχουν μεγάλη χρονική διάρκεια, τουλάχιστον δέκα χρόνια, για να θεωρούνται αξιόπιστες. Οι μετρήσεις πρέπει να είναι αξιόπιστες, διότι μικρή απόκλιση στην εκτίμηση του αιολικού δυναμικού, προκαλεί μεγάλη απόκλιση στην εκτίμηση της παραγόμενης ενέργειας στο σχήμα 3.4. Παρουσιάζεται ένα ροδόγραμμα το οποίο προέρχεται από μετρήσεις στην Άνδρο.



Σχ. 3.4 Ενδεικτικό ροδόγραμμα.

### 3.1.8 Θεωρητικός υπολογισμός συχνοτήτων κατανομής ταχυτήτων ανέμου

Η εμπειρία από μετρήσεις Αιολικού δυναμικού έχει δείξει ότι η πυκνότητα πιθανότητας κατανομής ταχύτητας μπορεί να περιγραφεί αναλυτικά με πολύ καλή προσέγγιση από την κατανομή Weibull. Η κατανομή Weibull είναι μία δια-παραμετρική κατανομή πυκνότητας πιθανότητας με παραμέτρους  $c$  και  $k$  και ορίζεται ως :

$$f(V) = \left(\frac{K}{c}\right) \left(\frac{V}{c}\right)^{K-1} e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^K} \quad (3.7)$$

όπου  $V$  η ταχύτητα του ανέμου.

Η παράμετρος  $k$  καθορίζει το ύψος της κατανομής Weibull, ενώ η παράμετρος  $c$  επηρεάζει την κατανομή κατά τον οριζόντιο άξονα.

Η μέση ταχύτητα του ανέμου μπορεί να υπολογιστεί όταν δίνονται οι παράμετροι  $c$  και  $k$  της κατανομής Weibull από την σχέση :

$$\bar{V} = \int_{V=0}^{\infty} V f(V) dV \quad (3.8)$$

Οπότε μετά από εκτέλεση πράξεων οδηγούμαστε στη σχέση :

$$\bar{V} = C \Gamma \left(1 + \frac{1}{K}\right) \quad (3.9)$$

Όπου  $\Gamma$  η συνάρτηση Γάμμα.

Η διάρκεια πνοής ανέμου δίνεται από τη σχέση :

$$P(V > V_x) = \int_0^{V_x} f(V) dV = 1 - e^{-\left(\frac{V_x}{c}\right)^K} \quad (3.10)$$

Κι εκφράζει την πιθανότητα να φυσάει άνεμος ταχύτητας μικρότερης της  $V_x$  ή αλλιώς το ποσοστό του χρόνου που φυσάει άνεμος ταχύτητας μικρότερης της  $V_x$ .

Οι παράμετροι κλίμακας ταχύτητας  $c$  και μορφής της κατανομής Weibull είναι δυνατόν να υπολογιστούν αν υπάρχουν μετεωρολογικές μετρήσεις στην περιοχή, προσαρμόζοντάς με ελάχιστα τετράγωνα την αναλυτική σχέση στα πειραματικά δεδομένα.

### 3.1.9 Ενέργεια και η ισχύς του ανέμου

Είναι γνωστό ότι η ισχύς ορίζεται ως ο ρυθμός χρήσης η μετατροπής της ενέργειας και άρα εκφράζεται ως ενέργεια ανά μονάδα χρόνου ( $W = \text{joule/sec}$ ). Η ενέργεια της οποίας φορέας είναι ο άνεμος είναι κινητική και ορίζεται ως εξής :

$$E_k = \frac{1}{2} m V^2 \quad (3.11)$$

Μπορούμε να συνειδητοποιήσουμε την κινητική ενέργεια του ανέμου, αν αναλογιστούμε μία ροή ανέμου που διέρχεται διά μέσου ενός κυλινδρικού σωλήνα επιφάνειας  $S$  ως πούμε  $100\text{m}^2$ , με ταχύτητα  $V$  έστω  $10\text{m/sec}$ . Καθώς ο αέρας κινείται με ταχύτητα  $10\text{m/sec}$ , ένας κυλινδρικός όγκος αέρα μήκους  $10\text{m}$  διέρχεται κάθε δευτερόλεπτο από ένα δεδομένο δαχτυλίδι του σωλήνα. Εισάγοντας την πυκνότητα του αέρα ( $\rho = 1,23 \text{ kg/m}^3$ ), υπολογίζουμε την μάζα του αέρα που διέρχεται από το δαχτυλίδι αυτό κάθε δευτερόλεπτο :

$$\dot{m} = \rho S V$$

( $\dot{m}$  η μάζα του αέρα που διέρχεται από μια επιφάνεια  $S$  ανά δευτερόλεπτο) (3.12)

Αντικαθιστώντας προκύπτει η κινητική ενέργεια ανά δευτερόλεπτο :

$$\dot{E} = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (3.13)$$

Όμως η ισχύς ορίζεται ως ενέργεια ανά δευτερόλεπτο, άρα :

$$P = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (3.14)$$

Παρατηρούμε από την παραπάνω σχέση ότι η ισχύς του ανέμου είναι ανάλογη της επιφάνειας μέσω της οποίας διέρχεται ο άνεμος και ανάλογη του κύβου της ταχύτητας. Εδώ πρέπει να πούμε ότι η ισχύς που μεταφέρει ο άνεμος σε καμία περίπτωση δεν είναι η ισχύς που δεσμεύει και παράγει η ανεμογεννήτρια. Αυτό συμβαίνει λόγω σημαντικών απωλειών που λαμβάνουν χώρα κατά τη διαδικασία δεσμεύσεις ενέργειας και παραγωγής αυτής.

## 3.2 Αιολική ενέργεια

### 3.2.1 Τύποι ανεμογεννητριών

Η ποικιλία των μηχανών που επινοήθηκαν και προτάθηκαν για να δεσμεύσουν την αιολική ενέργεια είναι σημαντική και περιλαμβάνει πρωτότυπες επινοήσεις. Διάφορα είδη μηχανών οριζοντίου και κατακόρυφου άξονα έχουν προταθεί κατά καιρούς. Η σύγχρονη 'ανεμόμυλοι' ονομάζονται ανεμογεννήτριες και διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες τις μηχανές οριζοντίου και κατακόρυφου άξονα. Η πλειοψηφία των σύγχρονων μηχανών μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική. Τα μεγέθη τους ποικίλλουν από μηχανές που παράγουν μερικές δεκάδες η εκατοντάδες watt και φτάνουν τα μερικά MW.

Χαρακτηριστική είναι η διαφορά που υπάρχει στην αρχή λειτουργίας των παραδοσιακών ανεμόμυλων, με τις σύγχρονες ανεμογεννήτριες. Η παραδοσιακοί ανεμόμυλοι κινούνται είτε με τη βοήθεια της αντίστασης των πτερυγίων τους στον άνεμο, είτε με εκμετάλλευση της άνωσης που ασκείται πάνω τους. Στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες η κίνηση οφείλεται στην άνωση, η οποία αξίζει να σημειωθεί ότι μπορεί να γίνει υπερ-δεκαπλάσια της αντίστασης. Στις μέρες μας ο πιο γνωστός τύπος ανέμου κινητήρα που έχει εφαρμοσθεί ευρύτατα στην πράξη είναι δρομέα οριζόντιου άξονα.

Ο βαθμός απόδοσης  $C_p$  χαρακτηρίζει τους ανεμοκινητήρες και ονομάστηκε συντελεστής ισχύος.

Ορίζεται ως :

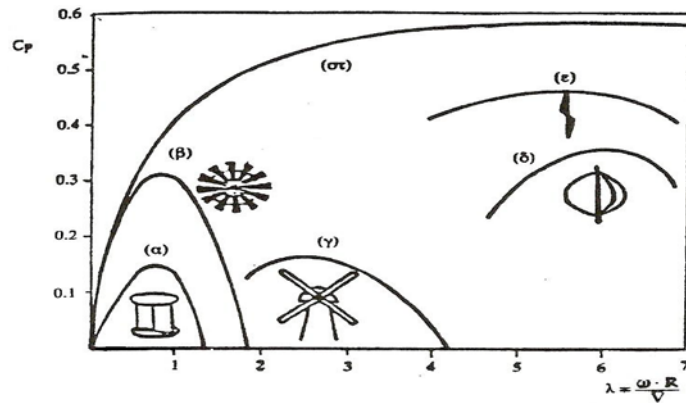
$$C_p = \frac{P}{\frac{\rho A V^3}{2}} \quad (3.15)$$

Όπου  $P$  η ισχύς που αποδίδεται από την ανεμογεννήτρια, και στον παρονομαστή είναι ( $\rho$  η πυκνότητα του ανέμου) η ισχύς που έχει ο άνεμος ταχύτητας  $V$  και περνάει από επιφάνεια  $A$ . Αυτό που είναι σημαντικό και φέρεται στην τελευταία σχέση είναι ότι η ισχύς του ανέμου ανά τετραγωνικό μέτρο μετωπικής επιφάνειας της ανεμογεννήτριας είναι ανάλογη του κύβου της ταχύτητας του ανέμου.

Ο συντελεστής ισχύος  $C_p$  εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μηχανής και είναι συνάρτηση της αδιάστατης ταχύτητας ακροπτερυγίου  $\lambda$  :

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad (3.16)$$

Όπου  $\omega$  η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα και  $R$  η ακτίνα του. Η αδιάστατη ταχύτητα ακροπτερυγίου καλείται και η κατάσταση λειτουργίας του δρομέα. Στο σχήμα 3.5 δίνονται τυπικές καμπύλες του συντελεστή ισχύος για διάφορα είδη μηχανών. Φαίνεται καθαρά ότι οι σύγχρονες μηχανές υπερέχουν των παραδοσιακών, διότι παρουσιάζει μεγαλύτερους συντελεστές ισχύος και μάλιστα σε μεγάλες τιμές καταστάσεως λειτουργίας.



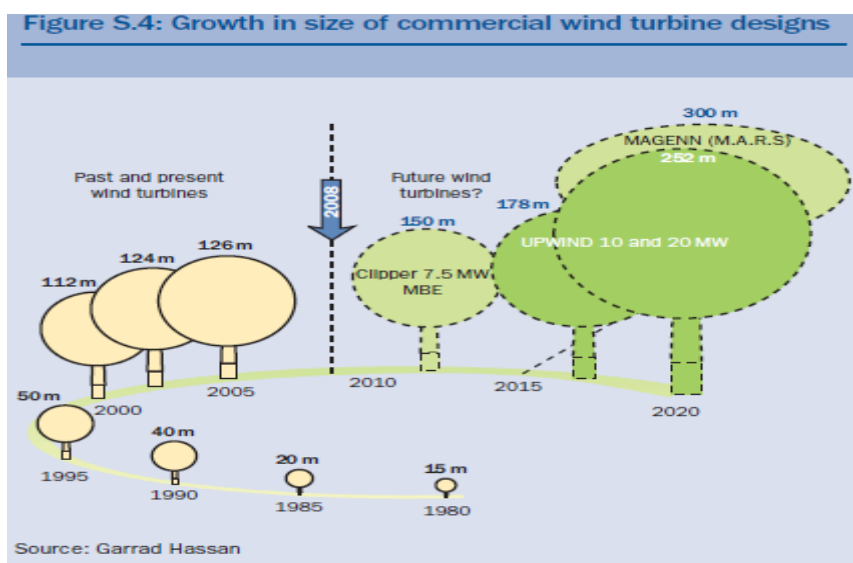
Σχ. 3.5 (α,β,γ,ε: οριζοντίου άξονα. δ: κατακόρυφου και στ: καμπύλη ιδανικού A/K)

### 3.2.1.1 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα αποτελούνται στην συντριπτική τους πλειοψηφία από τρία η δύο πτερύγια που θυμίζουν έντονα έλικα αεροπλάνου. Ανεμογεννήτριες με μεγαλύτερο αριθμό πτερυγίων εμφανίζονται ως πολύ στιβαρές κατασκευές, και βρίσκουν εφαρμογές σε ειδικές συνθήκες για άντληση νερού σε αγροκτήματα.

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες έχουν μοντέρνα αεροδυναμική σχεδίαση, που οφείλεται στην πρόοδο που έχει επιτευχθεί τις τελευταίες δεκαετίες στον σχεδιασμό των αεροπορικών πτερυγίων και ελίκων. Οι μηχανές που έχουν τη μεγαλύτερη εμπορική επιτυχία είναι καλύτερες οι τρίπτερες ή οι δίπτερες μεγέθους περίπου μέχρι 1MW, και κατασκευάζονται στη Δανία, τις ΗΠΑ, την Αγγλία, την Ολλανδία, τη Γερμανία, την Ιταλία, την Ισπανία, το Βέλγιο, την Ιαπωνία, την Αυστρία και την Κίνα. Τυπικό μέγεθος μιας ανεμογεννήτριας σήμερα είναι: ,διάμετρος πτερυγίων 130 m και η ισχύ τους συνήθως 2 MW(ως και 3 MW), η εξέλιξη μέσα στα χρόνια φαίνεται στο σχήμα 3.6.

Μονόπτερες μηχανές παράγονται κυρίως στην Γερμανία και την Ιταλία. Παρά την ασυνήθιστη εμφάνιση τους, οι ένθερμοι υποστηρικτές τους πιστεύουν ότι η εξέλιξή τους μπορεί να δώσει φθηνότερες, ελαφρύτερες και με μικρότερες καταπόνησης μηχανές.



Σχ. 3.6 Εξέλιξη μεγέθους – ισχύος ανεμογεννητριών

## Χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα

Τα κύρια μέρη των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα είναι ο δρομέας, το σύστημα αυξήσεις στροφών, το σύστημα πέδησης, τα έδρανα του άξονα και οι ελαστικοί σύνδεσμοι, η ηλεκτρική γεννήτρια, το σύστημα προσανατολισμού, ο πύργος στήριξης και τα θεμέλια, σχήμα 3.7 αναλυτικά :

- Ο δρομέας είναι ίσως το πιο βασικό ζήτημα στη σχεδίαση του όλου συστήματος. Αποτελείται από την πλήμνη και τα πτερύγια. Το πτερύγιο έχει αεροδυναμικό σχήμα και μπορεί να είναι ενιαίο η να διαθέτει ακροπτερύγιο. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων (αριθμός πτερυγίων, κατανομή πλάτους, επιλογή αεροτομής, συστροφή) προκύπτουν από την βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής σχεδίασης.
- Η ηλεκτρική γεννήτρια μπορεί να είναι ασύγχρονη η σύγχρονη γεννήτρια. Γενικά προτιμούνται οι ασύγχρονες γεννήτριες λόγω της απλότητάς της κατασκευής τους, αν και οι σύγχρονες έχουν καλύτερη συμπεριφορά σε αδύνατα δίκτυα.
- Ανεμομετρητής (Anemometer): Μετρά την ταχύτητα του ανέμου και μεταφέρει δεδομένα για την ταχύτητα του ανέμου στον ελεγκτή.
- Φρένο (Brake): Ένας δίσκος φρένου, ο οποίος μπορεί να εφαρμοστεί κατά τρόπο μηχανικό, ηλεκτρικό ή υδραυλικό, ώστε να σταματά ο ρότορας (ηλεκτρικός κινητήρας) σε περιπτώσεις επείγουσας ανάγκης.
- Κιβώτιο Ταχυτήτων (Gear box): Τα γρανάζια συνδέουν τον άξονα χαμηλής ταχύτητας με τον άξονα υψηλής ταχύτητας και αυξάνουν τις ταχύτητες περιστροφής από περίπου 30 έως 60 περιστροφές το λεπτό (rpm = περιστροφή ανά λεπτό) σε 1000 έως 1800 περιστροφές το λεπτό, που είναι η ταχύτητα περιστροφής που οι περισσότερες ανεμογεννήτριες απαιτούν ώστε να παραγάγουν ηλεκτρισμό. Το κιβώτιο ταχυτήτων είναι ακριβό (και βαρύ) εξάρτημα της ανεμογεννήτριας και οι μηχανικοί ερευνούν προς την κατεύθυνση ανεμογεννητριών «άμεσης ώθησης» (“direct-drive”) οι οποίες λειτουργούν σε χαμηλότερες ταχύτητες περιστροφής και δεν χρειάζονται κιβώτιο ταχυτήτων.
- Άξονας υψηλής ταχύτητας (High-speed shaft): Θέτει τη γεννήτρια σε κίνηση.
- Άξονας χαμηλής ταχύτητας (Low-speed shaft): Ο ρότορας (rotor, ηλεκτρικός κινητήρας) στρέφει τον άξονα χαμηλής ταχύτητας σε περίπου 30 έως 60 περιστροφές το λεπτό.
- Ατρακτίδιο (Nacelle) : Το ατρακτίδιο βρίσκεται στην κορυφή του πύργου και περιέχει το κιβώτιο ταχυτήτων, τους άξονες χαμηλής και υψηλής ταχύτητας, τη γεννήτρια, τον ελεγκτή και το φρένο. Μερικά ατρακτίδια είναι τόσο μεγάλα, ώστε ακόμη και ένα ελικόπτερο μπορεί να προσγειωθεί πάνω τους.
- Στροφή Πτερυγίων (Pitch): Οι λεπίδες στρέφονται, ή στρίβουν γύρω από τον άξονά τους, ανεξάρτητα από τον άνεμο, ώστε να ελέγχουν την ταχύτητα του ρότορα (ηλεκτρικού κινητήρα) και να εμποδίζουν τον ρότορα από το να στρίβει σε ανέμους οι οποίοι είναι υπερβολικά ισχυροί ή υπερβολικά ασθενείς για να παραγάγουν ηλεκτρισμό.
- Ανεμοδείκτης (Wind vane): Μετρά την κατεύθυνση του ανέμου και επικοινωνεί με το yaw drive για να προσανατολίσει την ανεμογεννήτρια σωστά, όσον αφορά στον άνεμο.
- Οδηγός για την Αποφυγή Εκτροπής (Yaw drive): Οι ανεμογεννήτριες που λειτουργούν με πνοή ανέμου προς τα πάνω, "upwind", είναι στραμμένες προς τον άνεμο. Το yaw drive χρησιμοποιείται για να εξασφαλίσει ότι ο ρότορας θα είναι στραμμένος προς τον άνεμο καθώς ο άνεμος αλλάζει κατεύθυνση. Οι

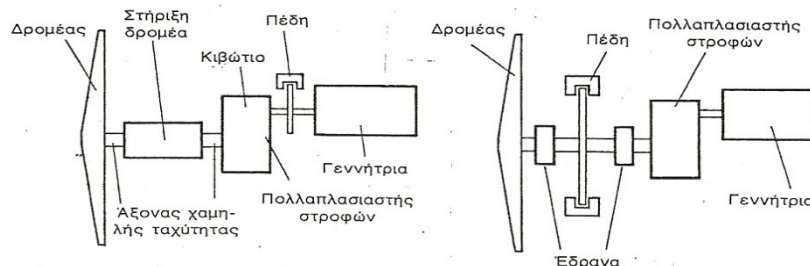
ανεμογεννήτριες που είναι σχεδιασμένες να λειτουργούν με πνοή ανέμου προς τα κάτω, "downwind", δεν χρειάζονται yaw drive, διότι ο άνεμος φυσά και στρέφει τον ρότορα προς τα κάτω.

- Κινητήρας του Οδηγού για την Αποφυγή Εκτροπής (Yaw motor): Δίνει ενέργεια στο yaw drive.
- Το σύστημα προσανατολισμού είναι ένας σερβοκινητήρας ο οποίος ελέγχεται από τον ανεμοδείκτη του ανεμογράφου και αναγκάζει τον δρομέα να παρακολουθεί την κατεύθυνση του ανέμου και να παραμένει κάθετος σε αυτήν.
- Ο πύργος στις ανεμογεννήτριες στηρίζει τη νασέλλα και το δρομέα. Μπορεί να είναι τύπου δικτυώματος, σωληνωτός και σπανιότερα από σκυρόδεμα. Η θεμελίωση γίνεται με οπλισμένο σκυρόδεμα πάνω στο οποίο τοποθετείται με βίδες ο πύργος. Ο πύργος έχει σχήμα κώνου που εξυπηρετεί την αύξηση της αντοχής και στην εξοικονόμηση υλικών με τη διάμετρο να αυξάνεται όσο πλησιάζουμε τη βάση. Μεγάλης σημασίας είναι η γείωση που πρέπει να έχει τη μεταλλική κατασκευή της ανεμογεννήτριας.



Σχ. 3.7 Βασικά μέρη ανεμογεννήτριας.

Στο σχήμα 3.8 παρουσιάζονται δύο τυπικές διατάξεις της ατράκτου οι οποίες διαφέρουν κυρίως στον τρόπο έδρασης του δρομέα και τη θέση του φρένου. Εκτός από αυτές υπάρχουν και αρκετές άλλες παραλλαγές, κυρίως χωρίς πολλαπλασιαστή στροφών.



Σχ. 3.8 Δυο τυπικές διατάξεις ατράκτου

### 3.2.1.2 Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα δεν έχουν γνωρίσει την εμπορική ανάπτυξη που έχουν οι οριζόντιου άξονα. Παρ' όλα αυτά, έχουν κάποια βασικά πλεονεκτήματα :

- Η κατακόρυφη συμμετρία συνεπάγεται αυτό να του προσανατολισμού του δρομέα προς τον άνεμο
- Το μηχανικό έργο μεταφέρεται μέσω του κατακόρυφου άξονα στο έδαφος όπου είναι τοποθετημένο το σύστημα μετατροπής σε άλλη μορφή ενέργειας
- Απλή κατασκευή του πλαισίου στήριξης και γενικότερα η απλούστερη κατασκευή

Οι μηχανές κατακόρυφου άξονα στηρίζονται στις ιδέες του Georges Darrieus και της επινοήσεις του γύρο στα 1925.

### 3.2.2 Αεροδυναμική ανεμογεννητριών

#### 3.2.2.1 Δυνάμεις (αεροδυναμική)

Για να κατανοήσουμε τη λειτουργία των σύγχρονων ανεμογεννητριών, θα εξάγουμε τους όρους της άνωσης και της αντίστασης από την αεροδυναμική. Γενικά, σε ένα αντικείμενο που βρίσκεται μέσα σε ένα ρεύμα αέρα ασκείται μία δύναμη  $F$ . Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι αυτή η δύναμη είναι η συνισταμένη της άνωσης  $L$  και της αντίστασης  $D$ . Η άνοση και η αντίσταση είναι κάθετες μεταξύ τους και το μέγεθός τους εξαρτάται από το σχήμα του αντικειμένου, τον προσανατολισμό του μέσα στη ροή του ανέμου και την ταχύτητα της ροής.

Η αντίσταση είναι η δύναμη που ασκείται σε ένα αντικείμενο από την ροή του αέρα και έχει την κατεύθυνση της ροής. Για παράδειγμα, σε ένα πιάτο ασκείται μέγιστη αντίσταση όταν η κατεύθυνση της ροής είναι κάθετη στην επίπεδη πλευρά του πιάτου, ενώ όταν η ροή του ανέμου γίνει παράλληλη με το πιάτο η αντίσταση ελαχιστοποιείται.

Δεν είναι λίγες οι ανθρώπινες επινοήσεις που σχεδιάστηκαν για να αξιοποιήσουν την αντίσταση. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι το αλεξίπτωτο, το οποίο εκμεταλλεύεται την αντίσταση για να επιβραδύνει την πτώση ενός αλεξιπτωτιστή.

Άνοση είναι η δύναμη που ασκείται στο αντικείμενο από τον άνεμο και έχει κατεύθυνση κάθετη στη ροή του ανέμου. Η άνοση είναι μικρή για μηδενική γωνία πρόσπτωσης. Αντιθέτως, γίνεται μέγιστη για μικρές γωνίες πρόσπτωσης, καθώς δημιουργείται μια περιοχή της υποπίεσης στην πίσω πλευρά του σώματος, ως αποτέλεσμα της επιτάχυνσης της ροής. Υπάρχει άμεση συσχέτιση της ταχύτητας και της πίεσης, η οποία περιγράφεται από την εξίσωση Bernoulli :

$$P + \frac{1}{2} \rho U^2 = \text{const} \quad (3.17)$$

Η εξίσωση του Bernoulli δηλώνει ότι το άθροισμα της κινητικής και της δυναμικής ενέργειας μιας ροής παραμένει σταθερό με την προϋπόθεση αυτή να είναι μη συνεκτική, δηλαδή ροή χωρίς απώλειες λόγω τριβής. Η άνοση αξιοποιείται στις σύγχρονες προπέλες των σκαφών, στα ελικόπτερα, στα αεροσκάφη και τις ανεμογεννήτριες.

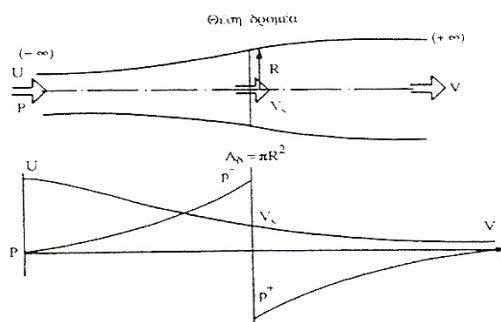
### 3.2.2.2 Η θεωρία του δίσκου ενέργειας

Με τη θεωρία του δίσκου ενέργειας εξηγούμε τον μηχανισμό δέσμευσης της κινητικής ενέργειες του ανέμου από την πτερωτή της ανεμογεννήτριας. Η πτερωτή ή αλλιώς ο δρομέας εξετάζεται σε αυτή την φάση ως 'μαύρο κουτί' που διά μέσου του οποίου περνάει ο αέρας που υφίσταται η μεταβολή της ενέργειας που ουσιαστικά εκφράζεται με την πτώση της στατικής του πίεσης.

Στο σχήμα φαίνεται ο ροϊκός σωλήνας που ορίζεται από την διάμετρο του δρομέα. Ο αέρας πολύ μακριά απέναντι από το δίσκο έχει στατική πίεση  $P$  και πλησιάζει το δίσκου με ταχύτητα  $U$ . Ο δίσκος αφαιρεί ενέργεια από τον αέρα και συνεπώς πολύ μακριά από τον δίσκο περιμένουμε την ταχύτητα του ανέμου  $V$  να είναι μικρότερη από την  $U$ ,  $V < U$ , Ενώ η πίεση του αέρα θα έχει αποκατασταθεί στην πίεση του περιβάλλοντος  $P$ . Επομένως το ρευστό μετά από το δίσκο έχει μικρότερη ενέργεια από αυτήν που είχε πριν.

Για λόγους διατήρησης της μάζας μέσα στον ροϊκό σωλήνα θα πρέπει η διατομή του ροϊκού σωλήνα να μεγαλώνει πίσω από τον δρομέα, δηλαδή να υπάρχει η διαστολή του ομόρου της ανεμογεννήτριας.

Η αξονική ταχύτητα του ρευστού λίγο πριν και λίγο μετά από το δίσκο παραμένει σταθερή για λόγους διατήρησης της μάζας. Η ταχύτητα του ανέμου  $V_s$  λίγο πριν και λίγο μετά από την πτερωτή ότι είναι μικρότερη της  $U$  και μεγαλύτερη της  $V$ . Καθώς η ταχύτητα πριν από την πτερωτή μειώνεται από  $U$  σε  $V_s$ , η πίεση πρέπει να αυξάνεται. Ομοίως καθώς η ταχύτητα μετά την πτερωτή μειώνεται από  $V_s$  σε  $U$ , η πίεση πρέπει να αυξάνεται. Αφού όμως η πίεση πολύ μακριά, απέναντι από την πτερωτή είναι ίση με την πίεση περιβάλλοντος  $P$ , συμπεραίνουμε ότι ο δρομέας αποτελεί μία επιφάνεια ασυνέχειας της πίεσης, αλλά και συνέχειας της αξονικής ταχύτητας. Τυπική μεταβολή των μεγεθών της αξονικής ταχύτητας και πίεσης του ανέμου κατά μήκος του άξονα του ροϊκού σωλήνα παρουσιάζεται στο σχήμα 3.9.



Σχ. 3.9 Μεταβολή ταχύτητας και πίεσης ανέμου κατά μήκος ροϊκού σωλήνα

### 3.2.2.3 Αεροτομές

Οι αεροτομές διακρίνονται σε συμμετρικές και μη συμμετρικές αεροτομές. Σε κάθε αεροτομή μπορούμε να διακρίνουμε την κυρτή άνω επιφάνεια, την στρογγυλεμένη πρόσοψη που ονομάζεται μετώπου προσβολής και την οξεία ακμή με κοινή επαφτομένη των δύο όψεων της αεροτομής που ονομάζεται ακμή φυγής. Οι μη συμμετρικές αεροτομές εμφανίζουν μεγαλύτερη άνωση όταν η κάτω πλευρά της αεροτομής είναι πιο κοντά στην διεύθυνση της ροής του ανέμου. Από την άλλη, οι συμμετρικές αεροτομές μπορούν να παρουσιάζουν εξίσου καλή η άνωση όταν ο άνεμος έρχεται από την



πάνω ή την κάτω πλευρά. Τα αεροσκάφη έχουν πτερύγια με συμμετρικές αεροτομές, που τους επιτρέπουν να κινούνται είτε ανοδικά, είτε καθοδικά. Εξ ορισμού θεωρούμε θετικές της γωνίες προσπτώσης της ροής που προσπίπτει στην κάτω πλευρά της αεροτομής.

Η γωνία που σχηματίζει ένα αντικείμενο με την διεύθυνση του ανέμου, ορίζεται σε σχέση με μια γραμμή αναφοράς μέσα στο αντικείμενο, και ονομάζεται γωνία πρόσπτωσης. Στις αεροτομές η γραμμή αναφοράς είναι η χορδή της αεροτομής. Αλλάζοντας την πρόσπτωσης σε μια αεροτομή, επιτυγχάνουμε μεγιστοποίηση της άνωσης. Αν θεωρήσουμε την τομή ενός πτερυγίου και παρατηρήσουμε την ροή γύρω από αυτό, παρατηρούμε επιτάχυνση της ροής στην επάνω πλευρά του πτερυγίου. Η επιτάχυνση της ροής είναι το αποτέλεσμα της μείωσης της πίεσης στην επάνω πλευρά σε σχέση με την κάτω.

Τα χαρακτηριστικά διαφόρων αεροδυναμικών αντικειμένων της για διαφορές γωνίες έχουν υπολογιστεί μέσω μετρήσεων για τις διαφορές γωνίες πρόσπτωσης σε αεροδυναμικές σήραγγες. Οι δυνάμεις άνωσης και αντίστασης μπορούν να περιγραφούν μέσω των αδιάστατων συντελεστών άνωσης και αντίστασης ( $C_L$ ,  $C_D$ ) ή του λόγου  $C_L/C_D$ .

Ο συντελεστής αντίστασης μιας αεροτομής δίνεται από την παρακάτω :

$$C_D = \frac{D}{0.5 A_b \rho V^2} \quad (3.18)$$

Όπου  $D$  είναι η δύναμη αντίστασης σε Newtons,  $\rho$  είναι η πυκνότητα του ανέμου σε  $\text{Kgr/m}^3$ ,  $V$  είναι η ταχύτητα πρόσπτωσης του ανέμου στην αεροτομή σε  $\text{m/sec}$ , και  $A_b$  είναι η επιφάνεια του πτερυγίου σε  $\text{m}^2$ .

Αντίστοιχα, ο συντελεστής άνωσης  $C_L$  είναι :

$$C_L = \frac{L}{0.5 A_b \rho V^2} \quad (3.19)$$

όπου  $L$  η άνωση σε newtons.

Κάθε αεροτομή παρουσιάζει μέγιστο λόγο  $C_L/C_D$  για συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης. Μια άλλη χαρακτηριστική γωνία για κάθε αεροτομή είναι η γωνία για την οποία εμφανίζεται η αποκόλληση της ροής. Αποκόλληση της ροής συμβαίνει στις αεροτομές για μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης και έχει ως αποτέλεσμα την δραματική μείωση της άνωσης με ταυτόχρονη αύξηση της αντίστασης. Αυτό είναι ένα επικίνδυνο φαινόμενο που μπορεί να συμβεί στα αεροσκάφη.

#### 3.2.2.4 Σχετική ταχύτητα ανέμου

Όταν μια ανεμογεννήτρια είναι ακίνητη, η ταχύτητα του που βλέπει το πτερύγιο είναι σταθερή. Όταν το πτερύγιο περιστρέφεται έχει ίδια ταχύτητα, το διάνυσμα της οποίας μπορεί να παρασταθεί με ένα βέλος, του οποίου του μήκους είναι ανάλογο του μεγέθους της ταχύτητας και θέση δηλώνει την κατεύθυνσή της. Η ταχύτητα του ανέμου που βλέπει ένας παρατηρητής που βρίσκεται πάνω στο στρεφόμενο πτερύγιο, είναι γνωστή ως σχετική ταχύτητα ανέμου ( $W$ ). Η σχετική ταχύτητα είναι η συνιστώσα της αδιατάρακτης ταχύτητας ανέμου  $V_0$  και της εφαπτομενικής ταχύτητας  $U$  στο συγκεκριμένο σημείο του πτερυγίου. Να σημειωθεί η διαφοροποίηση της εφαπτομενικής ταχύτητας που μετρείται σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο με την γωνιακή ταχύτητα που μετρείται σε ακτίνα ανά δευτερόλεπτο.

### 3.2.2.5 Ηλεκτρική προστασία ανεμογεννητριών

Η σύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο τα τελευταία χρόνια ολοένα και μεγαλύτερου αριθμού ηλεκτροπαραγωγών σταθμών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, κυρίως αιολικών πάρκων, έχει μεταβάλει την ακτινική λειτουργία του δικτύου. Η μεταβολή αυτή έχει κάνει πιο πολύπλοκο το θέμα των προστασιών. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να ληφθούν υπ' όψη οι επιπτώσεις αυτές για την επιλογή των κατάλληλων προστασιών. Για τη σωστή επιλογή και ρύθμιση των προστατευτικών διατάξεων, πρέπει να είναι γνωστές δυο τιμές των ρευμάτων βραχυκύκλωσης σε κάθε σημείο του σφάλματος :

- Το μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης, το οποίο είναι αναγκαίο με υπολογιστή προκειμένου:
  - να επιλεγεί η ικανότητα διακοπής των διακοπτικών και ασφαλιστικών στοιχείων,
  - να επιλέγει η μηχανική η αντοχή του εξοπλισμού, ο οποίος καταπονείται λόγω των ηλεκτροδυναμικών φαινομένων που προκαλούνται από τα ισχυρά τα ρεύματα του βραχυκυκλώματος
- Το ελάχιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης, το οποίο είναι απαραίτητο να εκτιμηθεί προκειμένου:
  - να επιλεγούν ασφαλιστικά στοιχεία με την επιθυμητή συμπεριφορά,
  - να προστατευτεί η ζωή, σε σχέση και με τον τύπο του ηλεκτρικού δικτύου

Σε κάθε περίπτωση, τα ασφαλιστικά στοιχεία πρέπει να είναι σε θέση να εκκαθαρίσουν το σφάλμα, είτε το ρεύμα του σφάλματος είναι το μεγάλο ήταν μικρό.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι βραχυκυκλωμάτων τα οποία μπορούν να συμβούν στα ηλεκτρικά δίκτυα. Τα βασικότερα χαρακτηριστικά τους είναι :

- Η διάρκεια
- Η προέλευση :
  - Μηχανική αιτία
  - Από υπερτάσεις χειρισμοί έχουν οι ατμοσφαιρικές υπερτάσεις
  - Υποβάθμιση και αστοχία της μόνωσης λόγω υπερθέρμανσης, υγρασίας ή διαβρωτικού περιβάλλοντος

Τα βραχυκυκλώματα μπορούν να είναι :

- Μονοφασικά, τα οποία αποτελούν περίπου το 80% των σφαλμάτων.
- Διφασικά, τα οποία αποτελούν περίπου το 15% των σφαλμάτων.
- Τριφασικά, τα οποία αποτελούν περίπου το 5% των σφαλμάτων

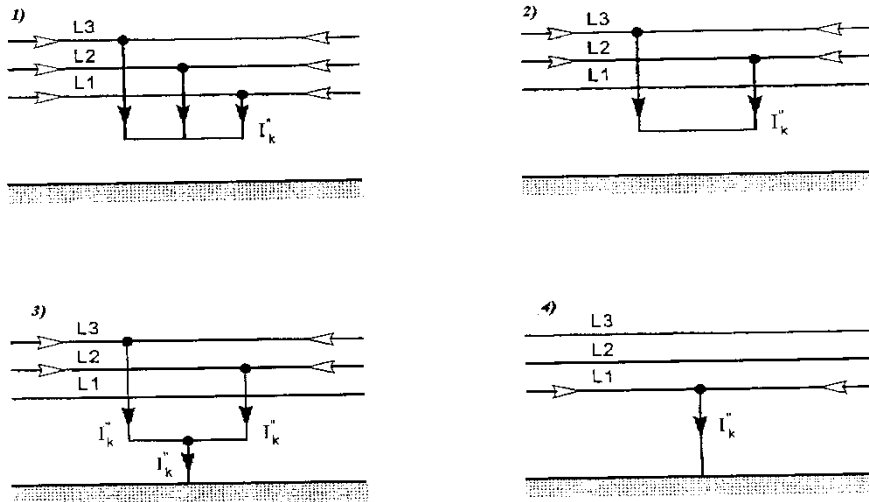
Στο σχήμα 3.10 παρουσιάζονται οι τρεις αυτοί οι τύποι σφαλμάτων.

Οι επιπτώσεις των βραχυκυκλωμάτων διαφέρουν και εξαρτώνται από τον τύπο, τη θέση και τη διάρκειά του βραχυκυκλώματος. Στη γενική περίπτωση μπορεί να συμβούν τα παρακάτω :

- Στη θέση του βραχυκυκλώματος να προκληθεί ηλεκτρικό τόξο το οποίο είναι δυνατόν να προκαλέσει καταστροφή των μονώσεων ή και αγωγών, πυρκαγιά ή και ατυχήματα.
- Στο ηλεκτρικό κύκλωμα στο οποίο εκδηλώθηκε το σφάλμα, τα ισχυρά ρεύματα προκαλούν μηχανικές καταπονήσεις στον εξοπλισμένο με αποτέλεσμα την καταστροφή

των ηλεκτρικών ζυγών, την αποσύνδεση των καλωδίων και την υπερθέρμανση του ηλεκτρικού εξοπλισμού.

- Στα υπόλοιπα κυκλώματα των δικτύων μπορεί να προκληθούν διαταραχές και παράσιτα σε κυκλώματα τηλεπικοινωνιών και ελέγχου, βυθίσεις ή διακοπές της τάσης, να διακοπεί η ηλεκτροδότηση και στη χειρότερη περίπτωση, αστάθεια στο σύνολο του ηλεκτρικού συστήματος.

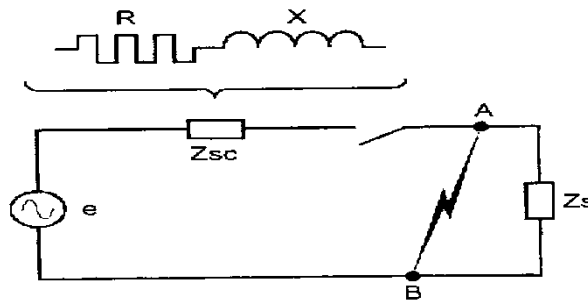


Σχ. 3.10 Τύποι βραχυκυκλωμάτων,

(1) τριφασικό, (2) διφασικό χωρίς γη, (3) διφασικό με γη, (4) μονοφασικό

### 3.2.2.5.1 Βασικοί υπολογισμοί των ρευμάτων βραχυκύκλωσης

Η απλούστερη περίπτωση ηλεκτρικού δικτύου μπορεί να παρασταθεί από μία σταθερή πηγή εναλλασσόμενης τάσης, ένα διακόπτη και μια σύνθετη αντίσταση η οποία παριστάνει όλες τις σύνθετες αντιστάσεις, (σχήμα 3.11). Όταν συμβεί ένα σφάλμα μεταξύ των σημείων A και B, ένα αρκετά μεγάλο ρεύμα κυκλοφορεί στο κύκλωμα. Το ρεύμα αυτό,  $I_{sc}$  περιορίζεται μόνο από την συνθέτη αντίσταση του δικτύου  $Z_{sc}$ . Το ρεύμα αυτού εξαρτάται εκτός των άλλων, από την επαγωγική και ωμική αντίσταση του δικτύου. Στην περίπτωση των ηλεκτρικών δικτύων είναι συνηθισμένη πρακτική να διακρίνονται τα βραχυκυκλώματα σε σχέση με την απόσταση της θέσης του σφάλματος από την γεννήτρια. Αυτή η απόσταση δεν έχει αναγκαστικά την έννοια του φυσικού μεγέθους, απλά σημαίνει ότι η σύνθετη αντίσταση της γεννήτριας είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη από την συνολική συνθέτη αντίσταση του δικτύου μεταξύ της γεννήτριας και του σημείου του σφάλματος.



Σχ. 3.11 Απλουστευμένη αναπαράσταση ηλεκτρικού δικτύου

- Σφάλματα μακριά από την γεννήτρια :

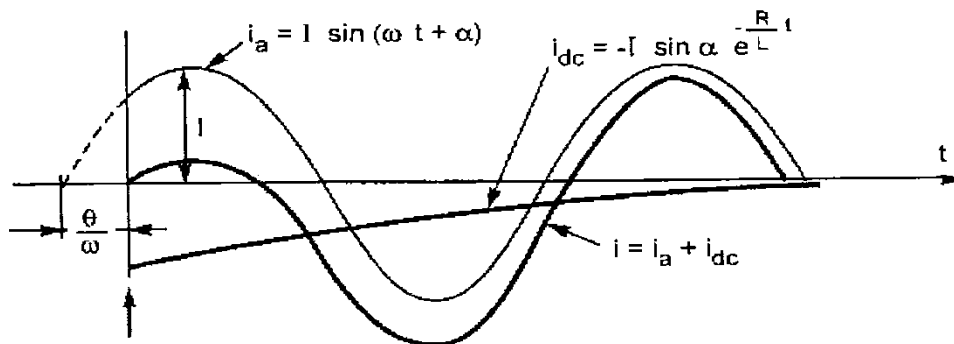
Αυτή είναι η πιο συχνή περίπτωση σφάλματος στα ηλεκτρικά δίκτυα. Το μεταβατικό ρεύμα βραχυκυκλώματος που αναπτύσσεται στην περίπτωση αυτή, για τάση που δίνεται από τη σχέση  $v = V_0 \sin(\omega t + \varphi)$ , είναι το άθροισμα δύο συνιστωσών  $i = i_{ac} + i_{dc}$ . Η πρώτη συνιστώσα είναι ένα εναλλασσόμενο ρεύμα που δίνεται από τη σχέση  $i_{ac} = I \sin(\omega t + \varphi)$ , όπου  $I = V/Z_{sc}$  είναι το μέγιστο ρεύμα και  $\varphi$  είναι η διαφορά φάσεως μεταξύ της χρονικής στιγμής εκδηλώσεως του σφάλματος και του μηδενισμού της τάσης.

Ο δεύτερος όρος είναι μια απεριοδική φθίνουσα συνάρτηση του χρόνου  $i_{dc} = -I \sin \alpha e^{-R/L t}$ . Η αρχική τιμή του εξαρτάται από το χρόνο του σφάλματος. Ο ρυθμός μείωσης του ρεύματος είναι ανάλογος του λόγου  $R/L$ . Στο σχήμα 3.12 βλέπουμε τη γραφική αναπαράσταση του ρεύματος σφάλματος για την περίπτωση σφάλματος μακριά από την πηγή.

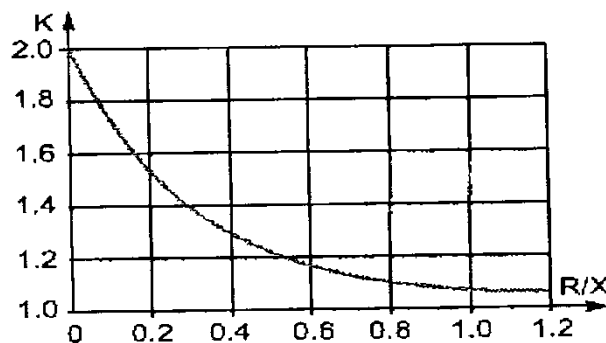
Στην περίπτωση των σφαλμάτων είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε το μέγιστο ρεύμα που αναμένεται να προκύψει. Με το ρεύμα αυτό υπολογίζεται η διακοπτική ικανότητα των στοιχείων ελέγχου του κυκλώματος καθώς και οι μηχανικοί αντοχή του εξοπλισμού λόγω των ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων που αναπτύσσονται. Η τιμή του ρεύμα αυτού μπορεί να προκύψει από την τιμή του ρεύμα συμμετρικού βραχυκυκλώματος  $I_{ac}$  και από την παρακάτω σχέση :

$$i_p = K I_{ac} \sqrt{2}$$

Ο συντελεστής  $K$  λαμβάνεται από την καμπύλη του σχήματος 3.13 σαν συνάρτηση του λόγου  $R/X$ .



Σχ. 3.12 Απεικόνιση ρεύματος σφάλματος όταν αυτό συμβεί μακριά από την πηγή



Σχ. 3. 13 Καμπύλη συντελεστή  $K$  συναρτήσει του λόγου  $R/X$

- Σφάλματα κοντά στην γεννήτρια

Όταν το σφάλμα συμβεί κοντά στην γεννήτρια υπεισέρχεται στο φαινόμενο και τη μεταβολή της σύνθετης αντίστασης της γεννήτριας λόγω του σφάλματος. Το μεταβατικό φαινόμενο είναι πιο σύνθετο και μπορούμε να διακρίνουμε τρία χαρακτηριστικά χρονικά διαστήματα :

- Υπομεταβατικό
- Μεταβατικό
- Μόνιμο

Το συνολικό ρεύμα σφάλματος προκύπτει σαν το άθροισμα των επί μέρους ρευμάτων. Στο προηγούμενο άθροισμα πρέπει να συνυπολογιστεί και η φθίνουσα συνεχής συνιστώσα. Ο υπολογισμός των ρευμάτων βραχυκύκλωσης, για σφάλματα κοντά τις γεννήτριες, είναι πιο πολύπλοκος και απαιτεί τη χρήση υπολογιστή.

- Απλοποιημένη μέθοδος υπολογισμού ρευμάτων βραχυκύκλωσης σε διασυνδεδεμένα αιολικά πάρκα

Για την απλοποίηση των υπολογισμών είναι αναγκαίο να γίνουν κάποιες παραδοχές. Οι παραδοχές αυτές που ορίζουν και το πλαίσιο στο οποίο είναι επιτρεπτή η μεθοδολογία που αναπτύσσεται παρακάτω. Οι υπολογισμοί που γίνονται οδηγούν προσεγγίσεις οι οποίες είναι από την ασφαλή πλευρά. Οι προϋποθέσεις εφαρμογής της απλοποιημένης μεθόδου είναι :

- Το ηλεκτρικό δίκτυο είναι ακτινικό, οποιασδήποτε ονομαστικής τάσης, μέχρι τα 230 KV.
- Το τριφασικό ρεύμα βραχυκύκλωσης, κατά το σφάλμα, θεωρούμε ότι συμβαίνει ταυτόχρονα και στις τρεις φάσεις.
- Κατά τη διάρκεια εξέλιξης του σφάλματος οι τάσεις των πηγών και οι συνθέτες αντίστασης του δικτύου δεν αλλάζουν σημαντικά.
- Κατά τη διάρκεια εξέλιξης του σφάλματος δεν αλλάζει ο αριθμός των φάσεων που συμμετέχουν σ' αυτό
- Τα ρεύματα φορτίου θεωρούνται αμελητέα
- Οι αντιστάσεις και οι αντιδράσεις μηδενικής ακολουθίας λαμβάνονται υπ' όψη.

Με βάση τις παραπάνω παραδοχές ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις για τα ρεύματα βραχυκύκλωσης, οι οποίες φαίνονται στο σχήμα 14

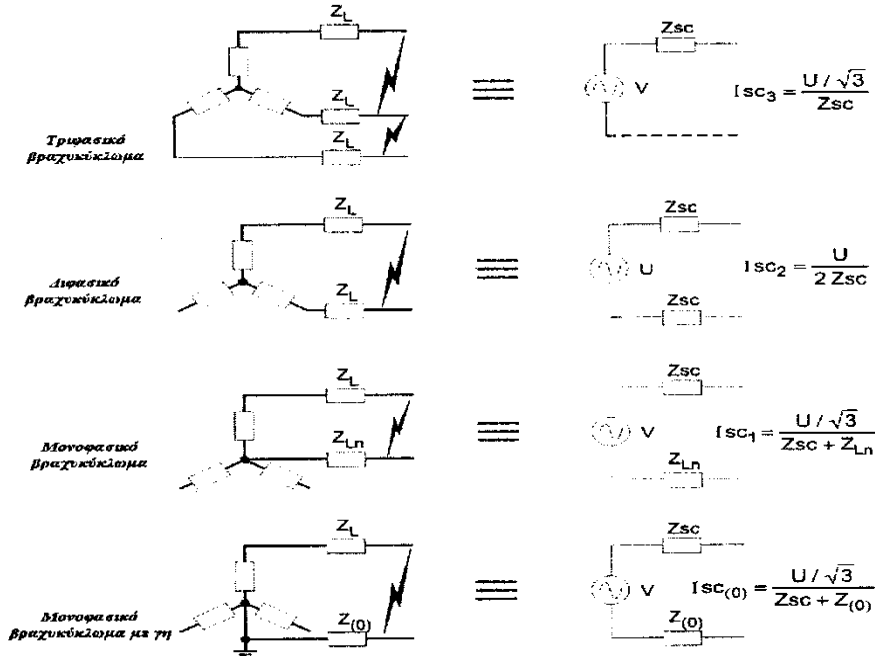
- Τριφασικό βραχυκύκλωμα

Το τριφασικό ρεύμα βραχυκύκλωσης δίνεται από την σχέση :  $I_{sc3} = \frac{U}{\sqrt{3}Z_{sc}}$ ,

όπου U που είναι η ονομαστική πολική τάση του δικτύου και  $Z_{sc}$  η συνολική ισοδύναμη συνθέτη αντίσταση του δικτύου που, όπως αυτή προκύπτει από το σημείο του σφάλματος.

- Διφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς επαφή γης

Στην περίπτωση αυτή του ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι μικρότερο από το τριφασικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως και δίνεται από τη σχέση :  $I_{sc2} = \frac{U}{2Z_{sc}} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{sc3} \approx 0,86 I_{sc3}$



Σχ. 3. 14 Περιπτώσεις σφαλμάτων με τα αντίστοιχα ισοδύναμά τους

- Μονοφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς επαφή γης

Αυτό είναι σφάλμα μεταξύ φάσεις και ουδέτερου. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης δίνεται από τη σχέση :  $I_{sc1} = \frac{U/\sqrt{3}}{Z_{sc} + Z_{Ln}}$ , όπου  $Z_{Ln}$  η σύνθετη αντίσταση του ουδέτερου αγωγού.

- Μονοφασικό βραχυκύκλωμα προς γη

Αυτός ο τύπος βραχυκυκλώματος εμπλέκει τη σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας του κυκλώματος. Στις περισσότερες περιπτώσεις το ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι μικρότερο από το τριφασικό βραχυκύκλωμα.

Για την εφαρμογή της απλοποιημένης μεθόδου οι συνθέτες αντίστασης των στοιχείων του δικτύου λαμβάνονται ως εξής :

- Σύνθετη αντίσταση του δικτύου : Συνήθως είναι γνωστή η ισχύς βραχυκύκλωσης,  $S_{sc}$  του δικτύου που, για την οποία ο παροχέας θέτει το πάνω όριο. Η ισοδύναμη συνθέτη αντίσταση του δικτύου θα είναι  $Z_Q = U^2 / S_{sc}$
- Σύνθετη αντίσταση μετασχηματιστών : Η αντίσταση των μετασχηματιστών υπολογίζεται από τη σχέση  $Z_T = u_k U^2 / S_N$ ,

Όπου  $u_k$  είναι η τάση βραχυκύκλωσης του μετασχηματιστή και  $S_N$  η ονομαστική φαινόμενη ισχύς του. Στη γενική περίπτωση η ωμική αντίσταση είναι αρκετά μικρότερη από την επαγωγική και μπορεί να παραληφθεί χωρίς μεγάλο σφάλμα στους υπολογισμούς. Αν θεωρηθεί ανάγκη ο υπολογισμός της, ιδιαίτερα στα δίκτυα χαμηλής τάσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση :  $R_T = P_{cu} / 3 I_N^2$ ,

Όπου  $P_{cu}$  είναι οι ονομαστικές απώλειες χαλκού του μετασχηματιστή και  $I_N$  το ονομαστικό του ρεύμα.

- Συνθέτες αντιστάσεις διασυνδετικών γραμμών και καλωδίων

Η ωμικές αντιστάσεις των εναέριων γραμμών, των καλωδίων και των ζυγών λαμβάνονται από τους σχετικούς πίνακες για θερμοκρασία 20° c. Για τον υπολογισμό των ελάχιστων ρευμάτων βραχυκυκλώσεις οι αντιστάσεις αυτές προσαυξάνονται κατά 50%.

- Συνθέτη αντίσταση σύγχρονων μηχανών

Η σύνθετη αντίδραση της σύγχρονης μηχανή δίνεται από την σχέση :  $Z_s = \frac{X_s U^2}{100 S_N}$ ,

Ο λόγος στις σύγχρονες μηχανές είναι μικρός. Επομένως μπορούμε, με μικρό σφάλμα, να θεωρήσουμε ότι η σύνθετη αντίσταση της μηχανής ταυτίζεται αριθμητικά με την επαγωγική αντίδραση της.

- Επαγωγικές μηχανές

Αν μια επαγωγική μηχανή αποκοπεί από το δίκτυο μια τάση εμφανίζεται στους ακροδέκτες της. Η τάση αυτή εξαφανίζεται σε διάστημα μερικών εκατοστών του δευτερολέπτου. Στην περίπτωση των ανεμογεννητριών με επαγωγική μηχανή, λόγο του παραμένουτος μαγνητισμού στο δρομέα, εμφανίζεται μια μικρή τάση. Κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες είναι δυνατό να εκδηλωθεί ένα φαινόμενο, η επαγωγική μηχανή να αυτοδιεγερθεί και να εμφανιστούν σημαντικά υψηλές τάσεις.

Όταν συμβεί ένα βραχυκύκλωμα στους ακροδέκτες της μηχανής, η μηχανή τροφοδοτεί το σημείο του σφάλματος με ρεύμα. Το ρεύμα αυτό είναι αμελητέο μετά την πάροδο χρόνου της τάξης των 0.02sec για μηχανές μέχρι 100KW, 0.03sec για μηχανές μεγαλύτερες από 100KW και 0.1sec για πολύ μεγάλες μηχανές, πάνω από 1000KW. Άρα στην περίπτωση του βραχυκυκλώματος η επαγωγική μηχανή μπορεί να θεωρηθεί μια σύγχρονη με αντίδραση από 20 ως 25 % (για υποσύγχρονη κατάσταση).

- Πυκνωτές

Συστοιχίες πυκνωτών, που βρίσκονται κοντά στο σημείο σφάλματος, επειδή η εκφορτίζονται, αυξάνουν το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Αυτή η μεταβατική συμπεριφορά των πυκνωτών μολονότι αποσβήνεται πολύ γρήγορα, είναι δυνατό να αυξήσει το μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης. Διακρίνουμε δύο ακραίες περιπτώσεις :

- Αν το βραχυκύκλωμα συμβαίνει όταν η τάση μηδενίζεται, το ρεύμα εκφορτίσης των πυκνωτών είναι μηδέν. Στην περίπτωση αυτή το ρεύμα βραχυκύκλωσης, έχει τη μέγιστη αρχική τιμή.

- Αντίθετα, αν το βραχυκύκλωμα συμβεί στο μέγιστο της τάσης, το ρεύμα εκφόρτισης προστίθεται στο ρεύμα βραχυκύκλωσης, το οποίο όμως, στην περίπτωση αυτή έχει μικρή τιμή.

Αλλά στοιχεία του δικτύου όπως επαγωγικά φίλτρα, διακόπτες, επαφές ρελέ, επαφές μετασχηματιστών κτλ διαθέτουν αντιστάσεις οι οποίες κάποιες φορές δεν είναι αμελητέες. Στη περίπτωση αυτή θα πρέπει να αναζητηθούν περισσότερες πληροφορίες από τον κατασκευαστή.

### **3.2.3 Αρχή λειτουργίας ανεμογεννητριών**

Οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου και κατακόρυφου άξονα κάνουν χρήση των δυνάμεων που αναπτύσσονται στις αεροτομές για να πετύχουν την παραγωγή ισχύος από τον άνεμο. Ωστόσο υπάρχουν σημαντικές διαφορές στην αρχή λειτουργίας τους.

Στις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, ο άξονας περιστροφής της πτερωτής βρίσκεται σε συνεχή ευθυγράμμιση με την κατεύθυνση του ανέμου. Για δεδομένη ταχύτητα ανέμου και δεδομένη ταχύτητα περιστροφής, η γωνία πρόσπτωσης σε δεδομένη θέση του πτερυγίου, παραμένει σταθερή σε όλο τον κύκλο περιστροφής.

Στις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα για ίδιες συνθήκες, η γωνία πρόσπτωσης σε δεδομένο σημείο του πτερυγίου, συνεχώς μεταβάλλεται σε όλη τη διάρκεια του κύκλου περιστροφής.

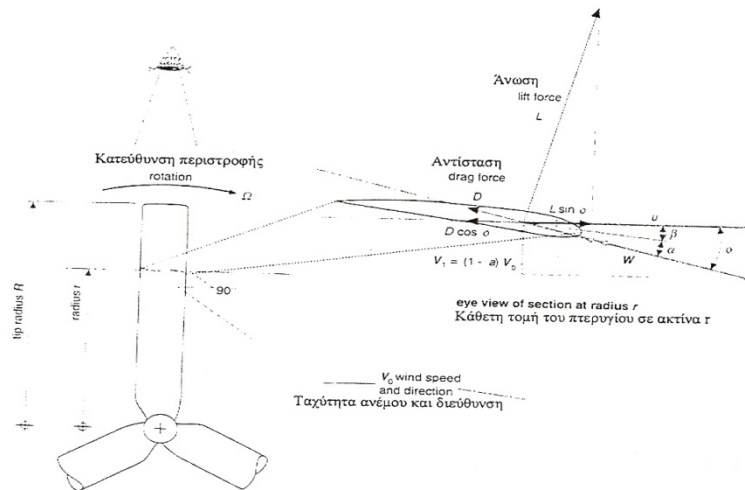
Στις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα η γωνία πρόσπτωσης του σχετικού ανέμου στις αεροτομές παραμένει θετική. Στις κατακόρυφου άξονα έχουμε εναλλαγή των γωνιών από θετικές σε αρνητικές και πάλι θετικές μέσα σε έναν κύκλο περιστροφής. Αυτό σημαίνει ότι η πλευρά υποπίεσης του πτερυγίου αλλάζει, και άρα συμμετρικές αεροτομές χρησιμοποιούνται σε αυτές τις εφαρμογές για να εξασφαλίσουν δυνάμεις άνωσης ανεξάρτητα αν η γωνία πρόσπτωσης είναι θετική ή αρνητική.

#### **3.2.3.1 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα**

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα προσανατολίζονται στην κατεύθυνση του ανέμου, γι' αυτό και ονομάζονται και μηχανές αξονικής ροής. Ο άξονας περιστροφής ευθυγραμμίζεται με την κατεύθυνση της πνοής του ανέμου μέσω του συστήματος προσανατολισμού. Η απόδοση της μηχανής εξαρτάται από τον αριθμό και το σχήμα των πτερυγίων, την επιλογή των αεροτομών, το μήκος της χορδής του πτερυγίου, τη μεταβολή της γωνίας βήματος κατά μήκος του πτερυγίου και τη συστροφή μεταξύ πλήμνης και ακροπτερυγίου.

Όλα αυτά θα γίνουν κατανοητά από τα παρακάτω όπου θα περιγράψουμε πως μεταβάλλεται κατά τη λειτουργία η σχετική ταχύτητα  $W$  και η σχετική γωνία  $\varphi$  κατά μήκος του πτερυγίου.





Σχ. 3.15 Ανυσματική αναπαράσταση δυνάμεων που ασκούνται σε πτερύγιο A/Γ

Στο σχήμα 3.15 φαίνεται ένα τμήμα ενός περιστρεφόμενου πτερυγίου μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα. Επίσης, γίνεται αναπαράσταση των διανυσμάτων των δυνάμεων και των ταχυτήτων που ασκούνται σε ένα σημείο του πτερυγίου μια τυχαία χρονική στιγμή. Η κατεύθυνση με την οποία βλέπει το πτερύγιο τον σχετικό άνεμο, είναι το αποτέλεσμα της ταχύτητας του ανέμου  $V_1$  και της εφαπτομένης της ταχύτητας  $u$  του πτερυγίου στη συγκεκριμένη θέση. Η εφαπτομενική ταχύτητα  $u$  κατά μήκος του πτερυγίου μεταβάλλεται, καθώς μεταβάλλεται η τοπική ακτίνα  $r$ . Και γενικά ισχύει :

$$u = \Omega r \quad (3.20)$$

Όπου η γωνιακή ταχύτητα  $\Omega$  (rad/sec) του πτερυγίου παραμένει σταθερή.

Η ταχύτητα του ανέμου στο πτερύγιο  $V_1$  είναι η επ' άπειρον ταχύτητα  $V_0$  του ανέμου μειωμένη κατά ένα συντελεστή  $a$  που υπολογίζει την επιβράδυνση της ροής λόγω της ανταλλαγής ενέργειας που λαμβάνει χώρα. Ο συντελεστής  $a$  ονομάζεται συντελεστής αξονικής επαγωγής. Είναι :

$$V_1 = (1-a)V_0 \quad (3.21)$$

Όπως έδειξε ο Albert Betz το 1928, το μέγιστο ποσοστό ισχύος που μπορεί να δεσμευθεί θεωρητικά από μια ιδανική έλικα είναι 16/27 ή 59,3%. Αυτό συμβαίνει όταν η επ' άπειρον ταχύτητα του ανέμου μειώνεται κατά το 1/3. Η σχετική του γωνία πρόσπτωσης  $\phi$  είναι η γωνία που σχηματίζει η σχετική ταχύτητα  $W$  με το πτερύγιο και μετριέται από το επίπεδο περιστροφής του πτερυγίου. Η γωνία πρόσπτωσης  $\alpha$  στο συγκεκριμένο σημείο του πτερυγίου σχηματίζεται αντίστοιχα από την χορδή του πτερυγίου στο συγκεκριμένο σημείο και την σχετική ταχύτητα  $W$ . Η γωνία βήματος του πτερυγίου συμβολίζεται με  $\beta$  ή  $\tau$  και ορίζεται από την διαφορά της σχετικής γωνίας πρόσπτωσης  $\phi$  από την γωνία πρόσπτωσης  $\alpha$ . ( $\beta = \phi - \alpha$ )

Η πτέρυγα είναι σχεδιασμένη να περιστρέφεται σε ένα επίπεδο, κάθετα στην κατεύθυνση του ανέμου. Αν αναλύσουμε σε ένα σημείο του πτερυγίου, την άνωση και την αντίσταση στις συνιστώσες τους κατά την περιφερειακή διεύθυνση, η διαφορά των δύο θα μας δώσει την κινητήρια δύναμη. Η συνιστώσα της άνωσης υπολογίζεται από την άνωση  $L$  και το ημίτονο της σχετικής γωνίας πρόσπτωσης  $\phi$ . Αντίστοιχα, η συνιστώσα της αντίστασης ( $D$

cosφ) από το συνημίτονο της γωνίας φ. Ομοίως υπολογίζουμε την συνολική δύναμη που ασκείται κατά την αξονική διεύθυνση. Δηλαδή,

$$F_{\text{περιφερειακή}} = L \sin\phi - D \cos\phi \quad (3.22)$$

$$F_{\text{αξονική}} = L \cos\phi + D \sin\phi \quad (3.23)$$

Η ροπή στρέψης q που εκδηλώνεται στο συγκεκριμένο σημείο του πτερυγίου εξαρτάται από την περιφερειακή δύναμη και την τοπική ακτίνα r. Η συνολική ροπή στρέψης Q που ασκείται στην πτέρυγα υπολογίζεται από το άθροισμα των τοπικών ροπών στρέψεων σε όλα τα σημεία κατά μήκος του πτερυγίου και πολλαπλασιαζόμενο με τον αριθμό των πτερυγίων. Η ισχύς που παράγεται από την πτέρυγα είναι το αποτέλεσμα της συνολικής ροπής στρέψης Q και της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής Ω.

Η σχετική γωνία πρόσπτωσης φ μεταβάλλεται κατά μήκος του πτερυγίου ανάλογα με την τοπική ακτίνα r. Αυτό συμβαίνει διότι η τοπική εφαπτομενική ταχύτητα, u, μεταβάλλεται καθώς μεταβάλλεται η τοπική ακτίνα r. Καθώς η εφαπτομενική ταχύτητα αυξάνεται καθώς πηγαίνουμε από την πλήμνη προς το ακροπτερύγιο, η γωνία φ μειώνεται. Μεταβαλλόμενη γωνία φ σημαίνει ότι κάποιες αεροτομές δεν βλέπουν τη βέλτιστη γωνία πρόσπτωσης, δηλαδή δεν επιτυγχάνουν μεγιστοποίηση της άνωσης.

Αν θέλουμε να επιτύχουμε σταθερή σχετική γωνία πρόσπτωσης φ κατά μήκος του πτερυγίου, πρέπει από κατασκευής να δώσουμε μια συστροφή στο πτερύγιο, η οποία θα αυξάνεται από τη ρίζα του πτερυγίου προς το ακροπτερύγιο. Με άλλα λόγια θα αυξάνεται η γωνία β του βήματος που σχηματίζει το πτερύγιο με το επίπεδο περιστροφής. Σήμερα η ύπαρξη συστροφής στα πτερύγια των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα είναι κάτι το δεδομένο για τους περισσότερους κατασκευαστές.

Ας υποθέσουμε ότι φτιάχνουμε μια ανεμογεννήτρια που μας παρέχει τη δυνατότητα να μεταβάλουμε τη γωνία βήματος κατά την λειτουργία της. Έστω ότι η ανεμογεννήτρια στρέφεται με σταθερή ταχύτητα, και σε κάποια στιγμή η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται. Ταυτόχρονα, η σχετική γωνία πρόσπτωσης αυξάνεται. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα κάποιες περιοχές του πτερυγίου να στολάρουν, δηλαδή του λόγω αλλαγής της γωνίας πρόσπτωσης στην αεροτομή, να μειωθεί η άνωση και άρα η ροπή στρέψης. Όμως η δυνατότητα μεταβολής της γωνίας βήματος, μας επιτρέπει να διορθώσουμε την γωνία πρόσπτωσης, προσδίδοντας συστροφή στο πτερύγιο. Με αυτόν τον τρόπο, την ανεμογεννήτρια συνεχίζει να λειτουργεί και σε μεγάλες ταχύτητες (μεγαλύτερες από την ονομαστική) και αναπαράγει την ονομαστική της ισχύ.

Οι μηχανές που έχουν την δυνατότητα μεταβολής του βήματος ονομάζονται ανεμογεννήτριες μεταβλητού βήματος (pitch control), ενώ οι άλλες ονομάζονται σταθερού βήματος (stall). Οι μηχανές μεταβλητού βήματος παρουσιάζουν τεχνολογική πολυπλοκότητα και άρα και μεγαλύτερο κόστος, έχουν όμως καλή και ρύθμιση ισχύος, και άρα μεγαλύτερη αποδοτικότητα μειωμένα αεροδυναμικά φορτία και ευκολία στην εκκίνηση της μηχανής.

### 3.2.3.2 Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα είναι μηχανές εγκάρσιας ροής. Αυτό σημαίνει ότι η κατεύθυνση πνοής του ανέμου είναι κάθετη στον άξονα περιστροφής. Καθώς τα πτερύγια περιστρέφονται σαρώνουν μια τρισδιάστατη επιφάνεια, εντελώς διαφορετική από την επιφάνεια περιστροφής των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα. Σε

αντίθεση με τους παραδοσιακούς ανεμόμυλους, τα πτερύγια των σύγχρονων ανεμογεννητριών παράγουν το σημαντικότερο μέρος της ισχύος καθώς διέρχονται από το μπροστινό και το πίσω μέρος του όγκου σάρωσης σε σχέση με την κατεύθυνση πνοής του ανέμου.

Καθώς το πτερύγιο κινείται με ταχύτητα αρκετές φορές μεγαλύτερη από την ταχύτητα του ανέμου, η γωνία πρόσπτωσης με την οποία βλέπει την σχετική ταχύτητα ανέμου, αν και μεταβάλλεται, παραμένει μικρή και επιτρέπει την εμφάνιση αεροδυναμικών δυνάμεων, που προκαλούν την εμφάνιση της ροπής στον άξονα.

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα λειτουργούν με τον άνεμο να πνέει από οποιαδήποτε κατεύθυνση. Ας υποθέσουμε ωστόσο, ότι ο άνεμος πνέει από δεδομένη κατεύθυνση, κι επίσης ότι το πτερύγιο είναι τοποθετημένο, έτσι ώστε η χορδή του να είναι εφαπτόμενη στο επίπεδο περιστροφής, δηλαδή είναι απαλλαγμένο συστροφής. Η γωνία του ανέμου, μεταβάλλεται από  $0^\circ$  έως  $360^\circ$  κατά τη διάρκεια ενός κύκλου περιστροφής. Ωστόσο πρέπει να λάβουμε υπόψη μας τον σχετικό άνεμο, που βλέπουν τα πτερύγια κατά την περιστροφή τους και εξαρτάται τόσο από την αδιατάραχτη ροή του ανέμου, όσο κι αν του την ταχύτητα περιστροφής του πτερυγίου  $u$ . Δεδομένου ότι το πτερύγιο περιστρέφεται αρκετά γρήγορα, σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου, η γωνία πρόσπτωσης της σχετικής ταχύτητας θα μεταβάλλεται εντός συγκεκριμένων, μικρών ορίων.

### 3.2.3 Παραγωγή ενέργειας

#### 3.2.3.1 Καμπύλη ισχύος

Η παραγωγή ισχύος μιας ανεμογεννήτριας μεταβάλλεται με την ταχύτητα του ανέμου, και κάθε μηχανή χαρακτηρίζεται από την καμπύλη ισχύος της που εξαρτάται από τα γεωμετρικά της χαρακτηριστικά και τον σχεδιασμό της γενικότερα. Η καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας, βλέπε σχήμα 3.16, χαρακτηρίζεται από την ταχύτητα έναρξης λειτουργίας ( $v_{cut\ in}$ ) όπου η ανεμογεννήτρια ξεκινάει να παράγει ισχύ, την ταχύτητα διακοπής λειτουργίας ( $V_{cut\ out}$ ) όπου η μηχανή τίθεται εκτός λειτουργίας για να προστατευθεί από τον πολύ δυνατό άνεμο, και η ονομαστική ταχύτητα ( $V_T$ ) που είναι η μικρότερη ταχύτητα για την οποία η μηχανή παράγει την ονομαστική της ισχύ ( $P_T$ ). Στην ονομαστική ισχύ, η ανεμογεννήτρια παράγει την μέγιστη ροπή.

#### 3.2.3.2 Παραγωγή ενέργειας

Οι ανεμογεννήτριες δεν μπορούν να παράγουν όση ενέργεια θα θέλαμε, κι όση δηλώνει η ονομαστική ισχύ τους, διότι πολλές ώρες ετησίως λειτουργούν μακριά από αυτήν. Η παραγόμενη ενέργεια μιας αιολικής μηχανής εξαρτάται τόσο από την καμπύλη ισχύος της μηχανής, όσο και από το ρόδο των ανέμων στην περιοχή.

Για κάθε ταχύτητα ανέμου εντός των ορίων λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, η παραγόμενη ενέργεια προκύπτει από το γινόμενο του αριθμού των ωρών εμφάνισης της συγκεκριμένης ταχύτητας ετησίως με την ισχύ που αντιστοιχεί. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί κανείς να φτιάξει την καμπύλη της κατανομής παραγόμενης ενέργειας. Η συνολική ετήσια ενέργεια προκύπτει από το άθροισμα της παραγόμενης ενέργειας για όλες τις ταχύτητες ανέμου που έχουμε λειτουργία.

Αντίστοιχα, μπορεί να υπολογιστεί η μέση ετήσια παραγόμενη ισχύς. Χωρίζουμε την περιοχή ταχυτήτων σε  $N$  διαστήματα.

Η μέση ετήσια ισχύς είναι :

$$\bar{P}_g = \sum_{i=1}^N P_g \left( \frac{V_i + V_{i+1}}{2} \right) P(V_i < V < V_{i+1}) \quad (3.24)$$

Όπου  $P_g(V)$  η ισχύς της ανεμογεννήτριας σε συνάρτηση με την ταχύτητα,

$P(V_i < V < V_{i+1})$  η πυκνότητα πιθανότητας να πνέει άνεμος ταχύτητας μεγαλύτερης της  $V_i$  και μικρότερης της  $V_{i+1}$ . Δεδομένου ότι  $P(V_i < V < V_{i+1}) = P(V < V_{i+1}) - P(V < V_i)$

Στη συνέχεια δεδομένης της μέσης ετήσιας ισχύος υπολογίζουμε την ετήσια παραγόμενη ενέργεια :

$$E = 8760 \bar{P}_g \quad (3.25)$$

Πρόσθετοι παράγοντες που επηρεάζουν την παραγόμενη ενέργεια είναι η διαθεσιμότητα της μηχανής, οι απώλειες μεταφοράς και ο βαθμός απόδοσης του αιολικού πάρκου.

Η διαθεσιμότητα εκφράζει το ποσοστό του χρόνου που είναι διαθέσιμη η ανεμογεννήτρια για να λειτουργήσει και εκφράζεται με τον συντελεστή διαθεσιμότητας. Να σημειωθεί ότι ο συντελεστής διαθεσιμότητας δεν σχετίζεται με το αιολικό δυναμικό, αλλά το ποσοστό του χρόνου που προορίζεται για συντήρηση. Στο σύνολο του έτους υπάρχουν προγραμματισμένες εργασίες συντήρησης που πρέπει να γίνουν, αλλά υπάρχει και η περίπτωση, να σημειωθεί κάποια βλάβη, οπότε αναγκαστικά μένει εκτός λειτουργίας η μηχανή μέχρι να επισκευαστεί.

Τυπικές τιμές του συντελεστή διαθεσιμότητας είναι 0,9-0,98. Σε περιοχές με καλή παροχή υπηρεσιών και εύκολη πρόσβαση στο πάρκο, η συντήρηση, επιδιόρθωση πιθανών βλαβών και παραλαβή των αναγκαίων ανταλλακτικών μπορεί να είναι άμεση, οπότε ο συντελεστής διαθεσιμότητας είναι ιδιαίτερα υψηλός. Το αντίθετο συμβαίνει σε απομονωμένες περιοχές.

Ο βαθμός απόδοσης του αιολικού πάρκου, εκφράζει τις απώλειες που έχουμε λόγω αλληλεπίδρασης ανεμογεννητριών σε αιολικά πάρκα, και οφείλεται κατά κύριο λόγο στο έλλειμμα της ταχύτητας που παρουσιάζεται στον ομόρροου της ανεμογεννήτριας.

Ο Συντελεστής Εκμεταλλευσιμότητας τις ανεμογεννήτριες ορίζεται ως :

$$CF = \frac{E}{E_R} = \frac{\bar{P}}{P_R}, \text{ όπου } E_R = 8760 P_R \quad (3.26)$$

ουσιαστικά δηλώνει την ποιότητα της σχεδίασης και κατασκευής της μηχανής, σε σχέση με το αιολικό δυναμικό της περιοχής. Ο συντελεστής εκμεταλλευσιμότητας δείχνει πόση ενέργεια παράγεται πραγματικά ως ποσοστό της ενέργειας που θα παραγόταν αν η αιολική μηχανή ή το πάρκο λειτουργούσαν όλο το χρόνο με την ονομαστική τους ισχύ. Ένας ικανοποιητικός συντελεστής εκμεταλλευσιμότητας είναι από 0,25 έως 0,35.

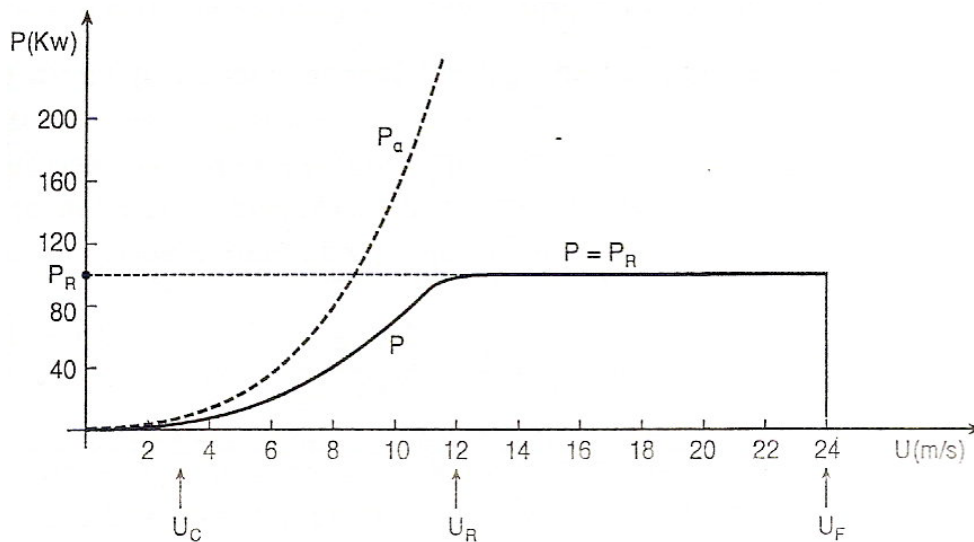
### 3.2.4 Αιολικά πάρκα

Η πυκνότητα της αιολικής ενέργειας είναι μικρή με αποτέλεσμα για να παραχθεί μια αξιολογη ποσοτικά ενέργειας, συγκρίσιμη με αυτή των συμβατικών σταθμών, απαιτούνται πολλές μηχανές. Λόγω προβλημάτων διαθεσιμότητας γης σε συνδυασμό με ύπαρξη καλού αιολικού δυναμικού σε συγκεκριμένες περιοχές, καθώς και την επιδίωξη της ελαχιστοποίησης του κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας, η ηλεκτροπαραγωγή γίνεται σε συστοιχίες ανεμογεννητριών που ονομάζονται αιολικά πάρκα.

Γενικά αιολικό πάρκο ονομάζεται μια ομάδα ανεμογεννητριών εγκατεστημένες στην ίδια

τοποθεσία. Κάθε ανεμογεννήτρια είναι συνδεδεμένη σε ένα εσωτερικό δίκτυο χαμηλής ή μέσης τάσης, το οποίο συνδέεται με το διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό δίκτυο μέσω ενός μετασχηματιστή ανύψωσης της τάσης. Υπάρχουν τρία βασικά είδη αιολικών πάρκων :

- τα χερσαία (onshore)
- τα πάρκα που βρίσκονται κοντά στην ακτή (nearshore)
- και τα παράκτια (offshore)



Σχ. 3.16 Χαρακτηριστική ισχύος- ταχύτητας ανέμου.

### Χερσαία Αιολικά Πάρκα (onshore)

Χερσαία αιολικά πάρκα, ονομάζονται αυτά που κατασκευάζονται στις κορυφογραμμές περιοχών με μεγάλο σχετικά υψόμετρο τουλάχιστον τρία χιλιόμετρα προς το εσωτερικό από την πλησιέστερη ακτογραμμή βλέπε σχήμα 3.17. Αυτό συμβαίνει για την εκμετάλλευση της λεγόμενης τοπογραφικής επιτάχυνσης, την επιτάχυνση δηλαδή του ανέμου καθώς διασχίζει μια κορυφογραμμή. Η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου οδηγεί και σε αύξηση της παραγόμενης ενέργειας. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στην ακριβή τοποθέτηση των ανεμογεννητριών, η οποία γίνεται μετά από αναλυτική παρακολούθηση των τοπικών ανέμων για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα πριν την εγκατάσταση. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η περιοχή στην οποία εγκαθίσταται το αιολικό πάρκο, αλλοιώνεται μόνο οπτικά και παραμένει αξιοποιήσιμη για γεωργία η κτηνοτροφία.

### Αιολικά Πάρκα κοντά στην ακτή

Είναι τα πάρκα που βρίσκονται στην ξηρά εντός της ζώνης των τριών χιλιομέτρων από την ακτογραμμή ή στην θάλασσα εντός της ζώνης των δέκα χιλιομέτρων από την ακτογραμμή. Αυτές οι τοποθεσίες είναι αποδοτικές για εγκατάσταση λόγω του ανέμου που δημιουργείται από την θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ θάλασσας και ξηράς καθημερινά μια εικόνα τέτοιου πάρκου βλέπουμε στο σχήμα 3.18.

### **Παράκτια Αιολικά Πάρκα (offshore)**

Είναι εγκατεστημένα σε θαλάσσιες περιοχές πέραν των δέκα χιλιομέτρων από την ακτή. Ακριβώς επειδή η επιφάνεια του νερού είναι ομαλότερη αυτής του εδάφους, η ταχύτητα του ανέμου είναι υψηλότερη από την ξηρά, έτσι ο συντελεστής χρησιμοποίησης ή συντελεστής εκμετάλλευσης (Capacity Factor) είναι υψηλότερος των άλλων δυο τύπων αιολικών πάρκων, βλέπε σχήμα 3.19.

Γενικά έχουν μεγαλύτερο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης, οι πύργοι είναι ψηλότεροι των χερσαίων. Η μεταφορά της ενέργειας γίνεται με υποθαλάσσιο καλώδιο, σε περιπτώσεις μεγάλων αποστάσεων από την ακτή χρησιμοποιείται μεταφορά με συνεχές ρεύμα υψηλής τάσης (HVDC) για ελαχιστοποίηση των απωλειών κατά την μεταφορά.



**Σχ. 3.17** Onshore αιολικό πάρκο.



**Σχ. 3.18** Nearshore αιολικό πάρκο.



Σχ. 3.19 Offshore αιολικό πάρκο.

#### 3.2.4.1 Λειτουργία αιολικών πάρκων

Το ενδιαφέρον για τη χρήση “offshore” (παράκτιων) αιολικών πάρκων αυξάνεται σημαντικά διεθνώς. Ο λόγος είναι πως η ταχύτητα του ανέμου κοντά στην ακτή είναι υψηλότερη από ότι “onshore” (χερσαία πάρκα), κάτι που σημαίνει πολύ υψηλότερη παραγωγή ισχύος. Ένα 10% αύξηση στην ταχύτητα του ανέμου αντιστοιχεί σε 30% αύξηση στην παραγωγή ισχύος. Εντούτοις, το κόστος εγκατάστασης είναι πολύ μεγάλο για “offshore” σε σχέση με “onshore” αιολικά πάρκα. Το εσωτερικό ηλεκτρικό σύστημα ενός “offshore” αιολικού πάρκου και η σύνδεσή του με το κύριο σύστημα ισχύος θέτει νέες προκλήσεις.

Στο “onshore”, η συνηθισμένη λύση είναι ένα a.c. δίκτυο μέσα στο αιολικό πάρκο, το οποίο συλλέγει την παραγωγή ισχύος από κάθε ανεμογεννήτρια. Το επίπεδο της τάσης μέσα σε ένα αιολικό πάρκο είναι συχνά το ίδιο με το μέσο επίπεδο της τάσης στο σημείο διανομής του δικτύου. Όπως οι περισσότερες γεννήτριες σε αιολικά συστήματα λειτουργεί σε ένα επίπεδο τάσης των 690V. Μετασχηματιστές οι οποίοι έχουν εγκατασταθεί απευθείας ή κοντά στη βάση κάθε ανεμογεννήτριας χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν το επίπεδο τάσης της γεννήτριας στο επίπεδο τάσης του δικτύου του αιολικού πάρκου. Το υψηλότερο επίπεδο τάσης που χρησιμοποιείται σε ένα “onshore” αιολικό πάρκο κινείται συνήθως μεταξύ 33 και 36kV.

Εντούτοις, τα “offshore” αιολικά πάρκα τείνουν να γίνουν μεγαλύτερα και η απόσταση ανάμεσα στις ανεμογεννήτριες είναι συνήθως μεγαλύτερη από ότι σε “onshore” αιολικά πάρκα. Για μεγάλα offshore αιολικά πάρκα με a.c. δίκτυο, υψηλότερα επίπεδα τάσης είναι χρήσιμα για την ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος, αλλά από την άλλη μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερους μετασχηματιστές και υψηλότερα κόστη



μετασχηματιστών. Οι μετασχηματιστές τοποθετούνται στην άτρακτο, τον πύργο ή σε ένα κιβώτιο μετά την ανεμογεννήτρια. Για αυτό το λόγο το μέγεθος του μετασχηματιστή μπορεί να είναι πρόβλημα. Σήμερα, μια τάση συλλογής των 36kV θεωρείται κλασική επιλογή. Μικρότερα “offshore” αιολικά πάρκα επιλέγονται για συγκριτικά χαμηλά επίπεδα τάσης. Ο λόγος είναι ότι η μείωση των απωλειών φόρτισης δεν είναι επαρκής για να δικαιολογηθεί το κόστος του απαιτούμενου εξοπλισμού για υψηλότερα επίπεδα τάσης. Το ίδιο εφαρμόζεται σε μικρότερα “offshore” αιολικά πάρκα που σχεδιάζονται τελευταία.

Ο σχεδιασμός δικτύου ενός “offshore” αιολικού πάρκου δεν αντιστοιχεί απαραίτητα στο πιο ενεργειακά αποδοτικό δίκτυο (δηλ. με τις χαμηλότερες απώλειες). Ο λόγος είναι ότι οι offshore σταθμοί μετασχηματισμού είναι πιο σύνθετοι και περιλαμβάνουν μεγάλες δομές υποστήριξης. Έτσι, οι offshore σταθμοί μετασχηματισμού είναι πολύ ακριβοί ενώ δεν είναι εξακριβωμένη ακόμα η αξιοπιστία τους. Για τη μεταφορά στην ακτή, χρησιμοποιούνται είτε HVAC (υψηλής τάσης εναλλασσόμενο ρεύμα) είτε HVDC (υψηλής τάσης συνεχές ρεύμα) συνδέσεις.

Για HVDC υπάρχουν δυο τεχνικές :

ο “LCC” (line commutated converter) βασισμένος στην HVDC τεχνολογία και ο “VSC” (voltage source converter) βασισμένος στο HVDC .

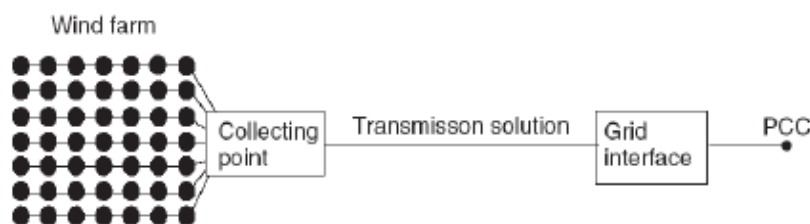
Όλα τα offshore αιολικά πάρκα που λειτουργούν τελευταία έχουν αποδεχτεί την a.c. επιλογή, καθώς και όλα όσα προγραμματίζεται να εγκατασταθούν στο άμεσο μέλλον θα χρησιμοποιούν επίσης την a.c. λύση. Αυτό γίνεται εξαιτίας του συγκριτικά μικρού μεγέθους και / ή της μικρής απόστασης ανάμεσα στην ακτή και τα υπαρκτά αιολικά πάρκα.

Καθώς το μέγεθος των μελλοντικών αιολικών πάρκων και η απόσταση από την ακτή φαίνεται να αυξάνονται, αυτό μπορεί να αλλάξει.

Υπάρχουν 3 διαφορετικοί τρόποι σύνδεσης των offshore αιολικών πάρκων με την ακτή.

- HVAC μεταφορά
- LCC βασισμένη σε HVDC μεταφορά
- VSC βασισμένη σε HVDC μεταφορά

Το γενικό μοντέλο ενός offshore αιολικού πάρκου, με HVAC ή HVDC μεταφορά φαίνεται στο σχήμα 3.20.



Σχ. 3.20 Σχηματικά ένα offshore αιολικά πάρκο.

### 3.2.4.2 Πεδίο ροής όμορου ανεμογεννήτριας

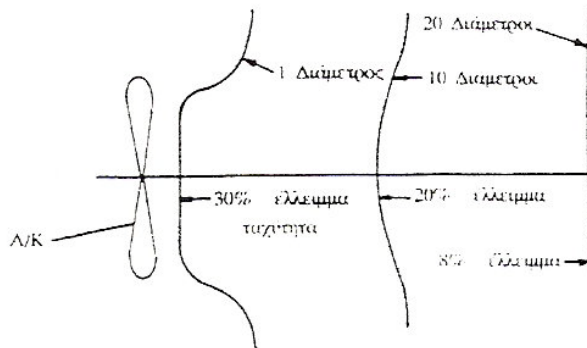
Κάθε ανεμογεννήτρια λόγω της διαδικασίας δέσμευσης ενέργειας από τον άνεμο, επιβραδύνει τη ροή και δημιουργεί έναν όμορο χαμηλής ταχύτητας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, μια μηχανή που βρίσκεται κατάντι να βλέπει άνεμο χαμηλότερης ταχύτητας και να παράγει λιγότερη ενέργεια από την πρώτη μηχανή.



Η θέση εγκατάστασης των αιολικών μηχανών, η διάταξη μεταξύ τους, αλλά και ως προς την κύρια κατεύθυνση του ανέμου αποτελεί αντικείμενο ερευνητικής προσπάθειας με στόχο την ελαχιστοποίηση των αλληλεπιδράσεων και την μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης του αιολικού πάρκου.

Ως ομόρρου μιας ανεμογεννήτριας εννοούμε την κατάντι σε αυτήν περιοχή της ροής όπου σε σχέση με την προσπίπτουσα στην μηχανή ροή του ανέμου παρατηρείται σημαντικό έλλειμμα. Το έλλειμμα αυτό ταχύτητας αντιστοιχεί στην κινητική ενέργεια που απορρόφησε η μηχανή. Η μελέτη του ομόρρου είναι κλασικό πρόβλημα της ρευστομηχανικής. Ωστόσο η ακριβής πρόλεξη των χαρακτηριστικών του ομόρρου μιας ανεμογεννήτριας είναι δύσκολη, καθώς επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Ο σπουδαιότερος παράγοντας που επηρεάζει τη φύση της ροής του ομόρρου, είναι η ώση. Αυτή είναι μία δύναμη από το δρομέα στο ρευστό, η οποία προκύπτει λόγω της εξαγωγής ισχύος από τη ροή. Η δύναμη αυτή ενεργεί στη διεύθυνση της ταχύτητας του αδιατάραχτου ρεύματος. Σημαντικοί παράγοντες είναι επίσης η επίδραση του πύργου, η επίδραση του εδάφους, το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, τα επίπεδα την τύρβης της ροής του ανέμου κι άλλοι.

Η εξέλιξη του ομόρρου, η ταχύτητα κατάντι της πρώτης ανεμογεννήτριας και η απόδοση της κατάντι ανεμογεννήτριας, εξαρτάται από την σχετική θέση ως προς την πρώτη. Ο ομόρρος μιας ανεμογεννήτριας έχει διανομή ταχυτήτων της μορφής του σχήματος 3.21, και σταδιακά και απενεργοποιείται. Εκτός της μείωσης της ταχύτητας του ανέμου, ο ομόρρος μιας ανεμογεννήτριας χαρακτηρίζεται από αυξημένα επίπεδα τύρβης, γεγονός που επίσης οφείλεται στον μηχανισμό απορρόφησης.



Σχ. 3.21 Εξασθένιση ταχύτητας ανέμου πίσω από A/K

#### 3.2.4.4 Βαθμός απόδοσης Αιολικού πάρκου

Ο βαθμός απόδοσης αιολικού πάρκου εκφράζει τις απώλειες που έχουμε λόγω της αλληλεπίδρασης λόγω ομόρρου των ανεμογεννητριών ενός αιολικού πάρκου και ορίζεται από την σχέση :

$$n = \frac{\sum_{i=1}^{n_T} P_i}{n_T P_w} \quad (3.27)$$

όπου  $n_T$  είναι το συνολικό πλήθος των ανεμογεννητριών του πάρκου,  $P_i$  η ισχύς της  $i$ -οστης ανεμογεννήτριας και  $P_w$  η ισχύς που αντιστοιχεί στην ταχύτητα αναφοράς του ανέμου, και εκφράζει την ισχύ που θα παρήγαγε κάθε ανεμογεννήτρια αν λειτουργούσε μόνη της.

Ο βαθμός απόδοσης αιολικού πάρκου, έτσι όπως ορίστηκε, αναφέρεται σε συγκεκριμένη ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου. Για να υπολογιστεί ο ετήσιος βαθμός απόδοσης του πάρκου, πρέπει να ληφθεί υπόψη η συχνότητα εμφάνισης κάθε ταχύτητας και διεύθυνσης. Για τον υπολογισμό είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε την χωροθέτηση του αιολικού πάρκου, αναλυτικά ανεμολογικά δεδομένα και τα χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών. Ενημερωτικά παρατίθεται ο πίνακας 3.1 με τους μεγαλύτερους κατασκευαστικές ανεμογεννητριών.

	ACCUMULATED 2006 (MW)	IN 2007	SHARE IN 2007 %	ACCUMULATED IN 2007	ACCUMULATED SHARE %
VESTAS (DK)	25,005	4,503	22.8%	29,508	31.4%
ENERCON (GE)	11,001	2,769	14.0%	13,770	14.6%
GAMESA (ES)	10,258	3,047	15.4%	13,305	14.2%
GE WIND (US)	9,696	3,283	16.6%	12,979	13.8%
SIEMENS (DK)	5,605	1,397	7.1%	7,002	7.4%
SUZLON (IND)	2,642	2,082	10.5%	4,724	5.0%
NORDEX (GE)	3,209	676	3.4%	3,885	4.1%
ACCIONA (ES)	798	873	4.4%	1,671	1.8%
GOLDWIND (PRC)	627	830	4.2%	1,457	1.5%
SINOVEL (PRC)	75	671	3.4%	746	0.8%

Source: BTM

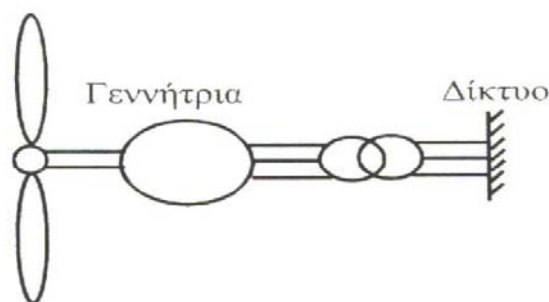
**Πίνακας 3.1** Βασικότεροι κατασκευαστές ανεμογεννητριών ανά τον κόσμο

### 3.3 Τρόποι λειτουργίας ανεμογεννητριών

Υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι λειτουργίας των συστημάτων μετατροπής της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική : η μέθοδος λειτουργίας σταθερής ταχύτητας (fixed speed) και η μέθοδος λειτουργίας μεταβλητής ταχύτητας (variable speed).

#### 3.3.1 Σταθερής ταχύτητας ανεμογεννήτριες

Λειτουργία σταθερής ταχύτητας σημαίνει ότι ο δρομέας της ανεμογεννήτριας στρέφεται με σταθερό αριθμό στροφών ανεξάρτητα της ταχύτητας του ανέμου. Ο τρόπος σύνδεσης της γεννήτριας με το δίκτυο, είναι ο ίδιος με τον τρόπο σύνδεσης γεννητριών που τροφοδοτούνται από συμβατικές πηγές ενέργειας. Δηλαδή η σύνδεση γίνεται απευθείας, χρησιμοποιώντας ένα μετασχηματιστή προσαρμογής του επιπέδου τάσης της γεννήτριας, σε αυτό του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (σχήμα 3.22).



**Σχ. 3.22** Αναπαράσταση ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών

Αυτός ο τρόπος σύνδεσης, “επιβάλλει” στην ανεμογεννήτρια την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της. Η γεννήτρια που χρησιμοποιείται μπορεί να είναι είτε σύγχρονη είτε ασύγχρονη. Ειδικότερα δε, όταν χρησιμοποιούνται σύγχρονες μηχανές ως γεννήτριες, ο αριθμός στροφών παραμένει σταθερός, ενώ όταν χρησιμοποιούνται ασύγχρονες μηχανές το εύρος μεταβολών των στροφών εξαρτάται από το φορτίο και είναι περιορισμένο.

Τα συστήματα σταθερών στροφών – σταθερής συχνότητας είναι συστήματα που βασίζονται στην υλοποίηση συστημάτων ελέγχου μεθόδου “stall” (απώλεια αεροδυναμικής στήριξης, εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων), είτε συστημάτων ελέγχου μεθόδου “pitch” (έλεγχος μεταβολής της κλίσης των πτερυγίων).

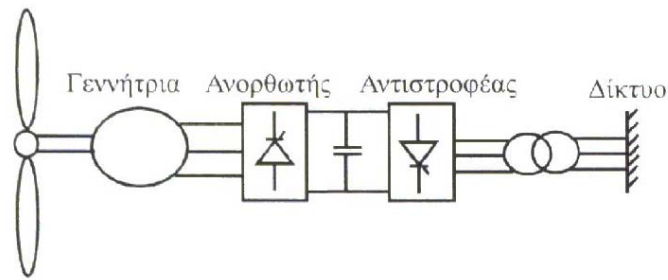
Οι συμβατικές ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών διαθέτουν κυρίως γεννήτριες επαγωγής τύπου βραχυκυκλωμένου κλωβού. Ο λόγος που προτιμάται η ασύγχρονη γεννήτρια είναι γιατί είναι κατασκευαστικά απλούστερη κάτι που μειώνει το κόστος και αυξάνει την αξιοπιστία της συγκρινόμενη με τη σύγχρονη γεννήτρια. Επιπλέον η γωνιακή της ταχύτητα μπορεί να μεταβάλλεται σε ένα εύρος λίγο πάνω από τη σύγχρονη ταχύτητα. Αυτή η δυνατότητα έχει ως αποτέλεσμα να εξομαλύνονται οι διακυμάνσεις της ισχύος στην έξοδο της γεννήτριας καθώς και η καταπόνηση του μηχανικού συστήματος μεταφοράς. Το μεγάλο μειονέκτημα που παρουσιάζει είναι ότι, σε αντίθεση με την σύγχρονη γεννήτρια, απορροφά άεργο ισχύ. Για την τροφοδοσία της ασύγχρονης γεννήτριας με άεργο ισχύ, συνδέονται στους ακροδέκτες των τυλιγμάτων της κατάλληλοι πυκνωτές.

Το σύστημα σταθερών στροφών παρουσιάζει το πλεονέκτημα της εξαιρετικής απλότητας και αξιοπιστίας και των μηδενικών αναγκών συντήρησης, γεγονός που συνέβαλε στην καθιέρωσή του, σε μια εποχή όπου η αξιοπιστία ήταν το βασικότερο από τα προς επίλυση προβλήματα των ανεμογεννητριών. Ταυτόχρονα, όμως, το σχήμα αυτό χαρακτηρίζεται από μια σειρά από καθοριστικά μειονεκτήματα, τα οποία σχετίζονται αφ’ ενός με την σταθερότητα των στροφών και αφ’ ετέρου με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της μηχανής επαγωγής. Εάν η μεταβαλλόμενη αεροδυναμική ροπή περιέχει αρμονικές συνιστώσες, που βρίσκονται κοντά στις συχνότητες συντονισμού του μηχανικού συστήματος μετάδοσης της ισχύος, θα εμφανιστούν έντονες ταλαντώσεις σ’ αυτό αλλά και στην ισχύ εξόδου της γεννήτριας. Συνεπώς έχουμε αυξημένη μεταβλητότητα ροπών και της ισχύος εξόδου, ταλαντώσεις του μηχανικού συστήματος και τέλος λειτουργία του δρομέα σε υποβέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος.

### 3.3.2 Ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας

Στην λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας, η ταχύτητα του δρομέα της ανεμογεννήτριας μεταβάλλεται κατά ελεγχόμενο τρόπο, ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Για την σύνδεση της ανεμογεννήτριας με το δίκτυο σταθερής συχνότητας χρησιμοποιείται μετατροπέας συχνότητας, με τον τρόπο αυτό η ταχύτητα περιστροφής αποδεσμεύεται από τη σταθερή συχνότητα του δικτύου και είναι δυνατή η μεταβολή της. Στο σχήμα 3.23 παρουσιάζεται το διάγραμμα ενός συστήματος μεταβλητής ταχύτητας.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.23, στην έξοδο της γεννήτριας συνδέεται ένας τριφασικός ανορθωτής ελεγχόμενος ή μη, που μετατρέπει τα εναλλασσόμενα ηλεκτρικά μεγέθη σε συνεχή. Η σύνδεση στο δίκτυο γίνεται μέσω ενός αντιστροφέα, ο οποίος μετατρέπει τα συνεχή ηλεκτρικά μεγέθη σε εναλλασσόμενα, συχνότητας ίδιας με αυτήν του δικτύου. Οι μετατροπείς αυτοί μπορούν να αποτελούνται είτε από θυρίστορ, είτε από ημιαγωγικά στοιχεία ελεγχόμενης έναυσης και σβέσης, όπως θυρίστορ με πύλη σβέσης (GTO) ή τρανζίστορ μονωμένης πύλης (IGBT).



Σχ. 3.23 Αναπαράσταση ανεμογεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας

Το βασικό πλεονέκτημα της λειτουργίας μεταβλητής ταχύτητας είναι η βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης της μηχανής, καθώς αυξάνεται το ποσοστό εκμετάλλευσης της κινητικής ενέργειας του ανέμου κυρίως κατά τις χαμηλές ταχύτητες ανέμου, σε σχέση με την λειτουργία σταθερής ταχύτητας. Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι δυνατότητα ελέγχου της άεργου ισχύος ανάλογα με τον τύπο μετατροπέα που χρησιμοποιείται. Σημαντικό επίσης πλεονέκτημα από την λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας είναι η εξομάλυνση της μεταβλητότητας των μηχανικών ροπών και απόσβεση των συντονισμών του μηχανικού συστήματος μετάδοσης της κίνησης, τα οποία σημαίνουν μείωση των μηχανικών καταπονήσεων και αύξηση της διάρκειας ζωής του συστήματος.

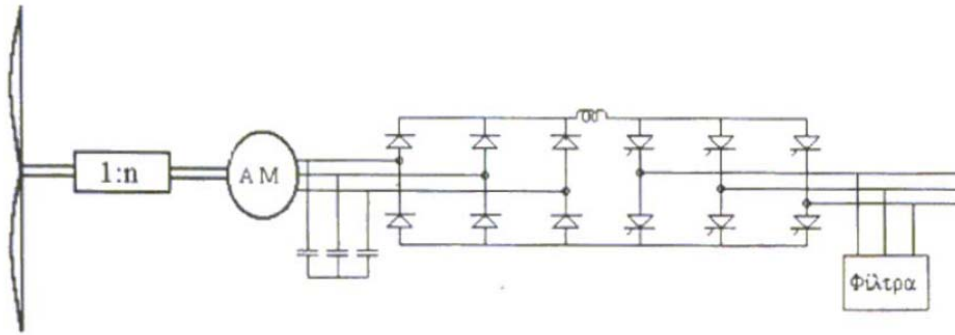
Τα μειονεκτήματα αυτού του συστήματος είναι καταρχήν η αυξημένη πολυπλοκότητα λόγω του μετατροπέα συχνότητας και η αντίστοιχη αύξηση του κόστους. Επίσης λόγω του ηλεκτρονικού μετατροπέα παρουσιάζεται αύξηση των ανώτερων αρμονικών που εισέρχονται στο δίκτυο, κάτι που κάνει αναγκαία την εγκατάσταση φίλτρων για τον περιορισμό τους.

Υπάρχουν διάφορα συστήματα εκ των οποίων στη συνέχεια θα εξεταστούν τα ακόλουθα τρία:

- Ασύγχρονη μηχανή βραχυκυκλωμένου δρομέα (κλωβό) με διασύνδεση ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ στον στάτη.
- Ασύγχρονη μηχανή δακτυλιοφόρου δρομέα με διασύνδεση ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ στον δρομέα
- Σύγχρονη μηχανή με διασύνδεση ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ στον στάτη.

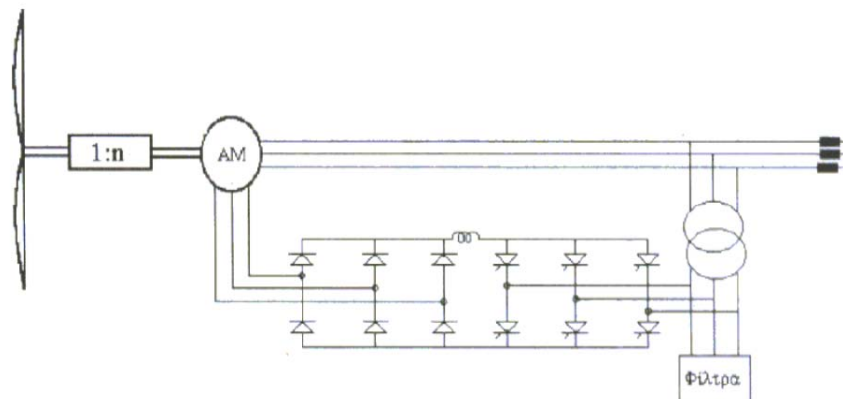
Στο σχήμα 3.24 εικονίζεται η απλούστερη δυνατή διάταξη ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με χρήση ασύγχρονης γεννήτριας, η οποία αυτοδιεγείρεται μέσω συστοιχίας πυκνωτών. Οι χρησιμοποιούμενοι μετατροπείς είναι ένας μη ελεγχόμενος ανορθωτής διόδων στους ακροδέκτες της μηχανής και μια εξαπαλμική γέφυρα με θυρίστορ που λειτουργεί ως αντιστροφέας.

Ο ανορθωτής διόδων μετατρέπει τη μεταβαλλόμενου πλάτους και μεταβαλλόμενης συχνότητας, τάση των ακροδεκτών της γεννήτριας σε συνεχή. Η συνεχής τάση από την πλευρά του αντιστροφέα ρυθμίζεται μέσω της γωνίας έναυσης των θυρίστορ. Η διαφορά μεταξύ των δύο τάσεων καθορίζει την τιμή του συνεχούς ρεύματος. Άρα, μεταβάλλοντας κατάλληλα την γωνία έναυσης των θυρίστορ, μπορούμε να ρυθμίζουμε την ροή ισχύος από την γεννήτρια στο δίκτυο, έτσι ώστε να ελέγχεται η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα κατά τον επιθυμητό τρόπο. Η διάταξη του σχήματος 3.24 χρησιμοποιείται για τον έλεγχο αεροκινητήρων ισχύος μέχρι 250 kW.



Σχ. 3.24 Απλουστευμένη διάταξη ανεμογεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας

Ο περιορισμός της ισχύος σε αυτά τα συστήματα, για μεγάλες ταχύτητες του ανέμου, επιτυγχάνεται μέσω ελέγχου του βήματος των πτερυγίων. Οι πυκνωτές στους ακροδέκτες της ασύγχρονης γεννήτριας τροφοδοτούν την άεργο ισχύ που απαιτείται για την διέγερσή της. Κύρια πλεονεκτήματα της διάταξης είναι βέβαια το χαμηλό κόστος της ασύγχρονης γεννήτριας και η απλότητα και αξιοπιστία του ανορθωτή διόδων. Όμως, η επιλογή ανορθωτή διόδων δεν μας δίνει την δυνατότητα ελέγχου της τάσης στη διασύνδεση συνεχούς ρεύματος. Η τάση αυτή αυξάνεται καθώς αυξάνονται οι στροφές της γεννήτριας. Για τον λόγο αυτό έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι περιορισμού της, με κατάλληλη διαμόρφωση της παλμοδότησης των ημιαγωγικών στοιχείων του αντιστροφέα. Από την πλευρά του δικτύου, απαιτούνται μεγάλα και δαπανηρά φίλτρα έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι αρμονικές ρεύματος που δημιουργούνται από τον αντιστροφέα. Εκτός από το πρόβλημα των αρμονικών, ο αντιστροφέας απορροφά και άεργο ισχύ από το δίκτυο. Σε ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών έχει προταθεί και διερευνηθεί σε σημαντικό βαθμό η διάταξη ασύγχρονης μηχανής δακτυλιοφόρου δρομέα με σύστημα μετατροπέων συνδεδεμένων στους ακροδέκτες του. Στην απλούστερη περίπτωση, η διάταξη των μετατροπέων περιλαμβάνει μη ελεγχόμενο ανορθωτή στους ακροδέκτες του δρομέα και γέφυρα που λειτουργεί ως αντιστροφέας στην έξοδο, όπως δείχνεται στο σχήμα 3.25, μέσω των οποίων πραγματοποιείται η ανάκτηση της ισχύος ολισθήσεως και η επιστροφή της στο δίκτυο.



Σχ. 3.25 Απλουστευμένη διάταξη ανεμογεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας που περιλαμβάνει μη ελεγχόμενο ανορθωτή

Στο σχήμα 3.25, ο αντιστροφέας αποτελείται από θυρίστορ. Η ηλεκτρική ροπή της γεννήτριας είναι ανάλογη του ρεύματος του δρομέα και κατά συνέπεια του συνεχούς ρεύματος. Άρα, μεταβάλλοντας κατάλληλα την γωνία εναύσεως των θυρίστορ του αντιστροφέα, μπορούμε να ρυθμίζουμε την ηλεκτρική ροπή, έτσι ώστε να μεταβάλλεται η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα κατά τον επιθυμητό τρόπο. Αυτή η συνδεσμολογία προτιμάται για συστήματα μεγάλης ισχύος (της τάξεως των MW). Η ασύγχρονη μηχανή είναι δακτυλιοφόρου δρομέα, η οποία σε σχέση με την βραχυκυκλωμένου δρομέα είναι ακριβότερη και έχει μμεγαλύτερες απαιτήσεις συντήρησης.

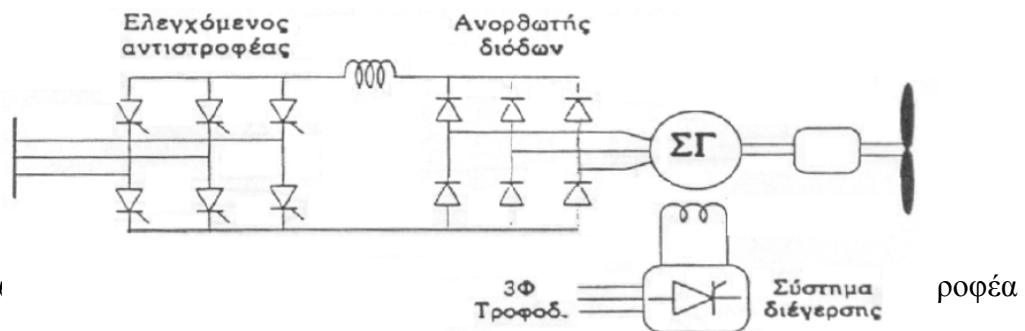
Από την άλλη πλευρά, επειδή οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς είναι στον δρομέα, διαχειρίζονται μόνο ένα τμήμα της συνολικής ισχύος εξόδου, το οποίο καθορίζεται από το εύρος ολισθήσεων που θέλουμε να λειτουργεί η μηχανή. Αυτό το γεγονός οδηγεί σε μείωση της ονομαστικής ισχύος των μετατροπέων και άρα και του κόστους τους. Αυτό είναι και το βασικό πλεονέκτημα αυτής της διάταξης που σε συνδυασμό με την απλότητα και την αξιοπιστία των μετατροπέων την καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστική για εφαρμογές ανεμογεννητριών. Επιπλέον έχουμε μικρότερη καταπόνηση του δικτύου από αρμονικές. Παρόλα αυτά το πρόβλημα του μικρού συντελεστή ισχύος, λόγω του αντιστροφέα από θυρίστορ και η ύπαρξη αρμονικών συνεχίζουν να υφίστανται.

Επίσης σε αρκετά χαμηλή συχνότητα έχουμε ταλαντώσεις της ηλεκτρικής ροπής λόγω των παραμορφωμένων ρευμάτων του δρομέα. Το τελευταίο γεγονός πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη στον σχεδιασμό του μηχανικού συστήματος μεταφοράς της ισχύος, για την αποφυγή κάποιου πιθανού συντονισμού.

Τέλος, είναι δυνατές και άλλες παραλλαγές της διάταξης οι οποίες μπορεί να περιλαμβάνουν ελεγχόμενο ανορθωτή με θυρίστορ αντί για τον ανορθωτή διόδων ή σύστημα διπλών μετατροπέων PWM. Η τελευταία υλοποίηση μάλιστα είναι και η καλύτερη καθώς απαλείφει και τα προβλήματα των αρμονικών, διατηρώντας το πλεονέκτημα του μειωμένου μεγέθους των μετατροπέων .

Η χρησιμοποίηση σύγχρονης μηχανής για γεννήτρια έχει το πλεονέκτημα ό τ δεν χρειάζεται τους πυκνωτές οι οποίοι αποτελούν εξωτερική πηγή έργου ισχύος. Όμως το κόστος της είναι μεγαλύτερο από το κόστος ασύγχρονης μηχανής.

Μια διαφορετική διαμόρφωση με χρήση σύγχρονης γεννήτριας είναι αυτή που εικονίζεται στο σχήμα 3.26 και στην οποία χρησιμοποιείται και ανορθωτής και αντιστροφέας με θυρίστορ.



Σχ. 3.26 Διο

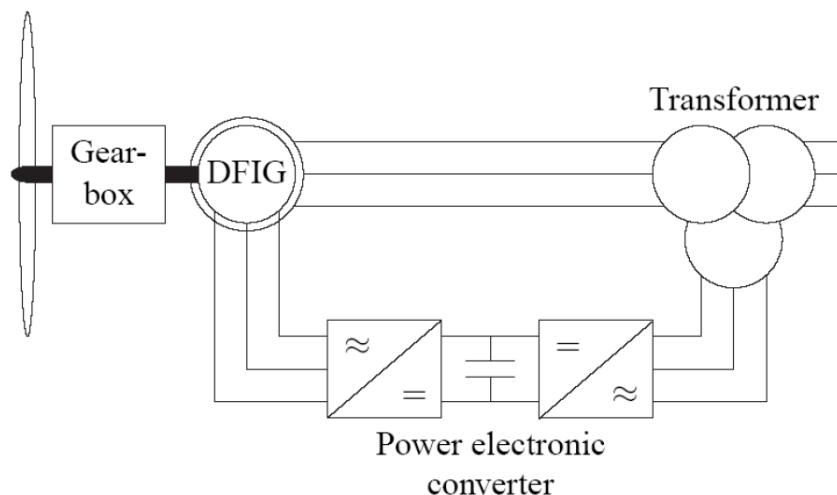
Αυτή η διάταξη επιτρέπει την αντιστροφή της ροής ισχύος για επιτάχυνση της ανεμογεννήτριας κατά την εκκίνηση. Το συνεχές ρεύμα ελέγχεται μέσω της γωνίας έναυσης των ηλεκτρονικών στοιχείων του αντιστροφέα. Με αυτόν τον τρόπο, όπως και στην περίπτωση της ασύγχρονης μηχανής, ρυθμίζεται η ροή ισχύος από την ανεμογεννήτρια στο δίκτυο, έτσι ώστε να μεταβάλλεται η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα κατά τον επιθυμητό τρόπο. Η συμπεριφορά αυτού του συστήματος από την πλευρά του δικτύου είναι εξίσου άσχημη με τις προηγούμενες περιπτώσεις λόγω των αρμονικών που εισάγει ο αντιστροφέας.

### 3.3.3 Ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας με DOIG

Η DOIG αποτελείται από μια επαγωγική γεννήτρια με δακτυλιοφόρο δρομέα η οποία συνδέεται με το δίκτυο και έναν ηλεκτρονικό μετατροπέα.

Ο όρος “doubly output” αναφέρεται στο γεγονός ότι η τάση στο στάτη εφαρμόζεται από το δίκτυο και η τάση στο δρομέα προκαλείται από το μετατροπέα ισχύος. Το σύστημα αυτό επιτρέπει λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας γύρω από ένα μεγάλο αλλά με συγκεκριμένα όρια εύρος. Ο μετατροπέας εξισορροπεί τη διαφορά ανάμεσα στη μηχανική και την ηλεκτρική συχνότητα δίνοντας ένα ρεύμα δρομέα με μεταβλητή συχνότητα. Τόσο στη διάρκεια κανονικής λειτουργίας όσο και σε σφάλματα η συμπεριφορά της γεννήτριας καθορίζεται από το μετατροπέα και τους ελεγκτές του.

Το σύστημα που φαίνεται στο σχήμα 3.27 αποτελείται από μια ανεμογεννήτρια με DOIG. Αυτό σημαίνει πως ο στάτης είναι απευθείας συνδεδεμένος με το δίκτυο ενώ τα τυλίγματα του δρομέα είναι συνδεδεμένα διαμέσου δακτυλιδιών ολίσθησης (slip rings) με έναν μετατροπέα. Το σύστημα αυτό έχει γίνει πολύ δημοφιλές τελευταία διότι εδώ ο μετατροπέας χειρίζεται μόνο ένα κλάσμα 20-30% της συνολικής ισχύος. Έτσι οι απώλειες στον ηλεκτρονικό μετατροπέα μπορούν να μειωθούν σε σχέση με ένα σύστημα του οποίου ο μετατροπέας έχει να χειριστεί τη συνολική ισχύ. Επίσης, το κόστος του μετατροπέα μειώνεται.



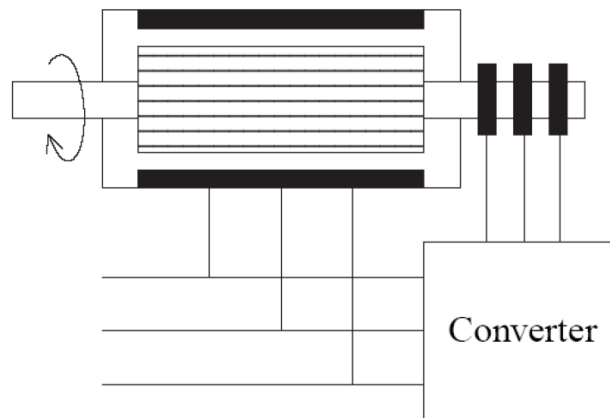
Σχ. 3.27 Σύστημα επαγωγικής ανεμογεννήτριας διπλής εξόδου

Η DOIG έχει αρκετά πλεονεκτήματα. Έχει την ικανότητα να ελέγχει την άεργο ισχύ και να αποσυνδέει τον έλεγχο της ενεργού και της άεργου ισχύος με ανεξάρτητο έλεγχο του



ρεύματος δρομέα . Η DOIG δεν είναι απαραίτητο να μαγνητιστεί από ο δίκτυο ισχύος, μπορεί να μαγνητιστεί από το κύκλωμα του δρομέα επίσης. Είναι επίσης δυνατό να παραχθεί άεργος ισχύς η οποία μπορεί να μοιραστεί στο στάτη από τον “grid side” μετατροπέα. Εντούτοις, ο “grid side” μετατροπέας κανονικά λειτουργεί σε μοναδιαίο συντελεστή ισχύος και δεν περιλαμβάνεται στην άεργο ισχύ που ανταλλάσσεται 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.

Υπάρχει μια ποικιλία DOIG μεθόδων που χρησιμοποιεί ελεγχόμενες εξωτερικές αντιστάσεις δρομέα. Μερικά μειονεκτήματα της μεθόδου , είναι πως απελευθερώνεται ενέργεια χωρίς λόγο στις αντιστάσεις δρομέα και πως δεν είναι δυνατό να ελεγχθεί η άεργος ισχύς. Για συστήματα μεταβλητής ταχύτητας με περιορισμένο εύρος ταχυτήτων, π.χ. +/-30% της σύγχρονης ταχύτητας, το DOIG μπορεί να είναι μια ενδιαφέρουσα λύση, εξαιτίας των παραπάνω λόγων. Στο σχήμα 3.28 φαίνεται η σύνδεση του DOIG και συγκεκριμένα η σύνδεση του κυκλώματος του στάτη με το δίκτυο και η σύνδεση του κυκλώματος του δρομέα με το μετατροπέα διαμέσου δαχτυλιδιών ολίσθησης.



Σχ. 3.28 Αρχή συνδεσμολογίας ΕΓΔΕ

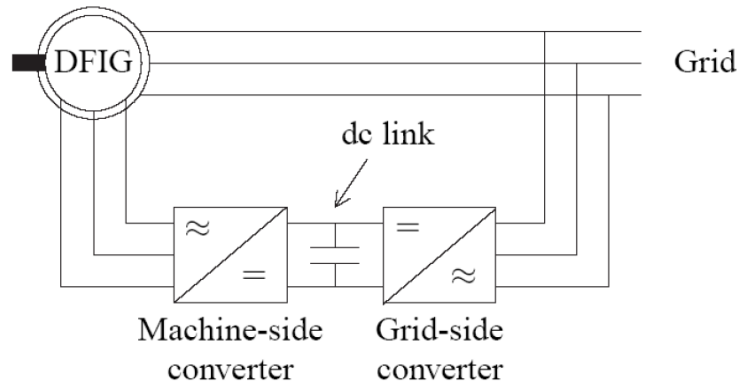
Μια πιο λεπτομερής εικόνα του DOIG συστήματος με έναν “back-to-back” μετατροπέα παρουσιάζεται στο σχήμα 3.29. Ο “back – to back” μετατροπέας αποτελείται από δυο μετατροπείς, έναν μετατροπέα στην πλευρά της μηχανής (machine side) και έναν μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου (grid side) , οι οποίοι συνδέονται «πλάτη με πλάτη» (back-to-back). Ανάμεσα στους δυο μετατροπείς τοποθετείται ένας d.c. πυκνωτής ως αποθηκευτικός χώρος ενέργειας , με στόχο να κρατηθούν οι μεταβολές τάσης στη d.c. σύνδεση σε χαμηλά επίπεδα.

Με τον “machine side” μετατροπέα γίνεται δυνατός ο έλεγχος της ροπής ή της ταχύτητας του DOIG και επίσης ο παράγοντας ισχύος στα άκρα του στάτη. Δηλαδή πετυχαίνουμε έλεγχο της ενεργού και της άεργου ισχύος. Το κύριο αντικείμενο του “grid side” μετατροπέα είναι να διατηρεί την τάση της d.c. σύνδεσης σταθερή και να εξασφαλίζει λειτουργία μετατροπέα σε μοναδιαίο συντελεστή ισχύος (δηλαδή μηδενική άεργο ισχύ).

Με βάση τις συνθήκες λειτουργίας, ισχύς ρέει μέσα ή έξω από το δρομέα. Σε μια υπερσύγχρονη κατάσταση , η ισχύς ρέει από το δρομέα διαμέσου του μετατροπέα προς το δίκτυο, ενώ σε μια υπο-σύγχρονη κατάσταση έχουμε ροή προς την αντίθετη κατεύθυνση.

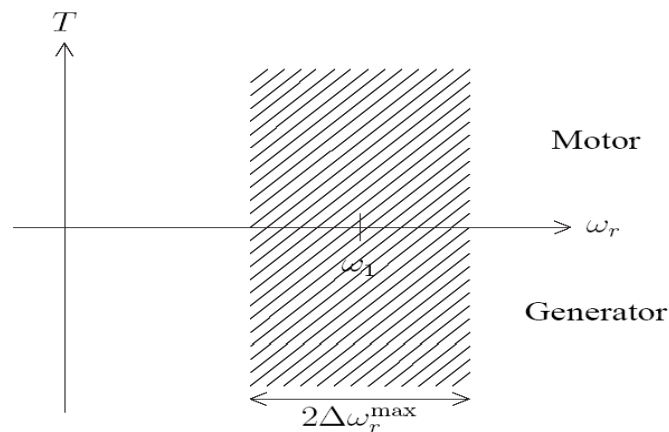


Και στις δυο περιπτώσεις ο στάτης τροφοδοτεί με ενέργεια το δίκτυο.



Σχ. 3.29 ΕΓΔΕ με σύστημα back to back μετατροπέα.

Η χαρακτηριστική ταχύτητας –ροπής του DOIG συστήματος φαίνεται στο σχήμα 3.30. Όπως επίσης φαίνεται στο σχήμα, το DOIG μπορεί να λειτουργήσει τόσο σαν κινητήρας όσο και σα γεννήτρια με ένα εύρος ταχύτητας δρομέα του  $\pm \Delta\omega_r(\max)$  γύρω από τη σύγχρονη ταχύτητα  $\omega_1$ .



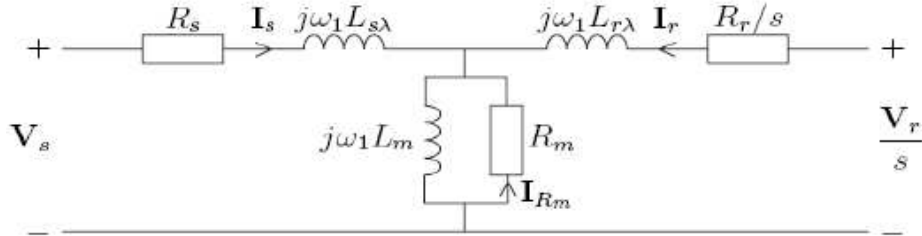
Σχ. 3.30 Χαρακτηριστική ταχύτητας-ροπής ΕΓΔΕ

Το μέγεθος του μετατροπέα δε σχετίζεται με τη συνολική ισχύ της γεννήτριας αλλά με το επιλεγμένο εύρος ταχυτήτων και συνεπώς με την ισχύ ολίσθησης. Το κόστος του μετατροπέα αυξάνει όταν το εύρος ταχύτητας γύρω από τη σύγχρονη ταχύτητα γίνεται πλατύτερο. Συνεπώς, η επιλογή του εύρους ταχύτητας βασίζεται σε οικονομικά κριτήρια και στην αυξημένη αποτελεσματικότητα. Ένα μειονέκτημα του DOIG είναι η αναπόφευκτη ανάγκη δαχτυλιδιών ολίσθησης.

### 3.3.4 Ισοδύναμο κύκλωμα DOIG

Στο σχήμα 3.31 φαίνεται του ισοδύναμου κύκλωμα της γεννήτριας, λαμβάνοντας υπ όψιν τις απώλειες μαγνήτισης. Το παρακάτω ισοδύναμο κύκλωμα ισχύει για μια ισοδύναμη φάση σε τρίγωνο αλλά και αστέρα και για υπολογισμούς στη μόνιμη κατάσταση. Στο

σημείο αυτό να πούμε ότι αν η τάση  $V_r$  του δρομέα, βραχυκυκλωθεί, το ισοδύναμο κύκλωμα μετατρέπεται στο τυπικό ισοδύναμο κύκλωμα για μια μηχανή επαγωγής βραχυκυκλωμένου δρομέα όπως το ξέρουμε.



Σχ. 3.31 Ισοδύναμο κύκλωμα DOIG

Εφαρμόζοντας τους νόμους του Kirchhoff στο κύκλωμα προκύπτει :

$$V_s = R_s I_s + j\omega_e L_{ls} I_s + j\omega_e L_m (I_s + I_r + I_{Rm}) \quad (3.28)$$

$$\frac{V_s}{s} = \frac{R_r}{s} I_r + j\omega_e L_{lr} I_r + j\omega_e L_m (I_s + I_r + I_{Rm}) \quad (3.29)$$

$$-R_m I_{Rm} = j\omega_e L_m (I_s + I_r + I_{Rm}) \quad (3.30)$$

Μπορεί να οριστεί η ροή διακένου, στάτη και δρομέα :

$$\lambda_m = L_m (I_s + I_r + I_{Rm}) \quad (3.31)$$

$$\lambda_s = L_{ls} I_s + L_m (I_s + I_r + I_{Rm}) = \lambda_m + L_{ls} I_s \quad (3.32)$$

$$\lambda_r = L_{lr} I_r + L_m (I_s + I_r + I_{Rm}) = \lambda_s + L_{ls} I_r \quad (3.33)$$

Από τις (3.28, 3.29, 3.30) και (3.31, 3.32, 3.33) οι εξισώσεις που περιγράφουν το ισοδύναμο κύκλωμα του DOIG γίνονται :

$$V_s = R_s I_s + j\omega_e \lambda_s \quad (3.34)$$

$$\frac{V_s}{s} = \frac{R_r}{s} I_r + j\omega_e \lambda_r \quad (3.35)$$

$$-R_m I_{Rm} = j\omega_e \lambda_m \quad (3.36)$$

Επίσης οι ωμικές απώλειες της DOIG είναι :

$$P_R = 3(R_s |I_s|^2 + R_r |I_r|^2 + R_m |I_{Rm}|^2) \quad (3.37)$$

Αν θέσουμε P τον αριθμό των ζευγών των πόλων της DOIG και  $\omega_m = \frac{\omega_r}{p}$  η μηχανική ταχύτητα του δρομέα, υπολογίζουμε την ηλεκτρομαγνητική της ροπή :

$$T_e = 3P \operatorname{Im}[\lambda_m I_r^*] = 3P \operatorname{Im}[\lambda_r I_r^*] \quad (3.38)$$

### 3.3.5 Ροή ισχύος

Για να μπορέσουμε να κατανοήσουμε τη ροή ισχύος σ' ένα σύστημα DOIG, δηλαδή τη φαινόμενη ισχύ που παράγεται στη DOIG μέσω του στάτη και του δρομέα. Θα

υπολογιστούν οι ισχύς  $S_s$  του στάτη και  $S_r$  του δρομέα (οι παραδοχές γίνονται αμελώντας τις απώλειες μαγνήτισης και αυτές των αντιστάσεων) :

$$S_s = 3V_s I_s^* = 3R_s |I_s|^2 + j3\omega_e L_{ls} |I_s|^2 + j3\omega_e \lambda_m I_s^* \quad (3.39)$$

$$S_r = 3V_r I_r^* = 3R_r |I_r|^2 + j3\omega_e L_{lr} |I_r|^2 + j3\omega_e \lambda_m I_r^* \quad (3.40)$$

Και η ενεργός ισχύ του δρομέα και στάτη προκύπτουν :

$$P_s = \text{Re} [S_s] = 3R_s |I_s|^2 + 3R_m |I_{Rm}|^2 + 3\omega_e \text{Im}[\lambda_m I_r^*] \approx 3\omega_e \text{Im}[\lambda_m I_r^*] \quad (3.41)$$

$$P_r = \text{Re} [S_r] = 3R_r |I_r|^2 - 3\omega_e \text{Im}[\lambda_m I_r^*] \approx -3\omega_e \text{Im}[\lambda_m I_r^*] \quad (3.42)$$

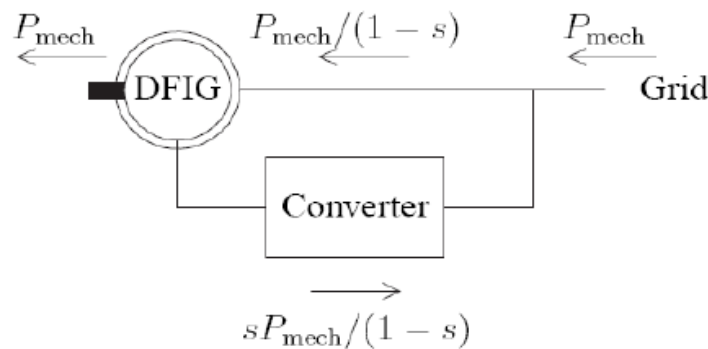
Από τις εξισώσεις 3.39 – 3.42 προκύπτει ότι η μηχανική ισχύ που παράγεται από την DOIG ορίζεται ως άθροισμα της ισχύος του στάτη και του δρομέα :

$$P_{mech} = P_s + P_r \Rightarrow P_{mech} = 3 \text{Im}[\lambda_m I_r^*] \omega_r \quad (3.43)$$

$$\text{και } P_s \approx \frac{P_{mech}}{1-s} \quad (3.44),$$

$$P_r \approx -s \frac{P_{mech}}{1-s} \quad (3.45)$$

Στο παρακάτω 3.32 σχήμα φαίνεται η ροή ισχύος ενός συστήματος DOIG χωρίς απώλειες. Επίσης, στο σχήμα μπορεί να φανεί πως η μηχανική η ισχύς διατηρείται μεταξύ των κυκλωμάτων του στάτη και του δρομέα και ότι εξαρτάται από την ολίσθηση. Έτσι η ισχύς του δρομέα είναι περίπου ίση με το αντίθετό της ισχύος του στάτη πολλαπλασιασμένη με την ολίσθηση όλη στάση, δηλαδή  $P_r \approx -sP_s$ . Ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας, η ισχύς τροφοδοτεί η τροφοδοτείται από τον τομέα : ρέει από το δίκτυο μέσω του μετατροπέα στον δρομέα ( $P_r < 0$ ) στην υποσύγχρονη κατάσταση ή αντίστροφα στην υπερσύγχρονη κατάσταση ( $P_r > 0$ ), όπως φαίνεται και στοίχημα. Και στις δύο περιπτώσεις ο στάτης τροφοδοτεί ενέργεια το δίκτυο ( $P_s > 0$ ).



Σχ. 3.32 Διάγραμμα της ροής ισχύος σε ΕΓΔΕ

### 3.3.6 Έλεγχος μεταβολής της κλίσης των πτερυγίων (Pitch Control)

Οι ανεμογεννήτριες είναι σχεδιασμένες ώστε να παράγουν ενέργεια όσο το δυνατόν φτηνότερα. Για αυτό γενικά σχεδιάζονται έτσι ώστε να παράγουν μέγιστη ισχύ σε ταχύτητες ανέμου της τάξης των 15 m/s. Δεν αποδίδει να σχεδιάζονται ώστε να μεγιστοποιούν την έξοδό τους σε μεγαλύτερους ανέμους, γιατί τόσο ισχυροί άνεμοι είναι σπάνιοι. Σε περίπτωση ισχυρότερων ανέμων είναι απαραίτητο να 'σπαταλάτε' μέρος της επιπλέον ενέργειας του ανέμου προκειμένου να προφυλαχθεί ο εξοπλισμός της

ανεμογεννήτριας.

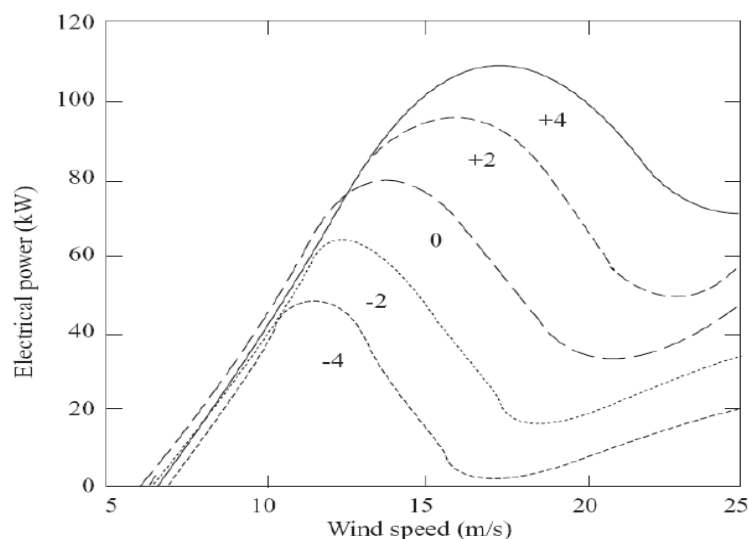
Το pitch control είναι ο πιο συνηθισμένος τρόπος ελέγχου της αεροδυναμικής ισχύος που παράγεται από το δρομέα της ανεμογεννήτριας. Επίσης έχει σημαντική επίδραση σε όλα τα αεροδυναμικά φορτία που παράγονται από το δρομέα .

Σε ανεμογεννήτριες που εφαρμόζεται τέτοιου είδους έλεγχος, δηλαδή στις ανεμογεννήτριες με ελεγχόμενο βήμα έλικα , ο ηλεκτρονικός ελεγκτής ελέγχει την έξοδό τους αρκετές φορές το δευτερόλεπτο. Όταν η έξοδος γίνει αρκετά μεγάλη, στέλνει εντολή στο μηχανισμό περιστροφής του πτερυγίου ο οποίος αμέσως στρέφει τα πτερύγια προς τον αέρα. Γι' αυτό τα πτερύγια πρέπει να είναι σε θέση να περιστρέφονται κατά μήκος του άξονά τους.

Κατά τη διάρκεια κανονικής λειτουργίας τα πτερύγια θα στρέφονται με μια γωνία μιας μοίρας τη φορά, ενώ ταυτόχρονα θα στρέφεται και ο δρομέας. Ο σχεδιασμός τέτοιου είδους ανεμογεννητριών απαιτεί έξυπνη μηχανική ώστε τα πτερύγια να στρέφονται ακριβώς την απαιτούμενη γωνία. Ο έλεγχος αυτός κάθε φορά που αλλάζει διεύθυνση ο αέρας στρέφει τα πτερύγια μερικές μοίρες ώστε να διατηρεί τη γωνία πρόσπτωσης ιδανική για να μεγιστοποιεί την έξοδο.

Μια παράμετρος που επηρεάζει την έξοδο ισχύος είναι η γωνία της μεταβολής της κλίσης των πτερυγίων (pitch angle)  $\beta_s$  . Ο σχεδιασμός των πτερυγίων σχεδόν πάντοτε είναι σπειροειδής, αλλά τα πτερύγια μπορούν να τοποθετηθούν σε πλήρη pitch γωνία . Τα αποτελέσματα από αρκετές pitch γωνίες φαίνονται στο σχήμα 3.33.

Μικρές μεταβολές στην pitch γωνία μπορεί να έχουν δραματικές επιπτώσεις στην έξοδο ισχύος. Θετική ρύθμιση της pitch γωνίας αυξάνει την pitch γωνία σχεδιασμού και έτσι ελαττώνει τη γωνία επίπτωσης . Αντίθετα , αρνητική ρύθμιση της pitch γωνίας αυξάνει τη γωνία επίπτωσης και μπορεί να προκαλέσει καθυστέρηση όπως φαίνεται στο σχήμα 3.33. Ο δρομέας μιας ανεμογεννήτριας που έχει σχεδιαστεί για λειτουργία σε δεδομένες συνθήκες ανέμου, μπορεί να γίνει κατάλληλος για άλλες συνθήκες με κατάλληλες προσαρμογές στην pitch γωνία και στην ταχύτητα περιστροφής.



**Σχ. 3.33** Επίδραση της ρύθμισης της γωνίας μεταβολής της κλίσης των πτερυγίων στην παραγόμενη ισχύ

## Η ρύθμιση ισχύος μπορεί να επιτευχθεί με δυο τρόπους :

(α) Παθητική επιβράδυνση (“pitching to feather” ή “passive stall”) :

Οι ανεμογεννήτριες στις οποίες εφαρμόζεται αυτός ο έλεγχος έχουν τα πτερύγιά τους ενσωματωμένα στην κεφαλή του ρότορα σε σταθερή γωνία. Το γεωμετρικό προφίλ όμως των πτερυγίων, είναι αεροδυναμικά σχεδιασμένο ώστε να διασφαλίσει ότι τη στιγμή που η ταχύτητα του ανέμου γίνει αρκετά υψηλή, να δημιουργεί αναταραχές στην πλευρά του πτερυγίου που δεν ‘βλέπει’ τον αέρα, γεγονός που οδηγεί σε επιβράδυνση των πτερυγίων. Αυτή η επιβράδυνση προλαμβάνει την άσκηση ανεπιθύμητων δυνάμεων των πτερυγίων στον ρότορα. Στις 90° θετικής κλίσης το πτερύγιο είναι «φτερό» (“feathered”). Μια αύξηση στην “pitch angle”, που ορίζεται ως στροφή της κύριας λεπίδας στον άνεμο, έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία κλίσης στο «φτερό» (“feather”), μείωση της γωνίας πρόσπτωσης, μείωση της ροπής, άρα μείωση της δύναμης ανύψωσης στα πτερύγια.

(β) “pitching to stall” ή “active stall” (ενεργός επιβράδυνση) :

Προκειμένου να επιτύχουν μια αρκετά μεγάλη ροπή (περιστροφική δύναμη) σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, οι μηχανές συχνά θα προγραμματίζονται να περιστρέφουν τα πτερύγιά τους όπως μια ανεμογεννήτρια με ελεγχόμενο βήμα έλικα σε χαμηλές ταχύτητες. Αν όμως η μηχανή τείνει να υπερφορτωθεί, η μηχανή με ελεγχόμενη ενεργητική καθυστέρηση θα στρέψει τα πτερύγιά της σε αντίστροφη διεύθυνση από ότι μια μηχανή με ελεγχόμενο βήμα έλικα. Με άλλα λόγια, θα αυξήσει τη γωνία πρόσπτωσης του ανέμου στα πτερύγια προκειμένου τα πτερύγια να επιβραδυνθούν, κατ’ αυτόν τον τρόπο σπαταλά την επιπλέον ενέργεια του ανέμου.

Συνεπώς, μια μείωση στο “pitch”, π.χ. γυρίζοντας την κύρια λεπίδα κόντρα στον άνεμο, ελαττώνει τη ροπή μέσω της αύξησης της γωνίας πρόσπτωσης προσεγγίζοντας την επιβράδυνση, όπου ξεκινάει να ελαττώνεται η ανύψωση και το σύρσιμο αυξάνεται.

Παρόλο που το “pitching to feather” είναι πιο συνηθισμένη μέθοδος, κάποιες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν “pitching to stall”. Το “pitching to feather” απαιτεί πολύ περισσότερη δυναμική δραστηριότητα μεταβολής της κλίσης από το “pitching to stall” : ενώ ένα μεγάλο μέρος των πτερυγίων επιβραδύνεται, πολύ μικρές κινήσεις μεταβολής της κλίσης επαρκούν για να ελεγχθεί η ροπή. Το “pitching to stall” επιφέρει μια σημαντικά μεγαλύτερη ώθηση φορτίου εξαιτίας του αυξανόμενου συρσίματος . Από την άλλη , η ώθηση είναι πολύ πιο σταθερή όταν τα πτερύγια επιβραδύνονται , συνεπώς τα καταχρηστικά φορτία της ώθησης θα είναι μικρότερα.

Ένα επιπλέον πρόβλημα με το “pitching to stall” είναι ότι η κλίση της καμπύλης ανύψωσης στην αρχή της περιοχής επιβράδυνσης είναι αρνητική , έτσι ο συντελεστής ανύψωσης μειώνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης . Αυτό επιδρά στην αρνητική αεροδυναμική απόσβεση, που μπορεί να επιδράσει στην αστάθεια των στρεφόμενων πτερυγίων. Αυτό είναι επίσης πρόβλημα για τις ανεμογεννήτριες που ελέγχεται η επιβράδυνσή τους με ρυθμισμένο “pitch”.

Χαμηλότερα από τη ρύθμιση της ταχύτητας του ανέμου, η ανεμογεννήτρια απλά θα προσπαθεί να παράγει όση περισσότερη ισχύ είναι δυνατό , συνεπώς γενικά δεν υπάρχει ανάγκη να μεταβάλλεται η γωνία μεταβολής κλίσης. Τα αεροδυναμικά φορτία, χαμηλότερα από τη ρύθμιση της ταχύτητας του ανέμου, είναι γενικά χαμηλότερα σε σχέση με πριν τη ρύθμιση, οπότε πάλι δεν υπάρχει λόγος να χρησιμοποιηθεί το “pitch control”. Εντούτοις, για ρυθμισμένης ταχύτητας ανεμογεννήτριες, η επιθυμητή γωνία κλίσης για αεροδυναμική

αποδοτικότητα ποικίλλει ελαφρά με την ταχύτητα του ανέμου. Συνεπώς, σε μερικές ανεμογεννήτριες, η γωνία μεταβολής της κλίσης μεταβάλλεται αργά κάποιες μοίρες κάτω από τη ρυθμισμένη, σαν απάντηση σε «βαρύ» ανεμόμετρο ή σήμα εξόδου ισχύος.

Πάνω από τη ρυθμισμένη ταχύτητα του ανέμου, το “pitch control” προμηθεύει ένα πολύ αποτελεσματικό μέσο ρύθμισης της αεροδυναμικής ισχύος και των φορτίων που παράγονται από το δρομέα, έτσι που δεν υπάρχουν όρια στο σχεδιασμό. Για να πετύχουμε καλή ρύθμιση, το “pitch control” πρέπει να αποκρίνεται πολύ γρήγορα στις μεταβαλλόμενες συνθήκες. Αυτή η εφαρμογή υψηλού ενεργού ελέγχου απαιτεί πολύ προσεκτικό σχεδιασμό καθώς έχει ισχυρή αλληλεπίδραση με τη δυναμική απόκριση της ανεμογεννήτριας.

Μια από τις πιο ισχυρές αλληλεπιδράσεις είναι με τη δυναμική συμπεριφορά του πύργου.

Καθώς μεταβάλλεται η κλίση των πτερυγίων για τη ρύθμιση της αεροδυναμικής ροπής, η αεροδυναμική ώθηση στο δρομέα μεταβάλλεται σημαντικά, και αυτό τροφοδοτεί παλμό στον πύργο. Καθώς ο άνεμος αυξάνει, η γωνία μεταβολής της κλίσης αυξάνει για να διατηρήσει σταθερή τη ροπή, αλλά ο δρομέας τείνει να τη μειώσει. Αυτό επιτρέπει στην απόκλιση του πύργου που είναι κόντρα στον άνεμο να μειωθεί και καθώς η κορυφή του πύργου μετακινείται ευνοϊκά στον άνεμο η σχετική ταχύτητα του ανέμου που φαίνεται από το δρομέα αυξάνεται. Η αεροδυναμική ροπή αυξάνεται περισσότερο, προκαλώντας περισσότερη μεταβολή στην κλίση των πτερυγίων. Αν το κέρδος του “pitch controller” είναι τόσο υψηλό, αυτή η θετική ανάδραση μπορεί να προκαλέσει αστάθεια. Έτσι είναι καθοριστικό να λάβουμε υπόψη τη δυναμική συμπεριφορά του πύργου κατά το σχεδιασμό ενός “pitch controller”.

Οι περισσότερες από τις ανεμογεννήτριες που ελέγχονται με “pitch control” χρησιμοποιούν “pitch control” πλήρους ανοίγματος, στο οποίο ο προσανατολισμός του “pitch” είναι προς το κέντρο. Είναι επίσης δυνατό, αν και όχι συνηθισμένο, να πετύχουμε αεροδυναμικό έλεγχο κάνοντας “pitching” μόνο στα άκρα των πτερυγίων, ή με χρήση “ailerons”, “flaps”, “airjets” ή άλλες συσκευές που να τροποποιούν τις αεροδυναμικές ιδιότητες. Αυτές οι μέθοδοι έχουν ως αποτέλεσμα τα περισσότερα από τα πτερύγια να επιβραδύνονται σε υψηλούς ανέμους. Αν μόνο στα άκρα των πτερυγίων γίνεται “pitch”, μπορεί να είναι δύσκολο να ταιριάζει ένας κατάλληλος ωθητής στο εξωτερικό τμήμα του πτερυγίου, η επίτευξη της συντήρησης είναι επίσης δύσκολη.

## 4<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

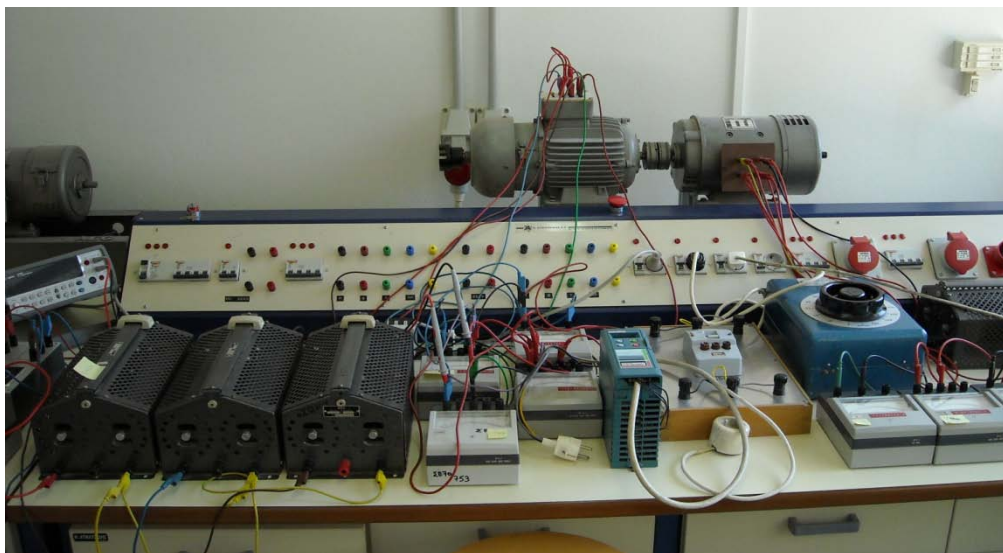
### 4.1 Πειραματική διερεύνηση συμπεριφοράς της επαγωγικής γεννήτριας διπλής τροφοδότησης

#### Σκοπός

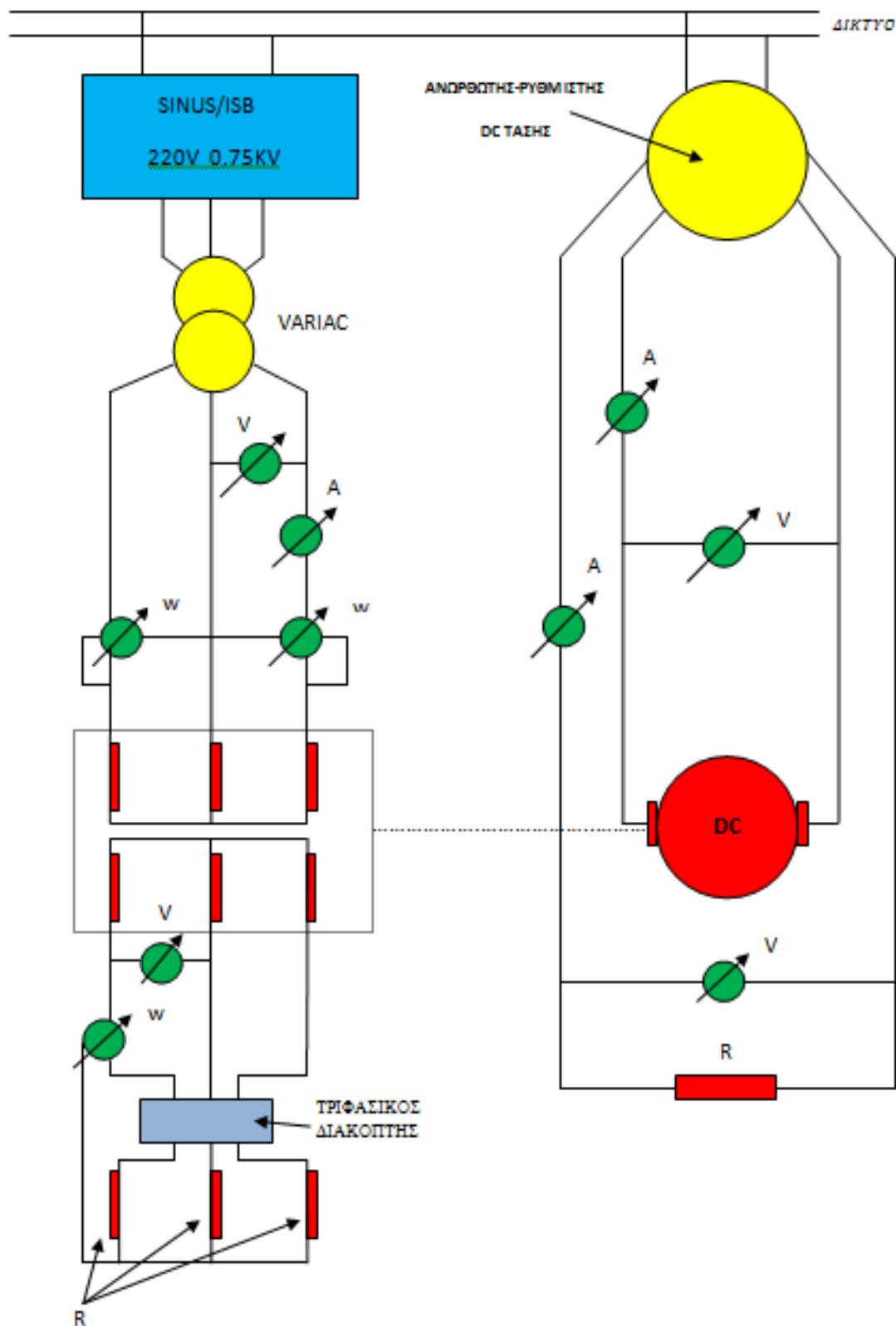
Θέμα της πειραματικής διερεύνησης είναι η μελέτη της συμπεριφοράς ενός συστήματος ελέγχου της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης της οποίας το τύλιγμα του δρομέα τροφοδοτείται από ένα ελεγχόμενο αντιστροφέα. Χρησιμοποιείται η τεχνική της ρύθμισης της τάσης και της συχνότητας διέγερσης του δρομέα μέσω ηλεκτρονικών κυκλωμάτων ελέγχου.

Για τη διεξαγωγή της συγκεκριμένης εργασίας πραγματοποιήθηκε η συνδεσμολογία του σχήματος 4.2, στο οποίο διακρίνεται να κυριαρχεί το συνδεδεμένο ζεύγος κινητήρα- γεννήτριας με τα όργανα μέτρησης (αμπερόμετρα, βολτόμετρα και βατόμετρα). Η επαγωγική γεννήτρια διπλής εξόδου κινείται από τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος, προς τη φορά του μαγνητικού πεδίου, και τροφοδοτείται το τύλιγμα δρομέα της, από το μονοφασικό δίκτυο χαμηλής τάσης του εργαστηρίου συστημάτων ηλεκτρικών μηχανών, μέσω του αντιστροφέα SINUS ο οποίος ελέγχει τη συχνότητα και εύρος της τάσης αφού την μετατρέψει από μονοφασική σε τριφασική. Επίσης διακρίνεται το τριφασικό φορτίο το οποίο τροφοδοτεί η DOIG, είναι ωμικό από 135 Ω σε κάθε φάση.

Παρακάτω στο σχήμα 4.1 φαίνεται η φυσική υλοποίηση του κυκλώματος, καθώς και περιγραφή για τα συνθετικά συστατικά της διατάξεως.



**Σχήμα 4.1** Εικόνα του εργαστηριακού εξοπλισμού με τα καταγραφικά όργανα να διακρίνονται σε πρώτο πλάνο και στο βάθος το ζευγάρι των δυο μηχανών

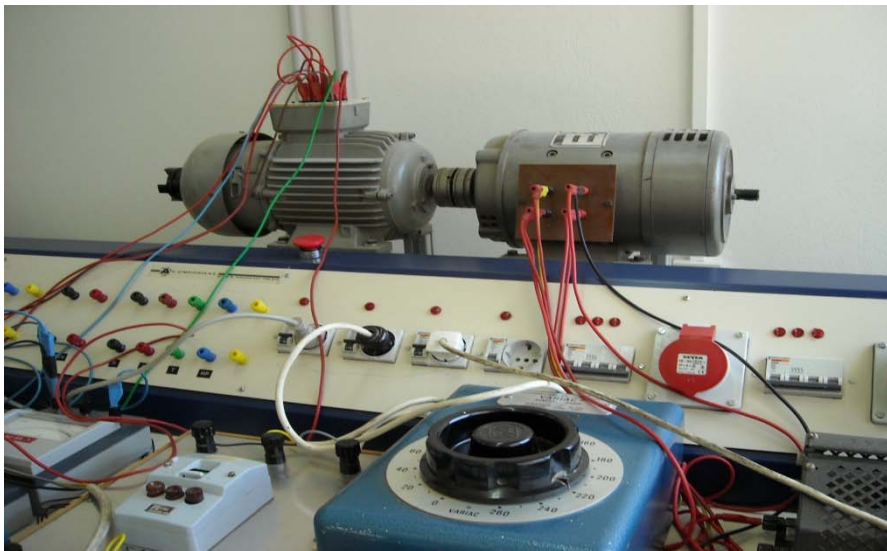


Σχ. 4.1 Παραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε



Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν :

- Κινητήρας συνεχούς ρεύματος του οίκου AEG ξένης διέγερσης, ονομαστικών μεγεθών: 230 V, 2,2 A, 0,5K W, 1500 rpm (σχήμα 4.3)
- Γεννήτρια επαγωγής με τυλιγμένο δρομέα του οίκου SIEMENS, ονομαστικών μεγεθών : 380 V, 4,5 A, 1 KV, 1400 rpm (σχήμα 4.3)
- Ανορθωτής εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή και ρυθμιστής τάσης συνεχούς ρεύματος, ο οποίος τροφοδοτεί τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος
- Variac αυτομετασχηματιστής : 50 Hz, input 230 V, output 0-275 V
- Αντιστροφέας SINUS/ISB το οποίο είναι συσκευή ψηφιακού ελέγχου, το οποίο χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση τάσης-συχνότητας. Περιλαμβάνει πληκτρολόγιο προγραμματισμού και ελέγχου και είναι εφοδιασμένο με προστασίες έναντι της υπερφόρτισης, της υπέρτασης και των βραχυκυκλωμάτων μεταξύ φάσης-γης, χάρη στη χρήση διαμορφωτών ρεύματος IGBT. Τα χαρακτηριστικά του αντιστροφέα είναι SINUS/ISB ο οποίος φαίνεται στο σχήμα 4.4 είναι : 230 V, 0,75 KW, max current at 40°C, 3 A.
- Βολτόμετρα εναλλασσόμενου (σχήμα 4.5) ρεύματος του οίκου SIEMENS με χαρακτηριστικά : αναλογικού τύπου που παρουσιάζει μέγιστο σφάλμα 0,5%, όργανο το οποίο έχει δυνατότητα μέτρησης εναλλασσόμενου είτε συνεχούς τάσης.
- Αμπερόμετρα εναλλασσόμενου ρεύματος (σχήμα 4.5) του οίκου SIEMENS με χαρακτηριστικά : αναλογικού τύπου που παρουσιάζει μέγιστο σφάλμα 0,5%, όργανο το οποίο έχει δυνατότητα μέτρησης εναλλασσόμενου είτε συνεχούς ρεύματος.
- Βατόμετρα εναλλασσόμενου ρεύματος (σχήμα 4.5) του οίκου SIEMENS με χαρακτηριστικά : αναλογικού τύπου που παρουσιάζει μέγιστο σφάλμα 0,5%, όργανο το οποίο έχει δυνατότητα μέτρησης ισχύος που παράγεται από εναλλασσόμενα είτε συνεχή μεγέθη.



**Σχήμα 4.3** Εικονίζεται το ζεύγος κινητήρα-γεννήτριας, αριστερά η επαγωγική γεννήτρια διπλής εξόδου Siemens και αριστερά ο dc κινητήρας AEG



Σχήμα 4.4 Εικόνα του Inverter SINUS/ISB



Σχήμα 4.5 Όργανα καταγραφής των ηλεκτρικών μεγεθών

## 4.2 Διεξαγωγή της άσκησης

Η διεξαγωγή της άσκησης χωρίζεται σε δύο μέρη.

- Το μέρος (α) περιλαμβάνει την μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος ελέγχου της τάσης και της συχνότητας εξόδου της επαγωγικής γεννήτριας διπλής τροφοδότησης – της οποίας το τύλιγμα του δρομέα συνδέεται σε ελεγχόμενο αντιστροφέα – εν κενό.
- Το μέρος (β) περιλαμβάνει την μελέτη του συστήματος υπό φορτίο.

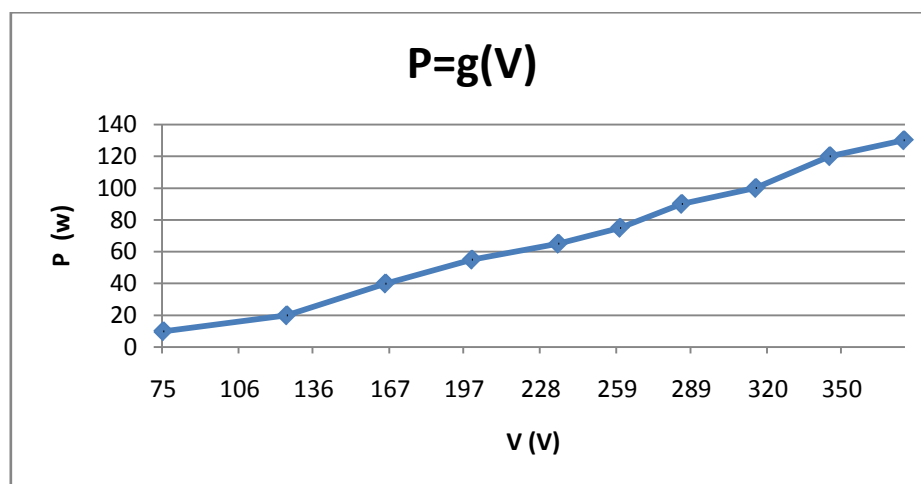
### 4.2.1 Διεξαγωγή μετρήσεων με την DOIG χρησιμοποιούμενη ως κινητήρας

Προτού ξεκινήσει η διεξαγωγή του κυρίως πειράματος έγιναν κάποιες μετρήσεις πάνω στην επαγωγική μηχανή. Η οποία συνδεσμολογήθηκε ως κινητήρας και λάβαμε τις μετρήσεις οι οποίες και παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1.

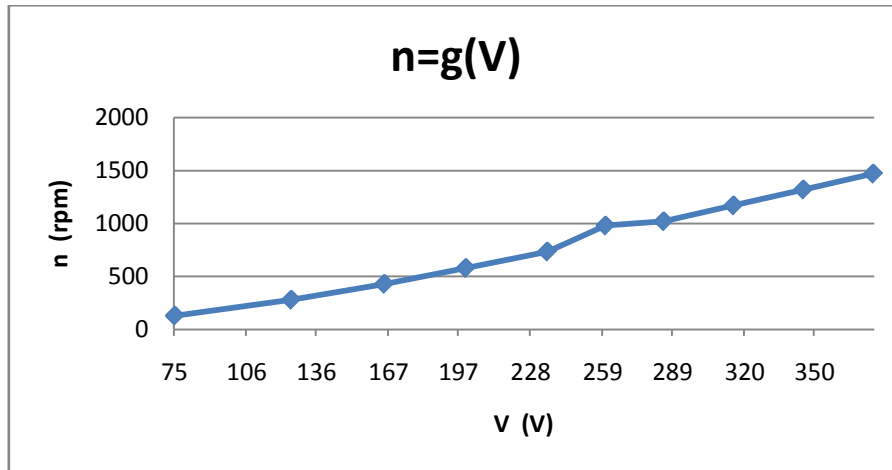
Με βάση τις τιμές αυτές δημιουργήθηκαν και οι γραφικές παραστάσεις : της ισχύος εξόδου συναρτήσει της τάσης εξόδου γράφημα 4.1, ο αριθμός των στροφών περιστροφής της μηχανής σε σχέση με την τάση εξόδου στο γράφημα 4.2, της ισχύος εξόδου σε σχέση με την συχνότητα εξόδου του στάτη γράφημα 4.3, ο αριθμός των στροφών περιστροφής της μηχανής σε σχέση με τη συχνότητα εξόδου του στάτη στο γράφημα 4.4.

**Πίνακας 4.1** Μετρήσεις της AC μηχανής χρησιμοποιούμενη ως κινητήρας

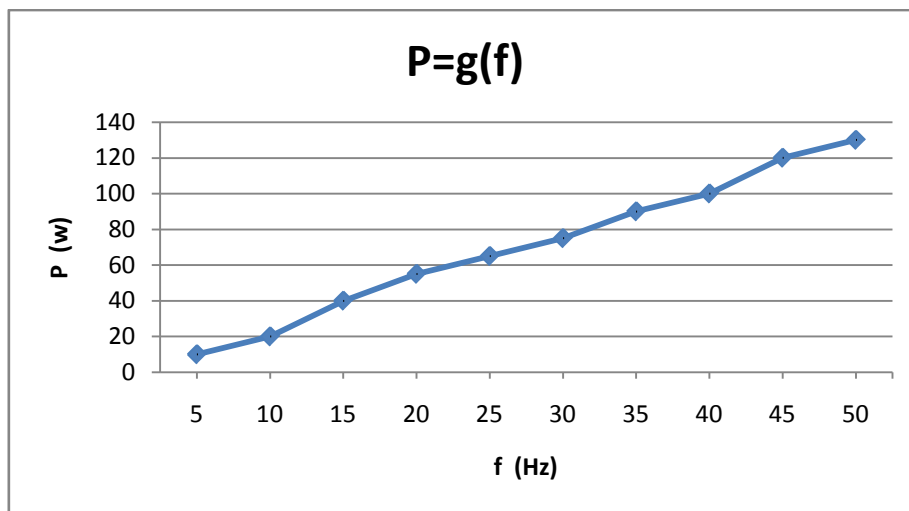
f(Hz)	V(v)	I(A)	P(w)	n(RPM)	V/f
5	75	2,35	10	130	15
10	125	1,85	20	280	12,5
15	165	1,6	40	430	11
20	200	1,45	55	580	10
25	235	1,35	65	735	9,4
30	260	1,3	75	980	8,67
35	285	1,25	90	1020	8,14
40	315	1,22	100	1170	7,87
45	345	1,18	120	1320	7,67
50	375	1,15	130	1470	7,5



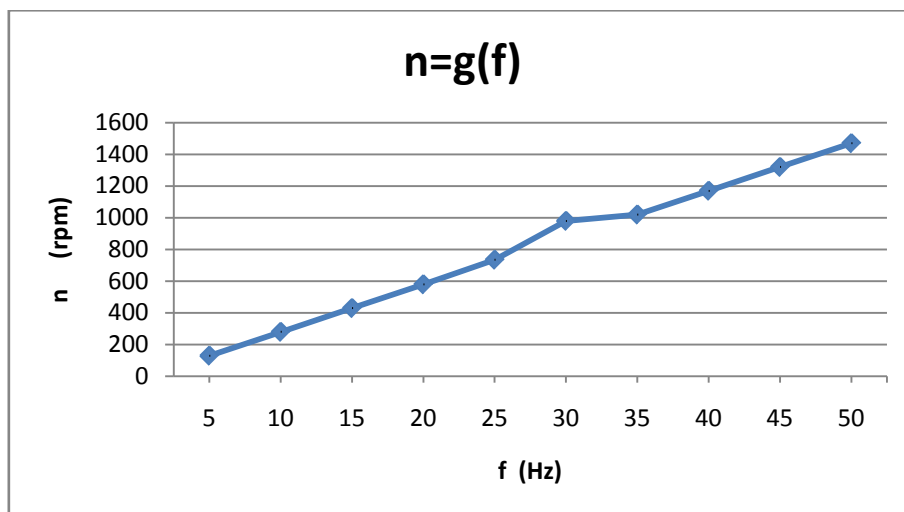
**Γραφική 4.1** Ισχύς εξόδου σε σχέση με τη τάση εξόδου



**Γραφική 4.2** Ταχύτητα περιστροφής σε σχέση με τη τάση εξόδου



**Γραφική 4.3** Ισχύς εξόδου συναρτήσει της συχνότητας



**Γραφική 4.4** Ταχύτητα περιστροφή σε συναρτήσει της συχνότητας

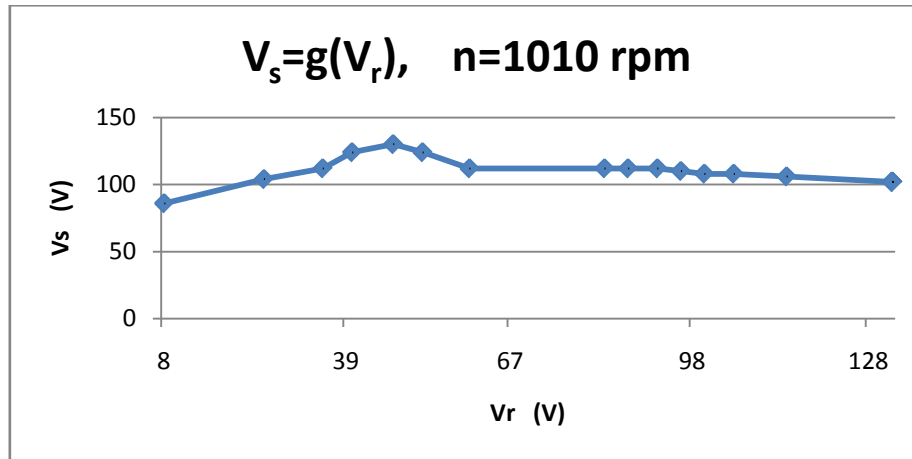
#### 4.2.2 Μετρήσεις της διάταξης γεννήτριας - κινητήρα υπό κενό φορτίο

Αφού πραγματοποιηθεί η συνδεσμολογία του σχήματος 4.1, πραγματοποιείται η δοκιμή κενού φορτίου. Ρυθμίζοντας την τάση του dc κινητήρα θέτουμε τον δρομέα των μηχανών να περιστρέφεται με ταχύτητα 1010 στροφές το λεπτό, κατόπιν μεταβάλλοντας την τάση και συχνότητα της διέγερσης του δρομέα της επαγωγικής γεννήτριας λαμβάνουμε τις παρακάτω μετρήσεις του πίνακα 4.2.

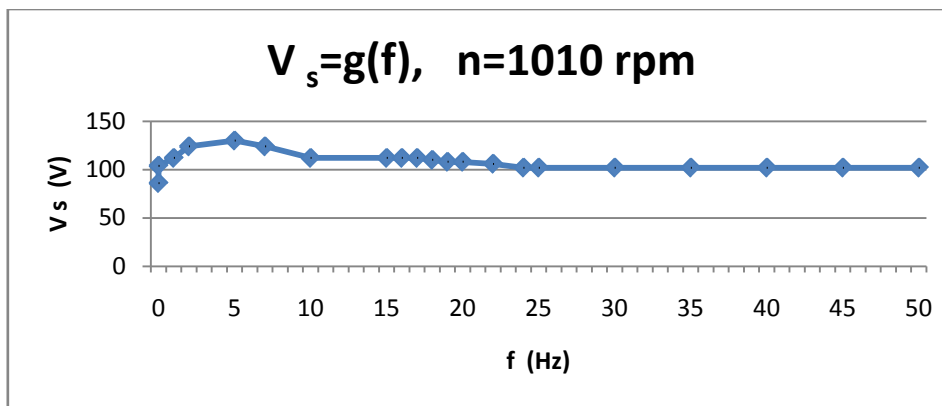
Στη συνέχεια θα παραχθούν οι ακόλουθες γραφικές παραστάσεις : τάση εξόδου (στάτη) συναρτήσει της τάσης διέγερσης (δρομέα) γράφημα 4.5, τάση εξόδου (στάτη) συναρτήσει της συχνότητας της τάσης διέγερσης (δρομέα) γράφημα 4.6.

**Πίνακας 4.2** Μετρήσεις κενού φορτίου με ταχύτητα δρομέα 1010 σαλ.

Κενό φορτίου n=1010 rpm									
Ac motor					dc motor				
Διέγερση (δρομέας)			Στάτης (φορτίο)		Τύμπανο		Διέγερση		
f	v <sub>r</sub>	w	i	v <sub>s</sub>	w	i	v	i	v
0	8	5	0,5	86		0,12	118	0,28	186
0,5	25	5	1	104		0,12	118	0,28	186
1	35	5	1	112		0,12	118	0,28	186
2	40	5	1,8	124		0,12	118	0,28	186
5	47	15	2	130		0,12	118	0,28	186
7	52	15	2,1	124		0,12	118	0,28	185
10	60	20	2,3	112		0,12	118	0,28	185
15	83	35	2,9	112		0,12	116	0,26	185
16	87	55	3,1	112		0,15	116	0,26	185
17	92	65	3,3	112		0,15	116	0,26	185
18	96	75	3,6	110		0,15	116	0,26	185
19	100	95	3,9	108		0,15	114	0,26	185
20	105	115	4,3	108		0,15	114	0,26	185
22	114	170	5,4	106		0,16	114	0,26	185
24	132	215	6,2	102		0,17	114	0,26	185
25	132	215	6,3	102		0,17	114	0,26	184
30	132	215	6,3	102		0,17	114	0,26	184
35	132	215	6,3	102		0,17	114	0,26	184
40	132	215	6,3	102		0,17	114	0,26	184
45	132	215	6,3	102		0,17	114	0,26	184
50	132	215	6,3	102		0,17	114	0,26	184



Γράφημα 4.5 Τάση εξόδου συναρτήσει τάσης διέγερσης



Γράφημα 4.6 Τάση εξόδου συναρτήσει συχνότητας διέγερσης

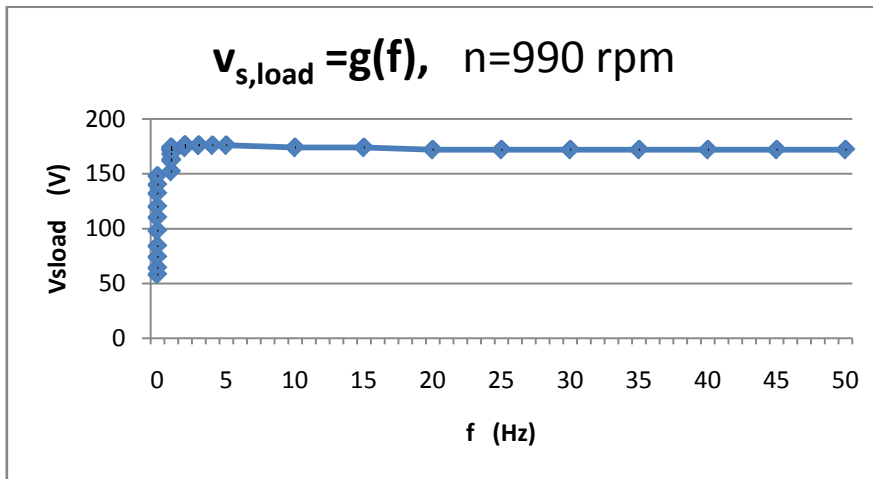
#### 4.2.3 Μετρήσεις της διάταξης γεννήτριας - κινητήρα υπό φορτίο

Στη συνέχεια για σταθερή τιμή περιστροφής του κινητήρα dc στις 990 στροφές ανά λεπτό και για σταδιακές μεταβολές της τάσης και της συχνότητας διέγερσης έχοντας συνδέσει σε κάθε φάση της επαγωγικής γεννήτριας ωμικό φορτίο  $135\Omega$  λαμβάνουμε τις μετρήσεις του πίνακα 4.3.

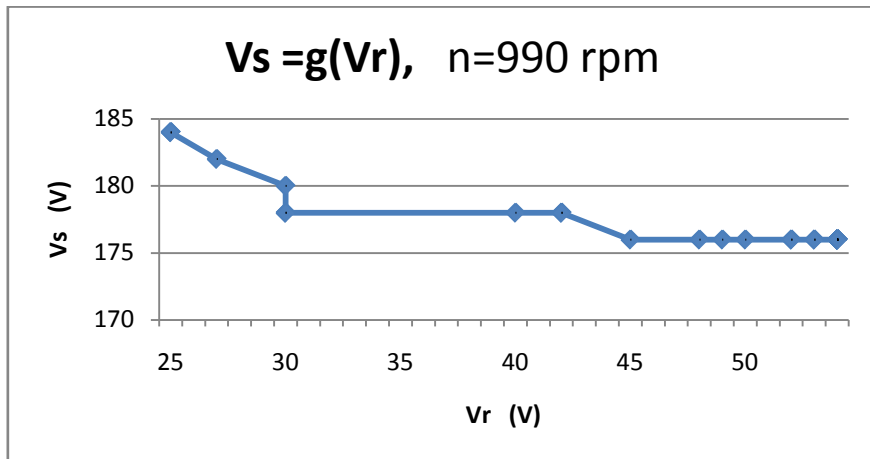
Στη συνέχεια δημιουργούμε τις ακόλουθες γραφικές παραστάσεις :τάση στάτη προς συχνότητα διέγερσης γραφική 4.7, τάση διέγερσης dc κινητήρα με τάση διέγερσης της γεννήτριας γραφική 4.8, ένταση ρεύματος dc κινητήρα σε σχέση με την συχνότητα διέγερσης γραφική 4.9, ένταση ρεύματος dc κινητήρα σε σχέση με την τάση διέγερσης γραφική 4.10, την ισχύ στο στάτη σε σχέση με την συχνότητα διέγερσης γραφική 4.11, την ισχύ στο στάτη σε σχέση με την τάση διέγερσης γραφική 4.12, το συντελεστή απόδοσης της επαγωγικής μηχανής σε σχέση με την συχνότητα διέγερσης γραφική 4.13, το συντελεστή απόδοσης της επαγωγικής μηχανής σε σχέση με την τάση διέγερσης γραφική 4.14.

**Πίνακας 4.3 Μετρήσεις υπό φορτίο στις 990 rpm**

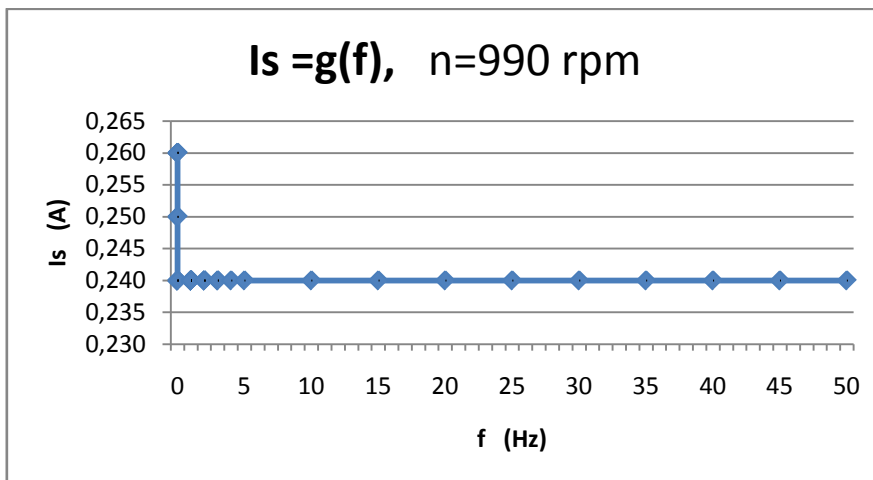
ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ Α Ζεύγος AC γεννήτριας Siemens και DC κινητήρα AEG																	
ΣΑΛ	AC MOTOR						DC MOTOR									Ptotal	n
	Διέγερση (δρομέας)				Στάτης φορτίο		Τύμπανο			Διέγερση			Pdc=Pa+Pf				
	f	Vr	w	i	v	w	Ia	Va	Pa	Is	Vs	Ps					
990	0	25	5	1,5	58	21	0,8	202	161,6	0,26	184	47,84	209,44	214,44	0,0979		
990	0,1	25	5	1,5	64	24	0,8	202	161,6	0,26	184	47,84	209,44	214,44	0,1119		
990	0,2	27	10	1,5	74	36	1	202	202	0,26	182	47,32	249,32	259,32	0,1388		
990	0,3	30	15	2	84	48	1,05	202	212,1	0,25	180	45	257,1	272,1	0,1764		
990	0,4	30	15	2,5	98	66	1,15	202	232,3	0,25	178	44,5	276,8	291,8	0,2261		
990	0,5	30	15	2,8	110	84	1,25	202	252,5	0,24	178	42,72	295,22	310,22	0,2707		
990	0,6	40	15	3	120	102	1,4	202	282,8	0,24	178	42,72	325,52	340,52	0,2995		
990	0,7	42	20	3,3	132	120	1,5	202	303	0,24	178	42,72	345,72	365,72	0,3283		
990	0,8	42	20	3,6	140	138	1,65	202	333,3	0,24	178	42,72	376,02	396,02	0,3484		
990	0,9	45	22,5	3,9	148	159	1,7	202	343,4	0,24	176	42,24	385,64	408,14	0,3895		
990	1	48	25	4,2	152	168	1,9	202	383,8	0,24	176	42,24	426,04	451,04	0,3724		
990	1,2	49	30	4,5	162	186	2	202	404	0,24	176	42,24	446,24	476,24	0,3905		
990	1,3	50	30	5	163	198	2,1	202	424,2	0,24	176	42,24	466,44	496,44	0,3983		
990	1,4	52	35	5,3	168	204	2,2	202	444,4	0,24	176	42,24	486,64	521,64	0,3910		
990	1,5	52	40	5,6	172	210	2,25	202	454,5	0,24	176	42,24	496,74	536,74	0,3912		
990	1,6	53	45	5,8	172	213	2,3	202	464,6	0,24	176	42,24	506,84	551,84	0,3859		
990	1,7	53	50	6	172	213	2,35	202	474,7	0,24	176	42,24	516,94	566,94	0,3757		
990	1,8	54	50	6,2	174	216	2,35	202	474,7	0,24	176	42,24	516,94	566,94	0,3809		
990	1,9	54	50	6,2	174	219	2,35	202	474,7	0,24	176	42,24	516,94	566,94	0,3862		
990	2	54	55	6,3	174	219	2,35	202	474,7	0,24	176	42,24	516,94	571,94	0,3829		
990	2,4	54	55	6,5	176	222	2,35	202	474,7	0,24	176	42,24	516,94	571,94	0,3881		
990	2,6	54	55	6,5	176	222	2,35	202	474,7	0,24	176	42,24	516,94	571,94	0,3881		
990	2,8	54	55	6,5	176	222	2,35	202	474,7	0,24	176	42,24	516,94	571,94	0,3881		
990	3	54	55	6,5	176	222	2,35	202	474,7	0,24	176	42,24	516,94	571,94	0,3881		
990	3,5	54	55	6,5	176	222	2,35	202	474,7	0,24	176	42,24	516,94	571,94	0,3881		
990	4	54	55	6,5	176	222	2,35	202	474,7	0,24	176	42,24	516,94	571,94	0,3881		
990	5	54	55	6,5	176	222	2,35	200	470	0,24	176	42,24	512,24	567,24	0,3913		
990	10	54	55	6,5	174	216	2,35	200	470	0,24	176	42,24	512,24	567,24	0,3807		
990	15	54	55	6,5	174	216	2,35	200	470	0,24	176	42,24	512,24	567,24	0,3807		
990	20	54	55	6,5	172	216	2,35	200	470	0,24	176	42,24	512,24	567,24	0,3807		
990	25	54	55	6,5	172	213	2,35	200	470	0,24	176	42,24	512,24	567,24	0,3755		
990	30	54	55	6,5	172	213	2,35	200	470	0,24	176	42,24	512,24	567,24	0,3755		
990	35	54	55	6,5	172	213	2,35	200	470	0,24	176	42,24	512,24	567,24	0,3755		
990	40	54	55	6,5	172	213	2,35	200	470	0,24	176	42,24	512,24	567,24	0,3755		
990	45	54	55	6,5	172	213	2,35	200	470	0,24	176	42,24	512,24	567,24	0,3755		
990	50	54	55	6,5	172	213	2,35	200	470	0,24	176	42,24	512,24	567,24	0,3755		



**Γράφημα 4.7** Χαρακτηριστική τάσης εξόδου με την συχνότητα διέγερσης

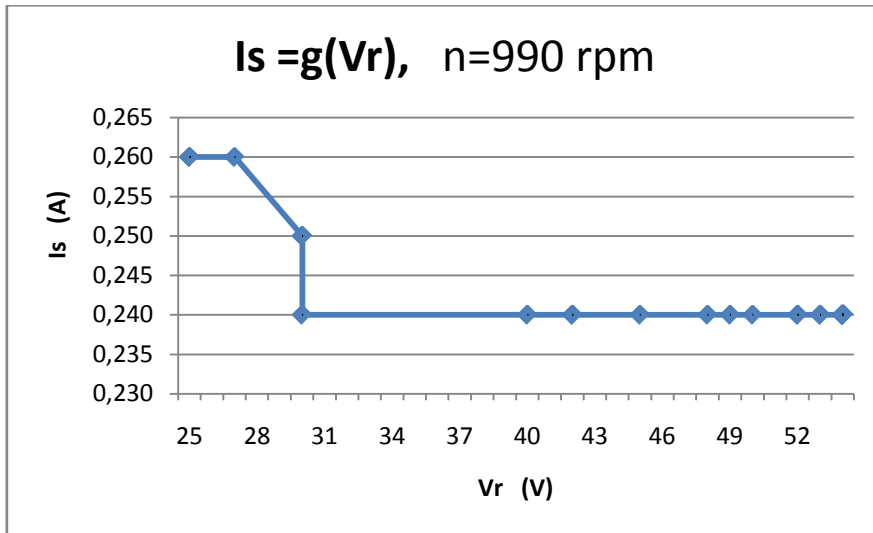


**Γράφημα 4.8** Τάση διέγερσης dc κινητήρα συναρτήσει τάσης διέγερσης ac γεννήτριας

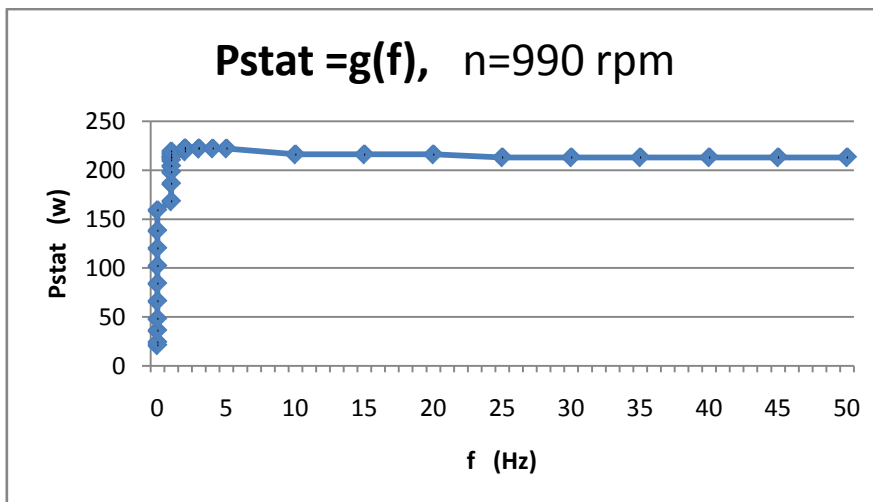


**Γράφημα 4.9** Ρεύμα διέγερσης dc κινητήρα συναρτήσει συχνότητας διέγερσης ac γεννήτριας

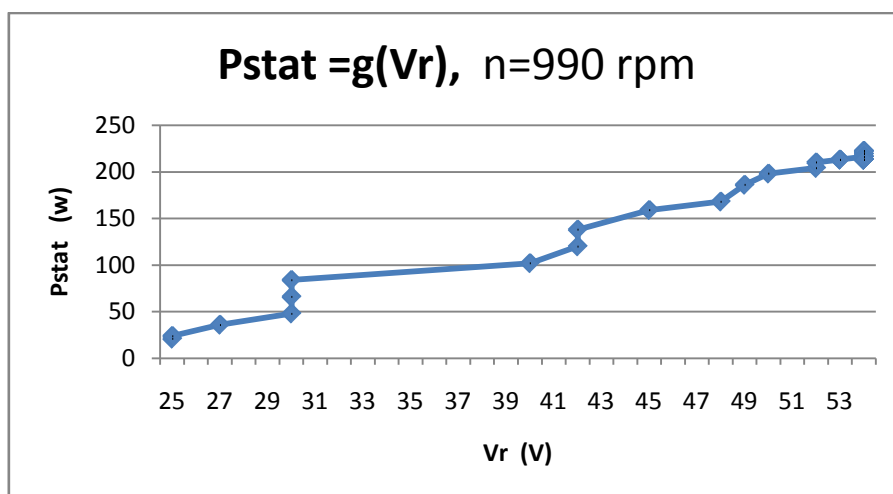




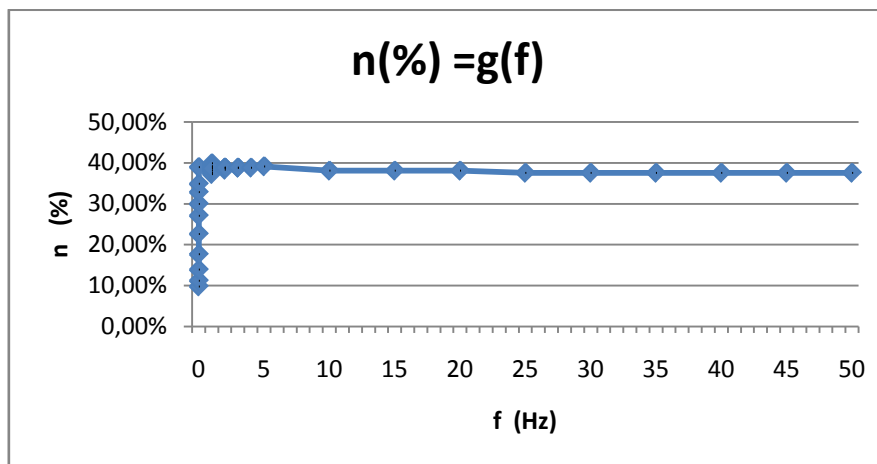
Γράφημα 4.10 Ρεύμα διέγερσης dc κινητήρα συναρτήσει τάσης διέγερσης ac γεννήτριας



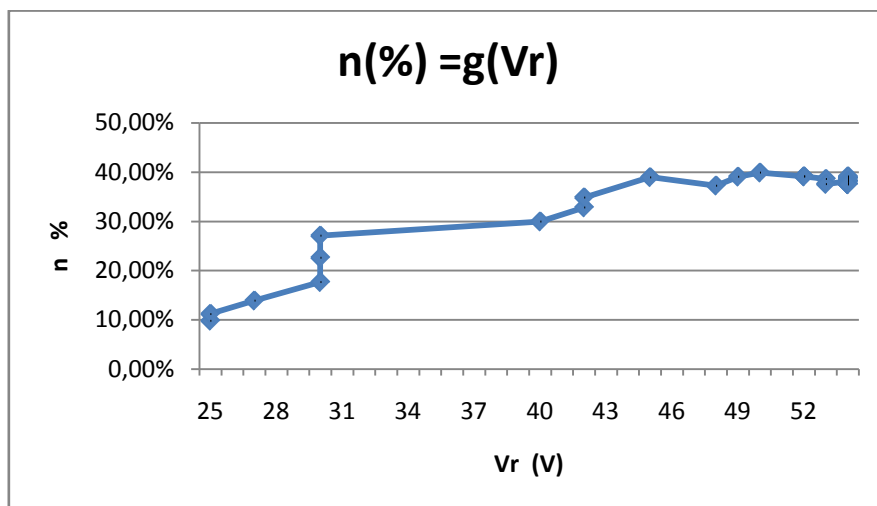
Γράφημα 4.11 Ισχύς στάτη συναρτήσει συχνότητας διέγερσης



Γράφημα 4.12 Ισχύς στάτη συναρτήσει τάσης διέγερσης



**Γράφημα 4.13** Βαθμός απόδοσης ac γεννήτριας συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης



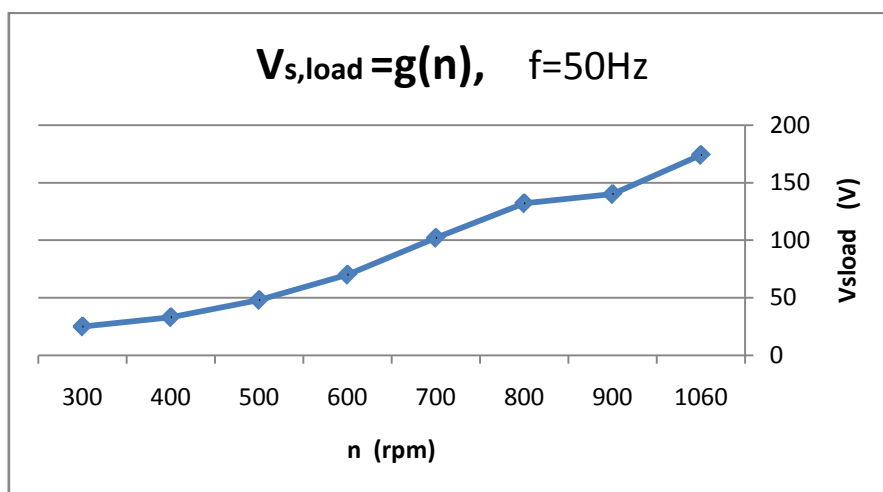
**Γράφημα 4.14** Βαθμός απόδοσης ac γεννήτριας συναρτήσει της τάσης διέγερσης

Ακολούθως γίνονται μετρήσεις για σταδιακές μεταβολές της τάσης διέγερσης  $V_r$  για σταθερές, κάθε φορά, τιμές της ταχύτητας περιστροφής του dc κινητήρα και πάντα για σταθερό φορτίο. Στον πίνακα 4.5 έχουμε συγκεντρώσει τα στοιχεία από τις επί μέρους μετρήσεις, και παρακάτω παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής των μεγεθών τάση στάτη, ρεύμα διέγερσης dc κινητήρα, ισχύ φορτίου και βαθμό απόδοσης στα γραφήματα 4.15, 4.16, 4.17, 4.18 αντίστοιχα.

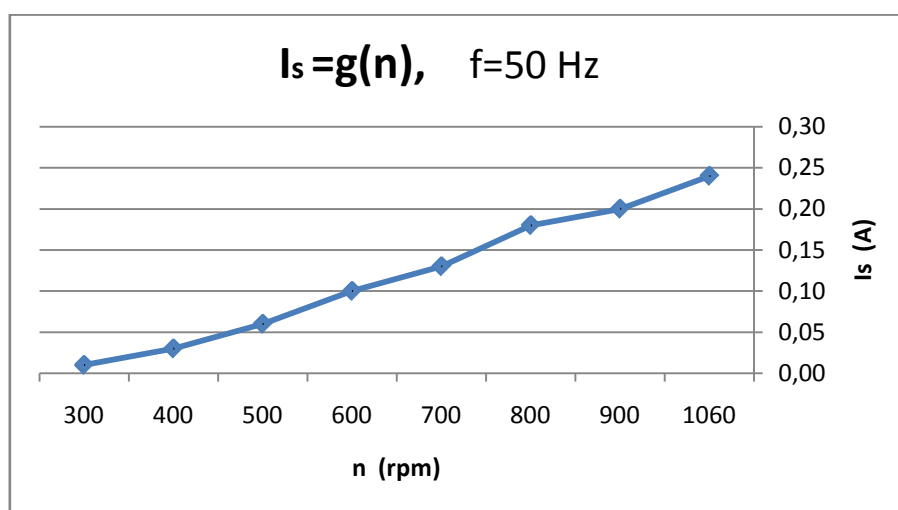
Πιο κάτω υπάρχουν οι αναλυτικοί πίνακες των μετρήσεων που έγιναν σε κάθε ταχύτητα περιστροφής του dc κινητήρα, για ταχύτητες περιστροφής 1060, 900, 800, 700, 600, 500, 400 και 300 σαλ στους πίνακες 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 και 4.13 αντίστοιχα. Και οι γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από τους πίνακες αυτούς εικονίζονται στα γραφήματα 4.19 – 4.50. Εκεί βλέπουμε τις χαρακτηριστικές της ισχύος φορτίου, του βαθμού απόδοσης, της τάσης φορτίου σε σχέση με την τάση διέγερσης και την γραφική της τάσης εξόδου στο φορτίο σε με την ισχύ του δρομέα.

**Πίνακας 4.5** Μετρήσεις για σταθερή τάση διέγερσης στα 230 V

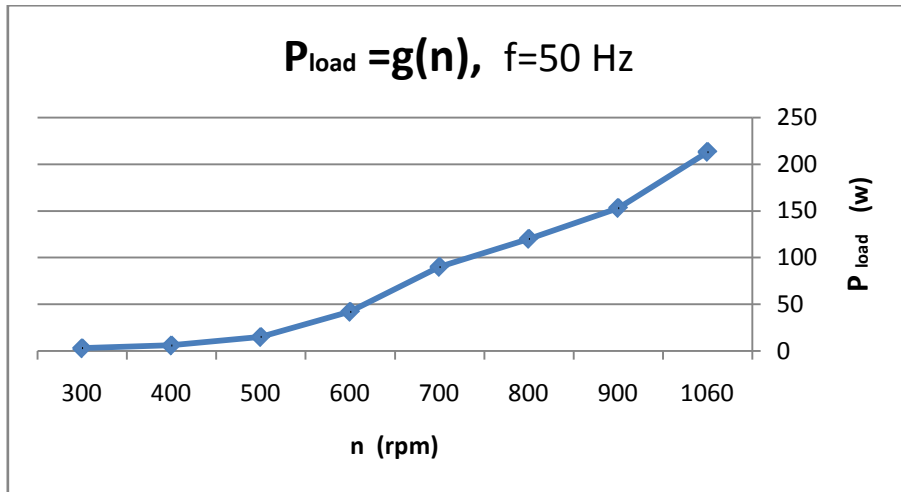
f=50 Hz, Vr= max (variac 230V)				
n	Vs	Is	Pload	n%
1060	174	0,24	213	0,353962
900	14	0,2	153	0,314815
800	132	0,18	120	0,253293
700	102	0,13	90	0,247416
600	70	0,1	42	0,158014
500	48	0,06	15	0,080043
400	33	0,03	6	0,041742
300	25	0,01	3	0,024948



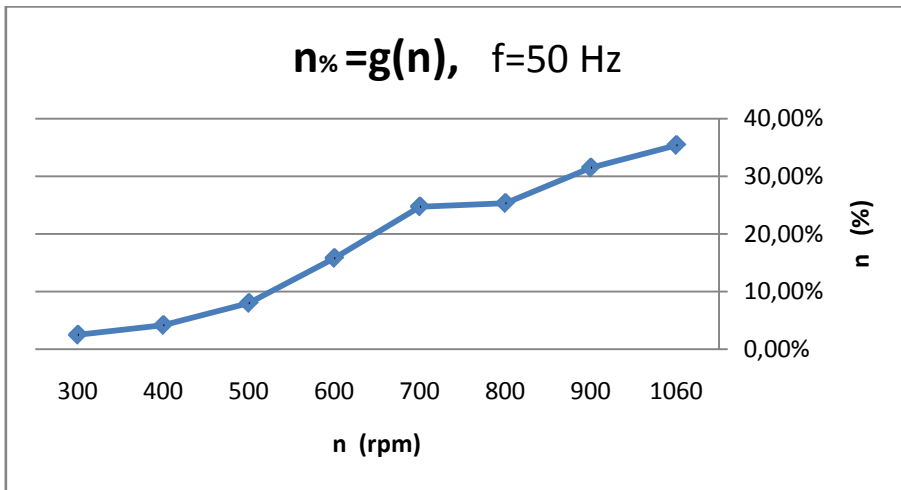
**Γράφημα 4.15** Τάση στάτη συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής



**Γράφημα 4.16** Ρεύμα διέγερσης dc κινητήρα συναρτήσει ταχύτητας περιστροφής



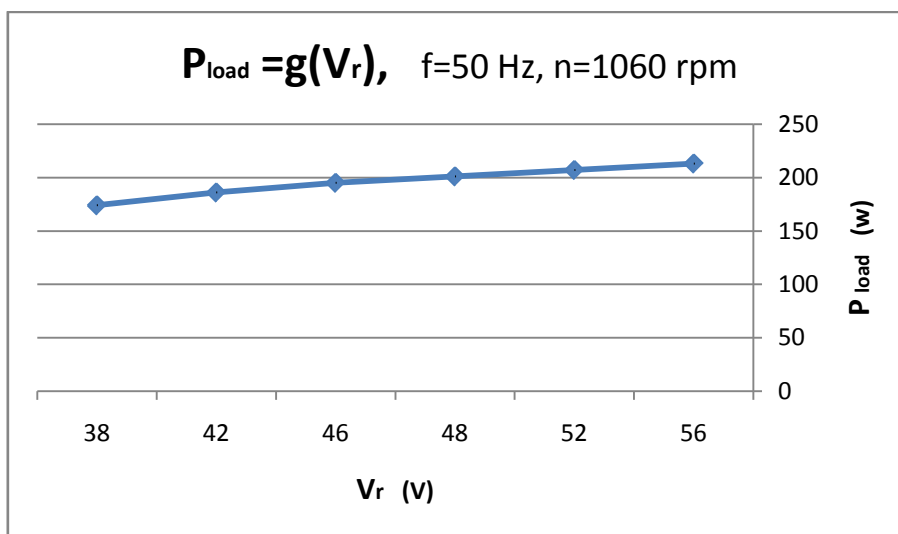
Γράφημα 4.17 Ισχύς εξόδου συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής



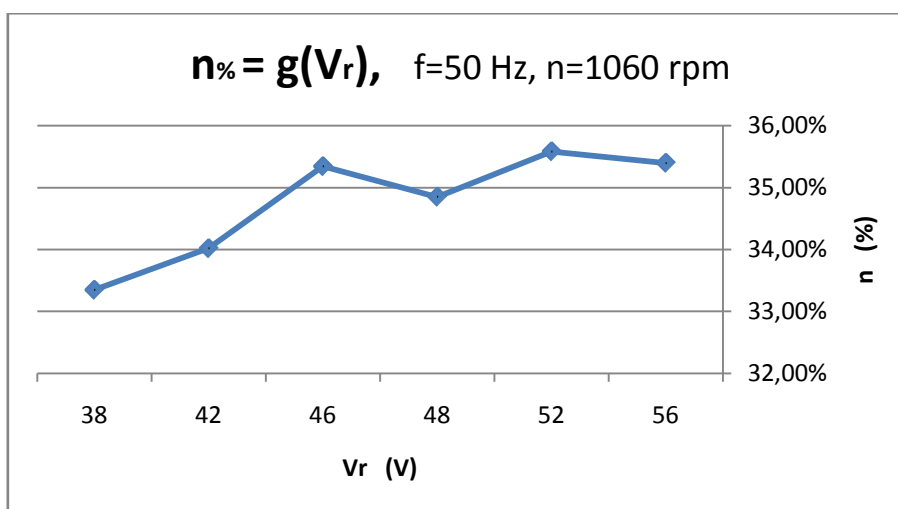
Γράφημα 4.18 Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής

Πίνακας 4.6 Μετρήσεις μεταβάλλοντας την τάση διέγερσης σε ταχύτητα 1060 rpm

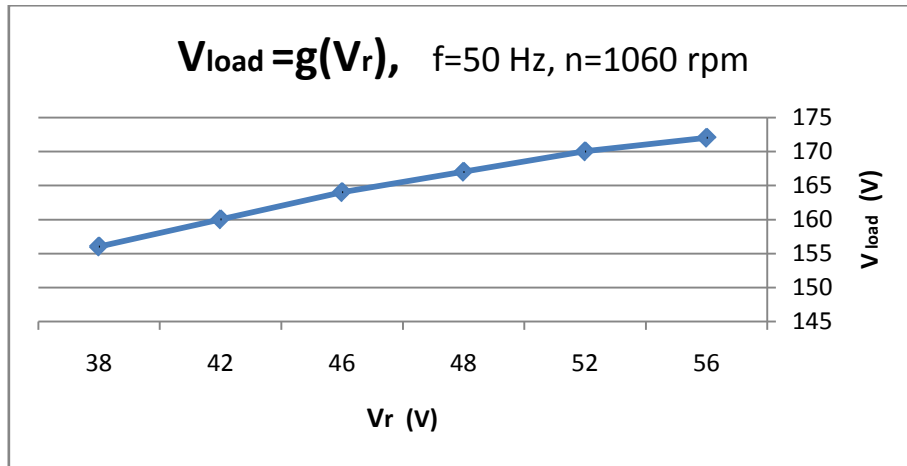
Ζεύγος AC γεννήτριας Siemens και DC κινητήρα AEG														
ac motor							dc motor							
Δρομέας (διέγερση)				Φορτίο			Τύμπανο			Διέγερση				
rpm	f	V <sub>r</sub> (V)	P (w)	I	V <sub>I</sub>	P <sub>load</sub>	I <sub>a</sub>	V <sub>a</sub>	P <sub>a</sub>	I <sub>s</sub>	V <sub>s</sub>	P <sub>s</sub>	P <sub>dc</sub>	n(%)
1060	50	56	90	6,6	172	213	2,3 5	200	470	0,24	174	41,76	511,76	0,35396
		52	80	6,3	170	207	2,3	200	460	0,24	174	41,76	501,76	0,35581
		48	75	6	167	201	2,3	200	460	0,24	174	41,76	501,76	0,34849
		46	70	5,9	164	195	2,2	200	440	0,24	174	41,76	481,76	0,35341
		42	65	5,8	160	186	2,2	200	440	0,24	174	41,76	481,76	0,34018
		38	60	5,6	156	174	2,1	200	420	0,24	174	41,76	461,76	0,33348
αύξηση ρεύματος - ταχύτητας και τάσης dc κινητήρα														
R = 135 Ω														



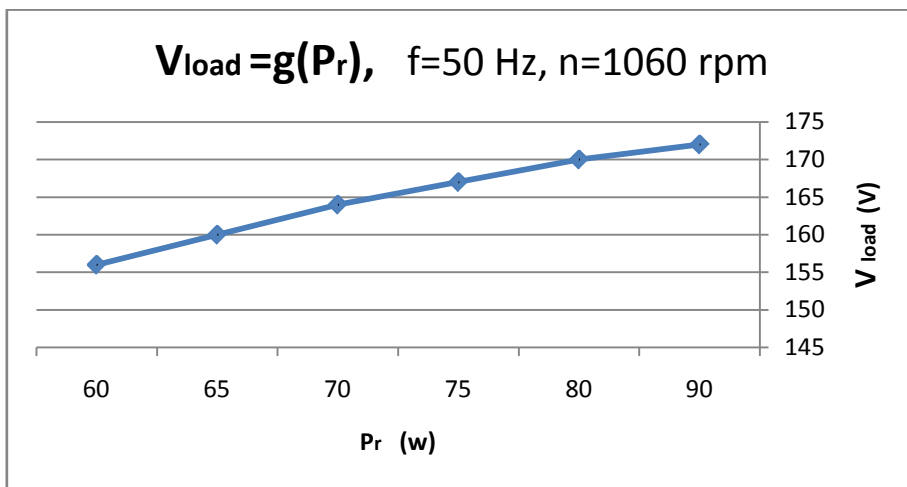
**Γράφημα 4.19** Ισχύς φορτίου συναρτήσει τάσης διέγερσης



**Γράφημα 4.20** Βαθμός απόδοσης συναρτήσει τάσης διέγερσης



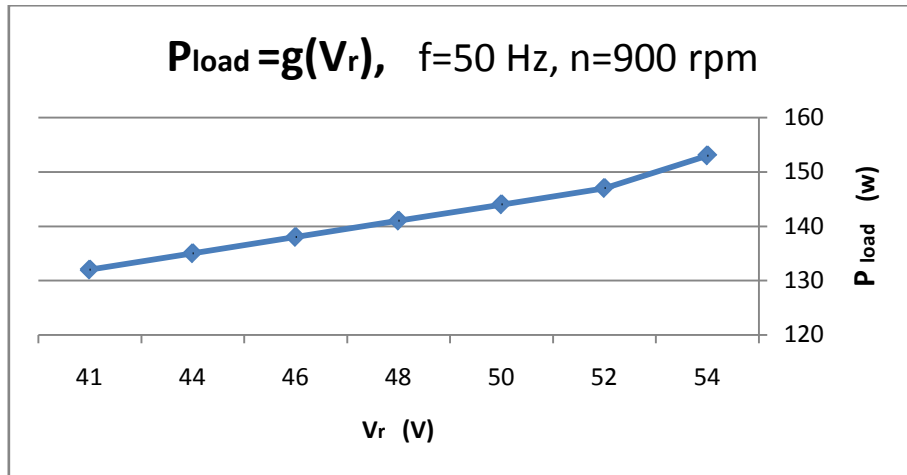
**Γράφημα 4.21** Τάση εξόδου συναρτήσει τάσης διέγερσης



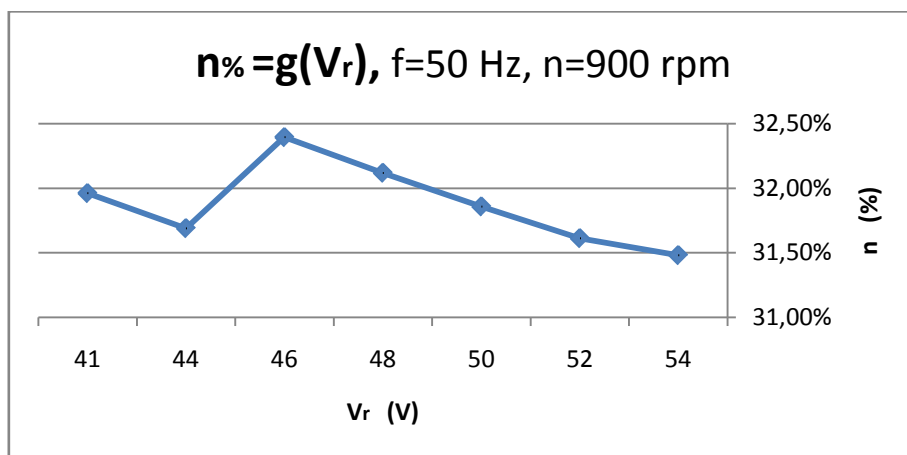
**Γράφημα 4.22** Τάση εξόδου συναρτήσει ισχύος διέγερσης

**Πίνακας 4.7** Μετρήσεις μεταβάλλοντας την τάση διέγερσης σε ταχύτητα 900 rpm

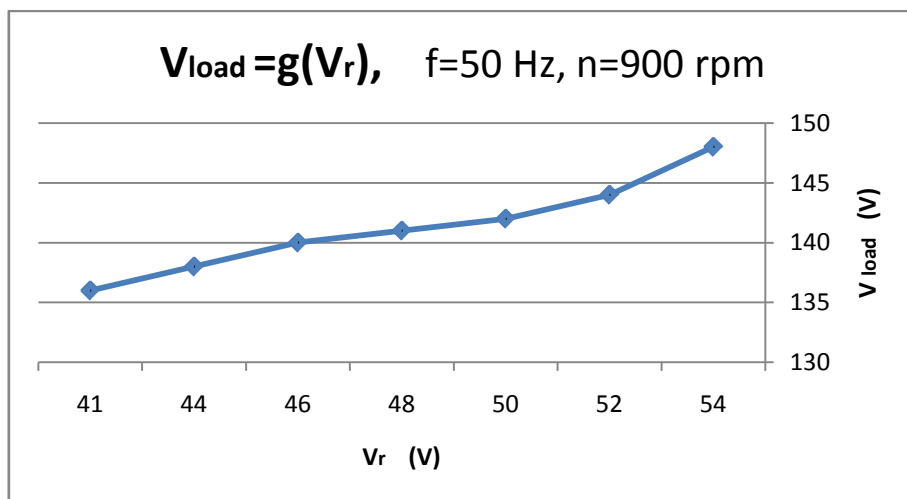
ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ Β ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΑΣΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΣΕ ΔΙΑΦΕΡΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ														
Ζεύγος AC γεννήτριας Siemens και DC κινητήρα AEG														
rpm	f	AC MOTOR					DC MOTOR							
		Δρομέας (διέγερση)			Φορτίο		Τύμπανο			Διέγερση			P <sub>dc</sub> =P <sub>a</sub> +P <sub>s</sub>	η(%)
V <sub>r</sub>	W <sup>5</sup>	I	V	W	I <sub>a</sub>	V <sub>a</sub>	P <sub>a</sub>	I <sub>s</sub>	V <sub>s</sub>	P <sub>s</sub>				
900	50	54	90	6,3	148	153	2,3	160	368	0,2	140	28	396	0,314815
		52	85	6,1	144	147	2,2	160	352	0,2	140	28	380	0,316129
		50	80	5,9	142	144	2,15	160	344	0,2	140	28	372	0,318584
		48	75	5,8	141	141	2,1	160	336	0,2	140	28	364	0,321185
		46	70	5,6	140	138	2,05	160	328	0,2	140	28	356	0,323944
		44	70	5,5	138	135	2,05	160	328	0,2	140	28	356	0,316901
		41	65	5,4	136	132	2	160	320	0,2	140	28	348	0,319613
R = 135 Ω														



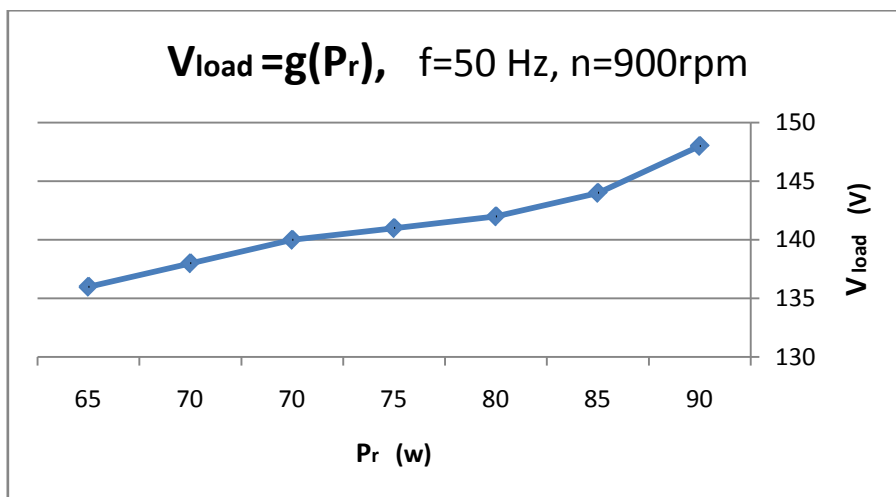
**Γράφημα 4.23** Ισχύς φορτίου συναρτήσει της τάσης διέγερσης



**Γράφημα 4.24** Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της τάσης διέγερσης



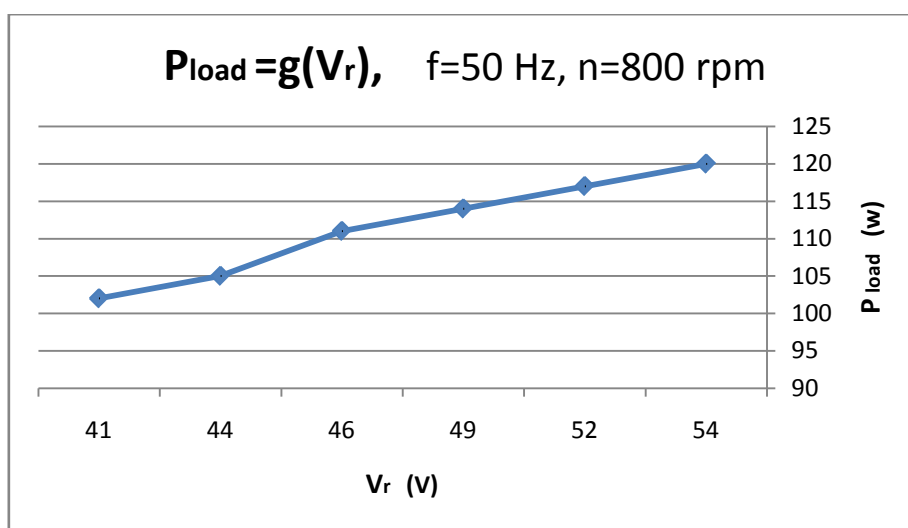
**Γράφημα 4.25** Τάση φορτίου συναρτήσει της τάσης διέγερσης



**Γράφημα 4.26** Τάση φορτίου συναρτήσει της ισχύος δρομέα

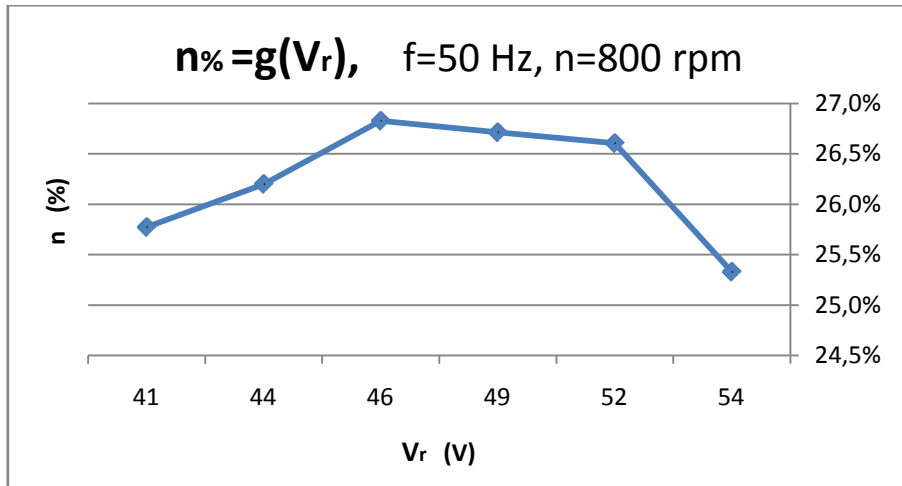
**Πίνακας 4.8** Μετρήσεις μεταβάλλοντας την τάση διέγερσης σε ταχύτητα 800 rpm

Ζεύγος AC γεννήτριας Siemens και DC κινητήρα AEG														
		ac motor					dc motor							
		Δρομέας(διέγερση)			Φορτίο		Τύμπανο		Διέγερση					
rpm	f	$V_r$	W	I	V	W	$I_a$	$V_a$	$P_a$	$I_s$	$V_s$	$P_s$	$P_{dc} = P_{a+Ps}$	$\eta(\%)$
		54	90	6,3	130	120	2,25	160	360	0,18	132	23,76	383,76	0,2532
800	50	52	80	6	128	117	2,1	160	336	0,18	132	23,76	359,76	0,2660
		49	75	5,8	126	114	2,05	160	328	0,18	132	23,76	351,76	0,2671
		46	70	5,6	124	111	2	160	320	0,18	132	23,76	343,76	0,2682
		44	65	5,5	122	105	1,95	160	312	0,18	132	23,76	335,76	0,2620
		41	60	5,4	120	102	1,95	160	312	0,18	132	23,76	335,76	0,2577

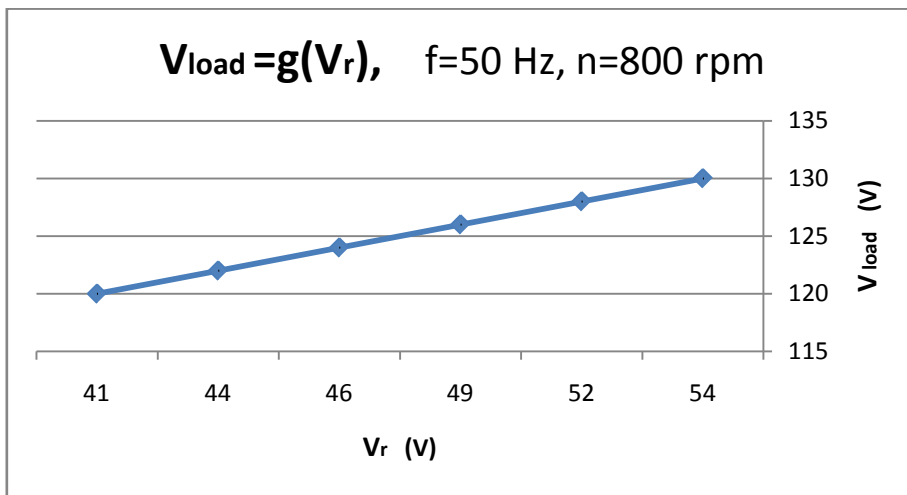


**Γράφημα 4.27** Ισχύς φορτίου σε σχέση με την τάση διέγερσης

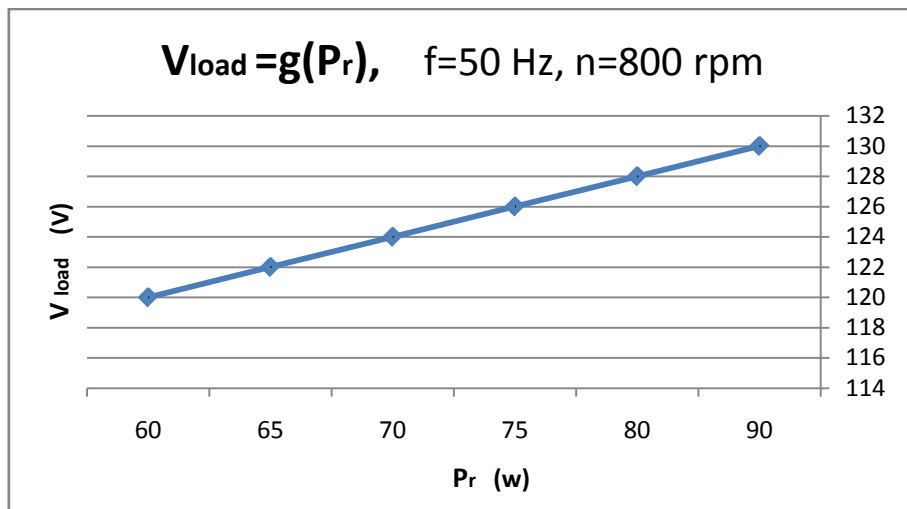




**Γράφημα 4.28** Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της τάσης διέγερσης



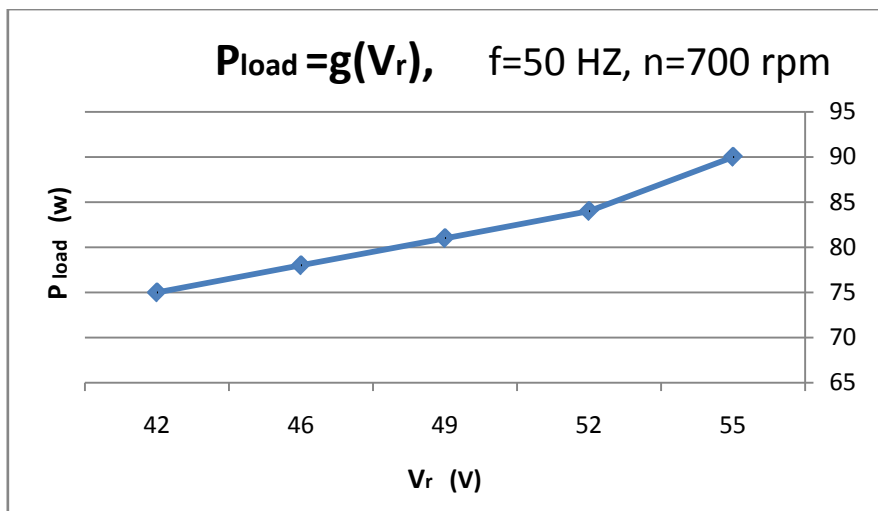
**Γράφημα 4.29** Τάση εξόδου συναρτήσει της τάσης διέγερσης



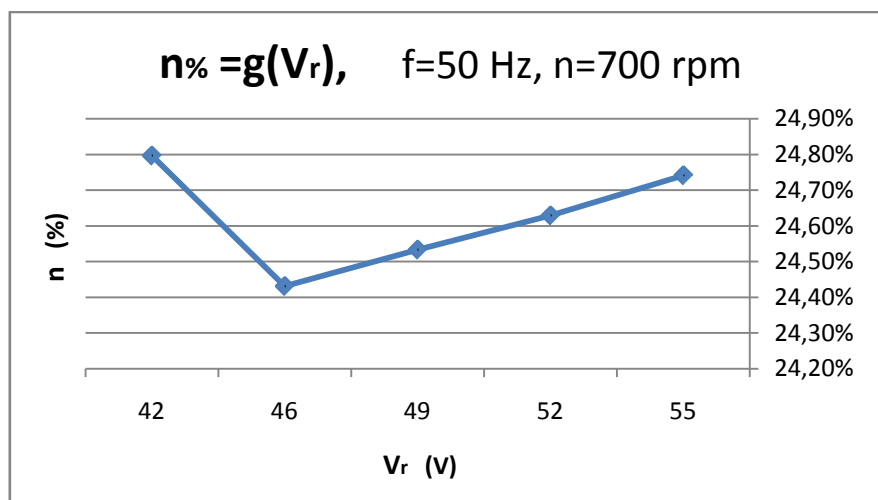
**Γράφημα 4.30** Τάση φορτίου συναρτήσει της ισχύος διέγερσης

**Πίνακας 4.9** Μετρήσεις μεταβάλλοντας την τάση διέγερσης σε ταχύτητα 700 rpm

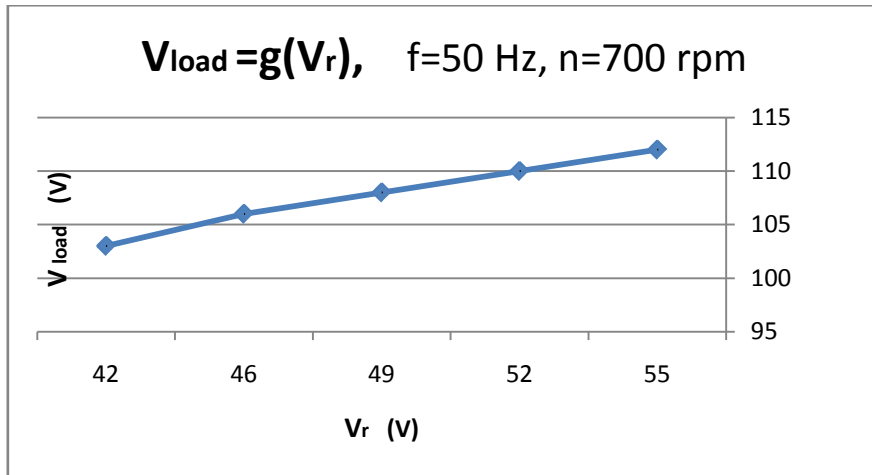
Ζεύγος AC γεννήτριας Siemens και DC κινητήρα AEG Rload = 135 Ω														
ac motor							dc motor							
Δρομέας (διέγερση)				Φορτίο			Τύμπανο			Διέγερση				
rpm	f	Vr	W	I	V	W	Ia	Va	Pa	Is	Vs	Ps	Pdc	n(%)
		55	85	6,3	112	90	2,25	118	265,5	0,13	102	13,26	278,76	0,247416
700	50	52	80	5,9	110	84	2,1	118	247,8	0,13	102	13,26	261,06	0,246291
		49	75	5,8	108	81	2,05	118	241,9	0,13	102	13,26	255,16	0,245336
		46	70	5,6	106	78	2	118	236	0,13	102	13,26	249,26	0,244315
		42	65	5,5	103	75	1,9	118	224,2	0,13	102	13,26	237,46	0,247967



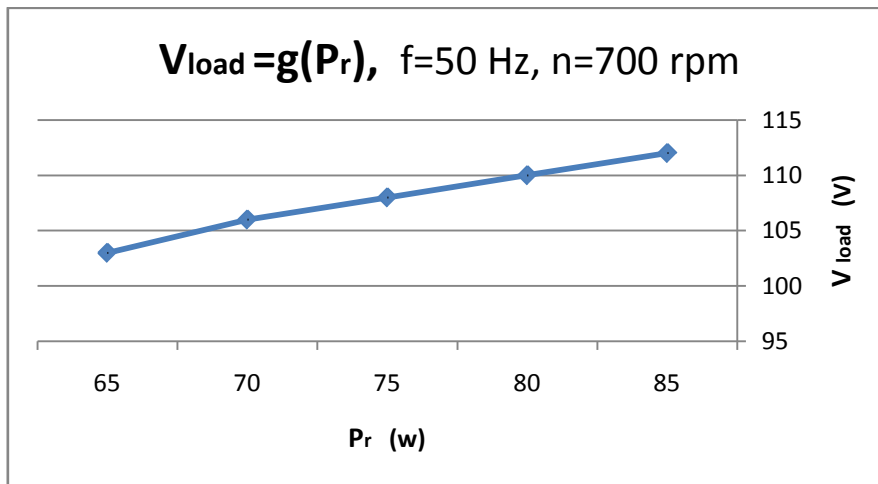
**Γράφημα 4.31** Ισχύς φορτίου σε σχέση με την τάση διέγερσης



**Γράφημα 4.32** Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της τάσης διέγερσης



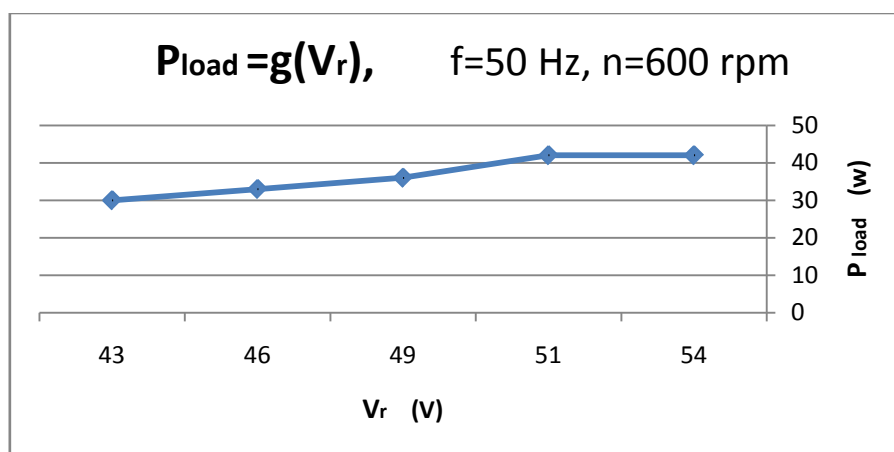
**Γράφημα 4.33** Τάση φορτίου συναρτήσει της τάσεως διέγερσης



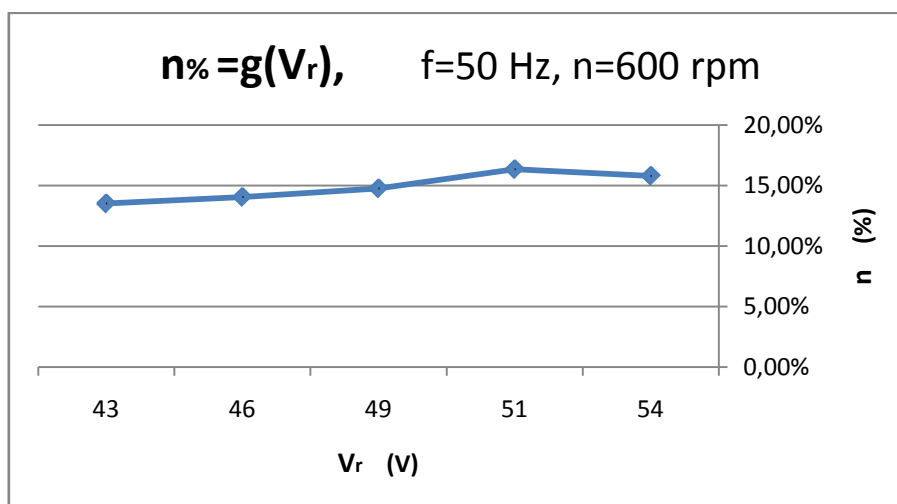
**Γράφημα 4.34** Τάση φορτίου συναρτήσει της ισχύος διέγερσης

**Πίνακας 4.10** Μετρήσεις μεταβάλλοντας την τάση διέγερσης σε ταχύτητα 600 rpm

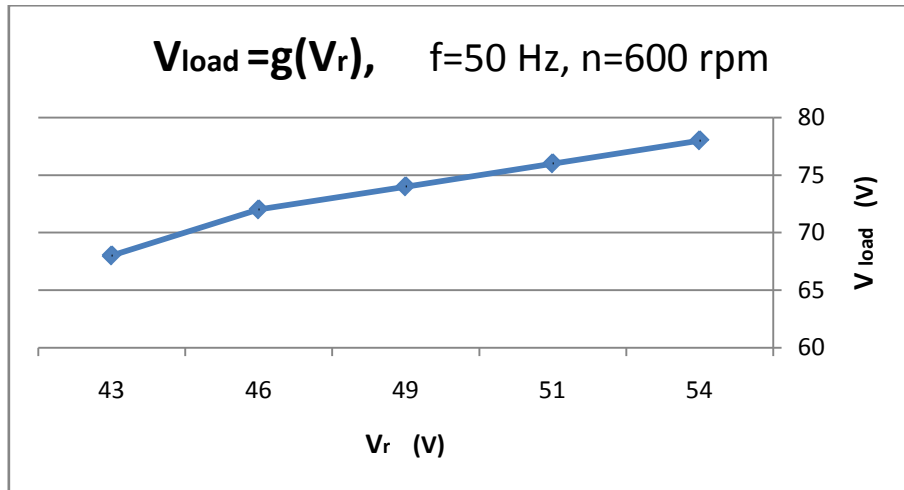
Ζεύγος AC γεννήτριας Siemens και DC κινητήρα AEG														
ac motor							dc motor							
Δρομέας (διέγερση)				Φορτίο			Τύμπανο			Διέγερση				
rpm	f	V <sub>r</sub>	W	I	V	W	I <sub>a</sub>	V <sub>a</sub>	P <sub>a</sub>	I <sub>s</sub>	V <sub>s</sub>	P <sub>s</sub>	P <sub>dc</sub>	n(%)
		54	85	6,2	78	42	2,2	79	173,8	0,1	70	7	180,8	0,15801
600	50	51	80	5,8	76	42	2,15	79	169,85	0,1	70	7	176,85	0,16352
		49	75	5,5	74	36	2,05	79	161,95	0,1	70	7	168,95	0,14757
		46	70	5,3	72	33	2	79	158	0,1	70	7	165	0,14042
		43	65	5,2	68	30	1,9	79	150,1	0,1	70	7	157,1	0,13507



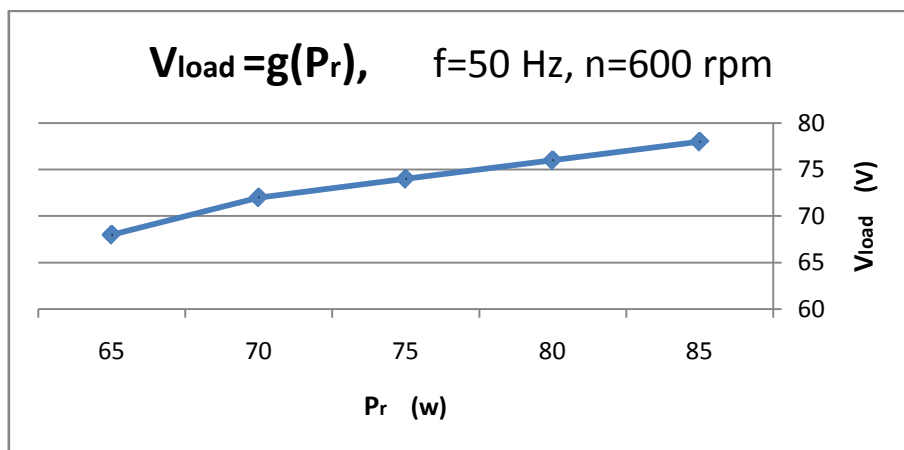
**Γράφημα 4.35** Ισχύς εξόδου συναρτήσει της τάσης διέγερσης



**Γράφημα 4.36** Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της τάσης διέγερσης



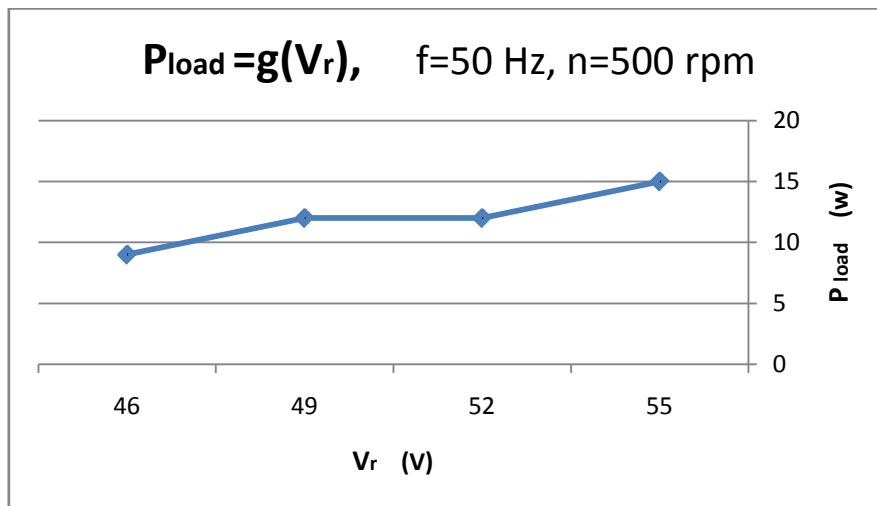
**Γράφημα 4.37** Τάση φορτίου συναρτήσει της τάσης διέγερσης



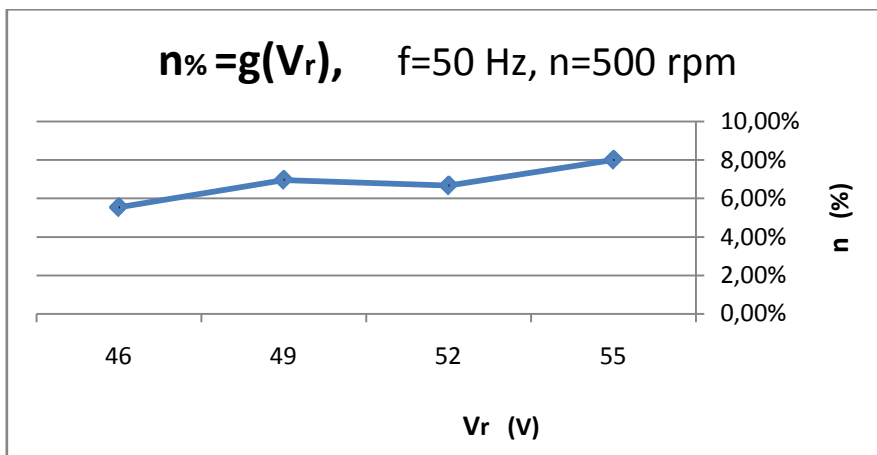
**Γράφημα 4.38** Τάση φορτίου συναρτήσει της ισχύος διέγερσης

**Πίνακας 4.11** Μετρήσεις μεταβάλλοντας την τάση διέγερσης σε ταχύτητα 500 rpm

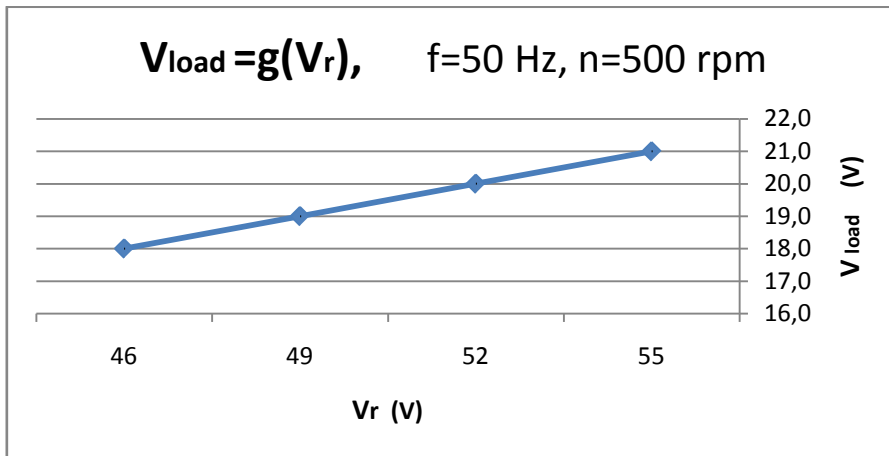
Ζεύγος AC γεννήτριας Siemens και DC κινητήρα AEG															
Ac motor							dc motor								
Δρομέας (διέγερση)				Φορτίο			Τύμπανο			Διέγερση					
rpm	f	Vr	W*5	I	V	W	Ia	Va	Pa	Is	Vs	Ps	Pdc	n(%)	
		55	85	6	21	15	2	50	100	0,05	48	2,4	102,4	0,08004	
500	50	52	80	5,7	20	12	1,95	50	97,5	0,05	48	2,4	99,9	0,06670	
		49	75	5,4	19	12	1,9	50	95	0,05	48	2,4	97,4	0,06960	
		46	70	5,2	18	9	1,8	50	90	0,05	48	2,4	92,4	0,05541	
		52			5,5	12	2	I=> max inverter off							



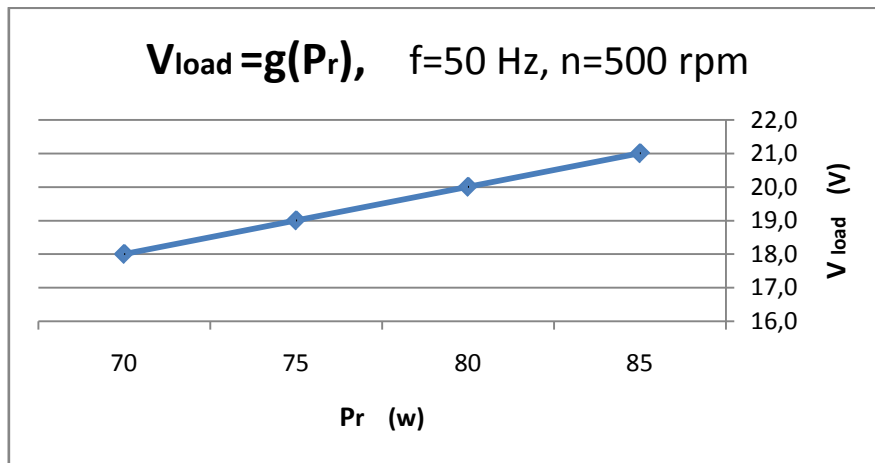
**Γράφημα 4.39** Ισχύς φορτίου συναρτήσει της τάσης διέγερσης



**Γράφημα 4.40** Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της τάσης διέγερσης



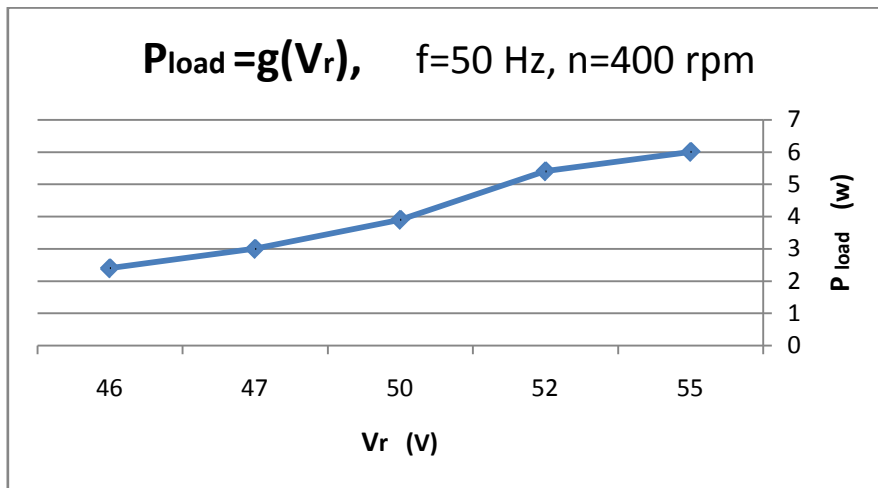
**Γράφημα 4.41** Τάση φορτίου συναρτήσει της τάσης διέγερσης



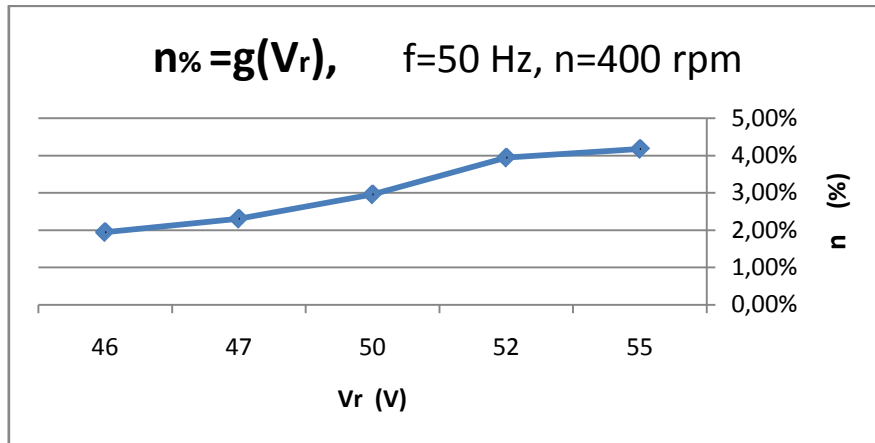
**Γράφημα 4.42** Τάση φορτίου σε σχέση της ισχύος διέγερσης

**Πίνακας 4.12** Μετρήσεις μεταβάλλοντας την τάση διέγερσης σε ταχύτητα 900 rpm

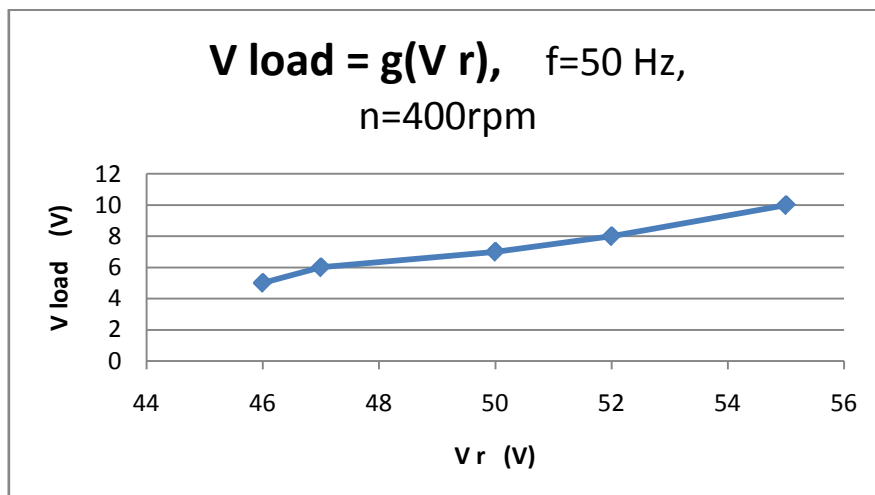
Ζεύγος AC γεννήτριας Siemens και DC κινητήρα AEG															
		ac motor					dc motor								
		διέγερση			Φορτίο		Τύμπανο			Διέγερση					
rpm	f	$V_r$	W	I	V	W	$I_a$	$V_a$	$P_a$	$I_s$	$V_s$	$P_s$	$P_{dc}$	$n(\%)$	
		55	85	6	10	6	1,65	35	57,75	0,03	33	0,99	58,74	0,04174	
400	50	52	80	5,6	9	5,4	1,6	35	56	0,03	33	0,99	56,99	0,03941	
		50	75	5,4	8	3,9	1,6	35	56	0,03	33	0,99	56,99	0,02954	
		47	75	5,2	7	3	1,55	35	54,25	0,03	33	0,99	55,24	0,02303	
		46	70	5,2	6	2,4	1,5	35	52,5	0,03	33	0,99	53,49	0,01943	
		50	85	5,3	5	1,5	1,3	35	45,5	0,03	33	0,99	46,49	0,01140	



**Γράφημα 4.43** Ισχύς φορτίου σε σχέση με την τάση διέγερσης

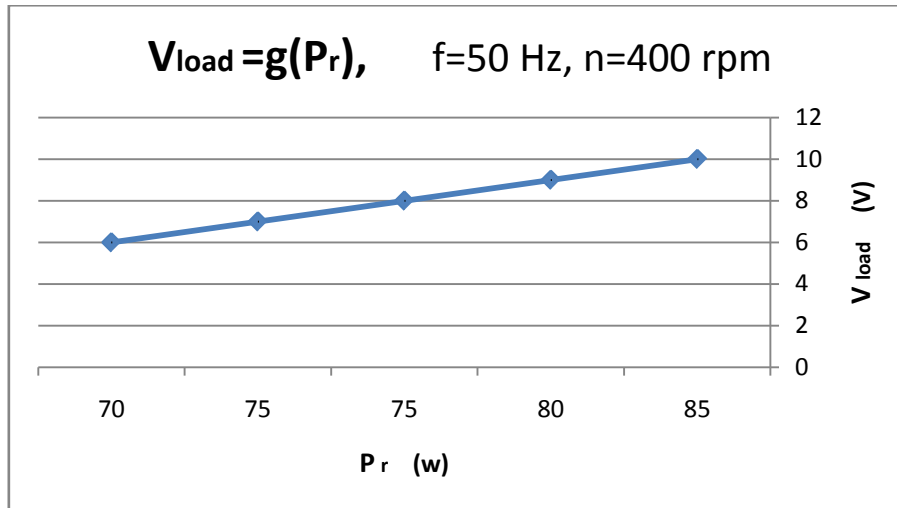


**Γράφημα 4.44** Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της τάσης διέγερσης



**Γράφημα 4.45** Τάση φορτίου συναρτήσει της τάσης διέγερσης

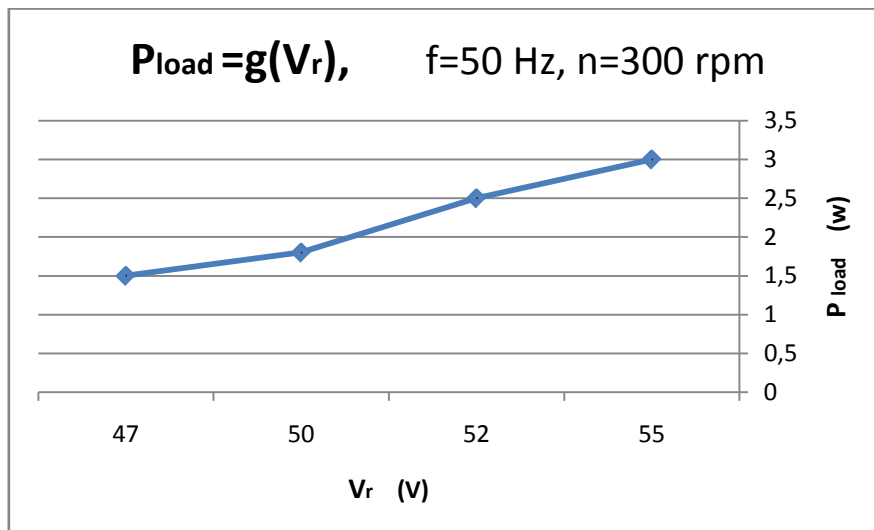




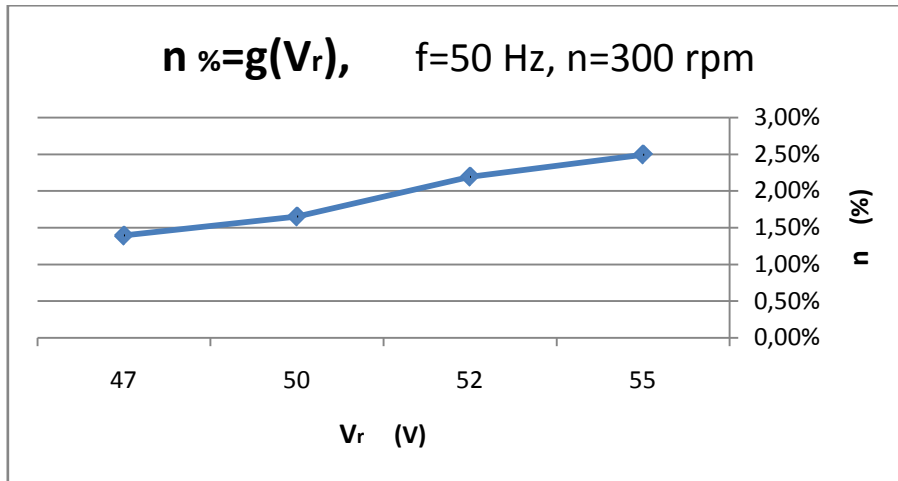
**Γράφημα 4.46** Τάση φορτίου συναρτήσει της ισχύος διέγερσης

**Πίνακας 4.13** Μετρήσεις μεταβάλλοντας την τάση διέγερσης σε ταχύτητα 300 rpm

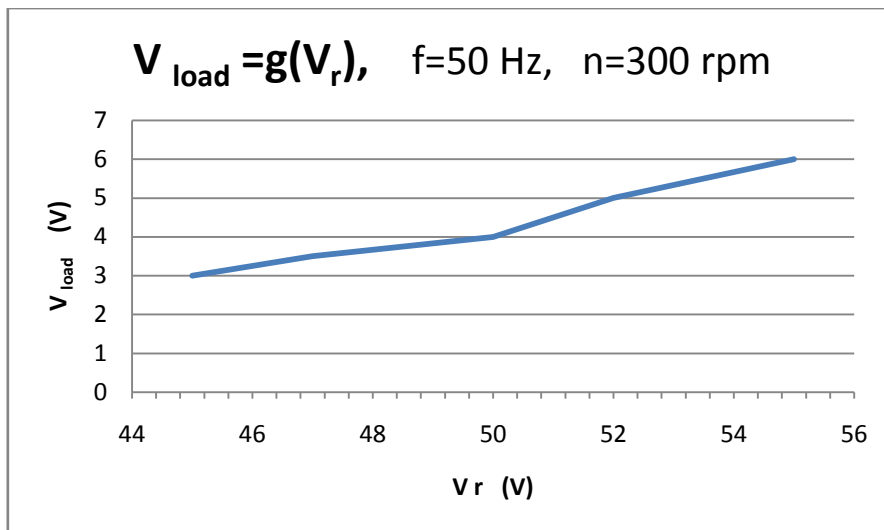
Ζεύγος AC γεννήτριας Siemens και DC κινητήρα AEG $R=135 \Omega$														
		ac motor					dc motor							
		Διέγερση			Φορτίο		Τύμπανο			Διέγερση				
rpm	f	$V_r$	W	I	V	W	$I_a$	$V_a$	$P_a$	$I_s$	$V_s$	$P_s$	$P_{dc}$	$n(\%)$
300	50	55	85	5,8	6	3	1,4	25	35	0,01	25	0,25	35,25	0,02494
		52	80	5,6	5	2,5	1,35	25	33,75	0,01	25	0,25	34	0,02193
		50	75	5,3	4	1,8	1,35	25	33,75	0,01	25	0,25	34	0,01651
		47	75	5,1	3,5	1,5	1,3	25	32,5	0,01	25	0,25	32,75	0,01392
		49	85	5,2	3	1,2	1,1	25	27,5	0,01	25	0,25	27,75	0,01064



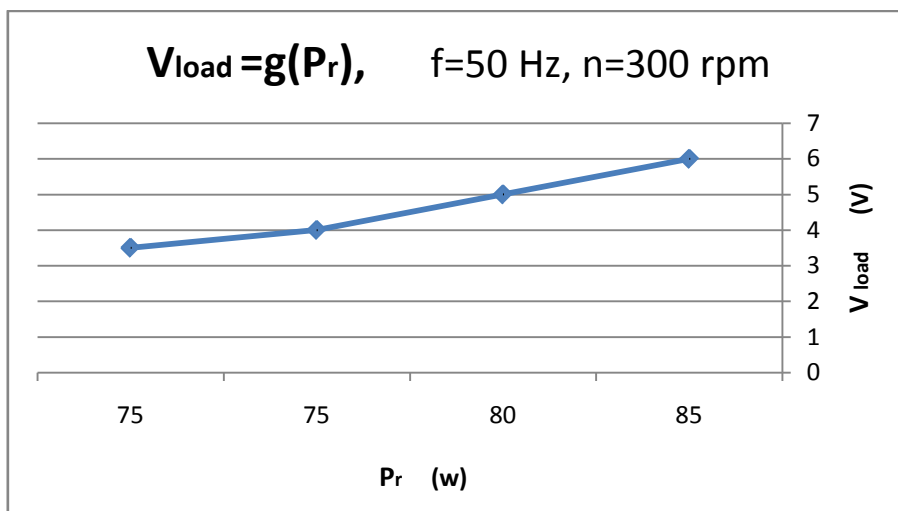
**Γράφημα 4.47** Ισχύς φορτίου συναρτήσει της τάσης διέγερσης



**Γράφημα 4.48** Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της τάσης διέγερσης

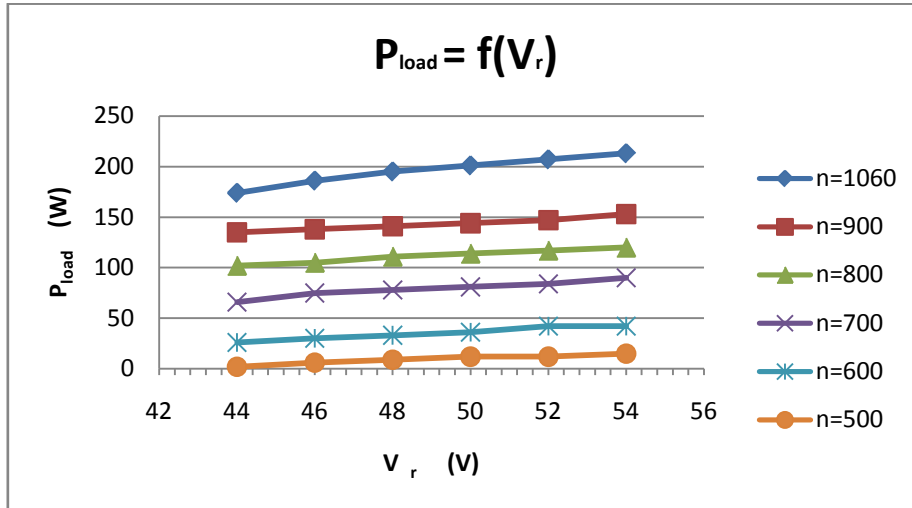


**Γράφημα 4.49** Τάση φορτίου συναρτήσει της τάσης διέγερσης

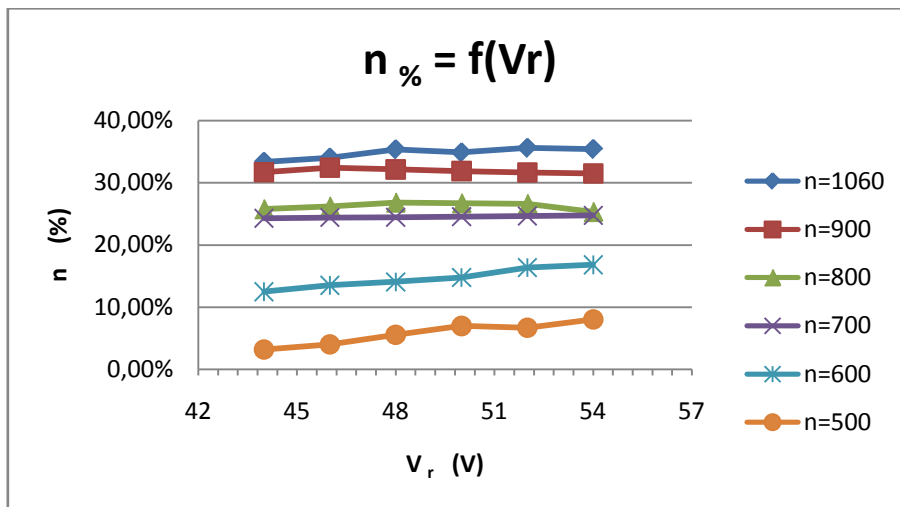


**Γράφημα 4.50** Τάση φορτίου συναρτήσει της ισχύος διέγερσης

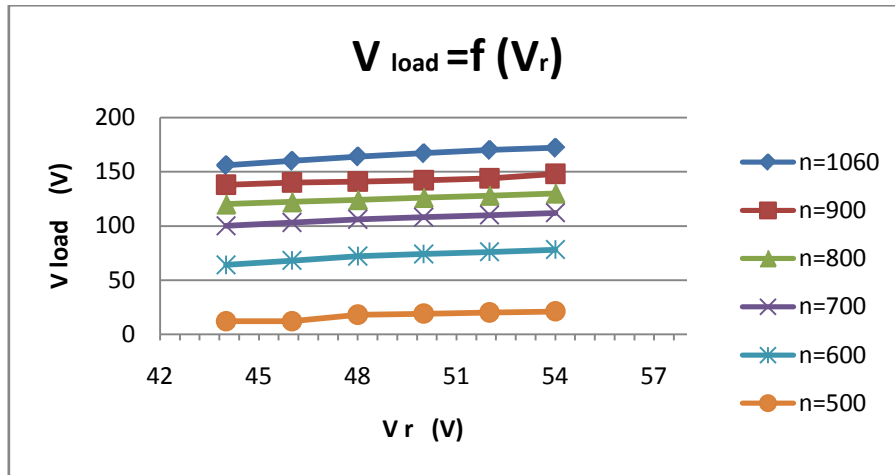
Αμέσως μετά παραθέτουμε σε κοινό διάγραμμα την ισχύ φορτίου, τον βαθμό απόδοσης, την τάση φορτίου, σε σχέση με την τάση διέγερσης, και την ισχύ φορτίου σε σχέση με την ισχύ δρομέα, στις διάφορες ταχύτητες περιστροφής, σχήμα 4.51, 4.52, 4.53 και 4.54 αντίστοιχα.



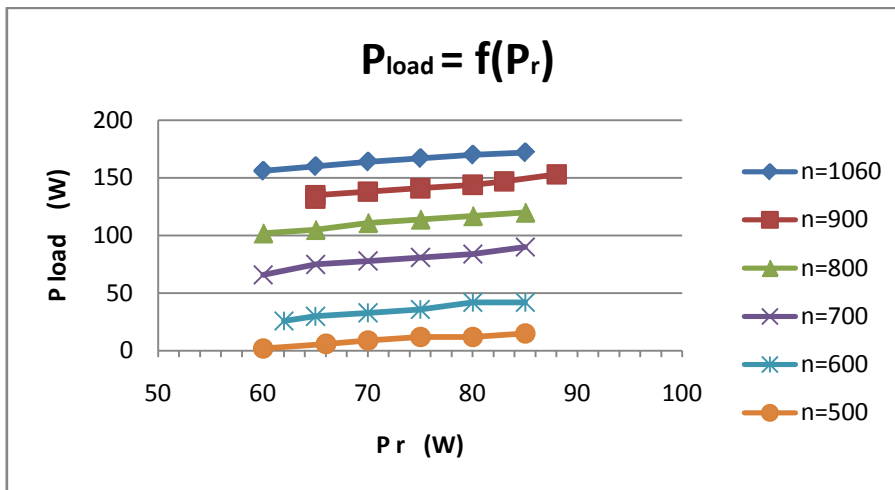
**Γράφημα 4.51** Ισχύς φορτίου συναρτήσει της τάσης διέγερσης σε παράθεση για διάφορες ταχύτητες περιστροφής



**Γράφημα 4.52** Βαθμός απόδοσης της ac γρνήτριας συναρτήσει της τάσης διέγερσης σε παράθεση για διάφορες ταχύτητες περιστροφής



**Γράφημα 4.53** Τάση φορτίου συναρτήσει της τάσης διέγερσης σε παράθεση για διάφορες ταχύτητες περιστροφής

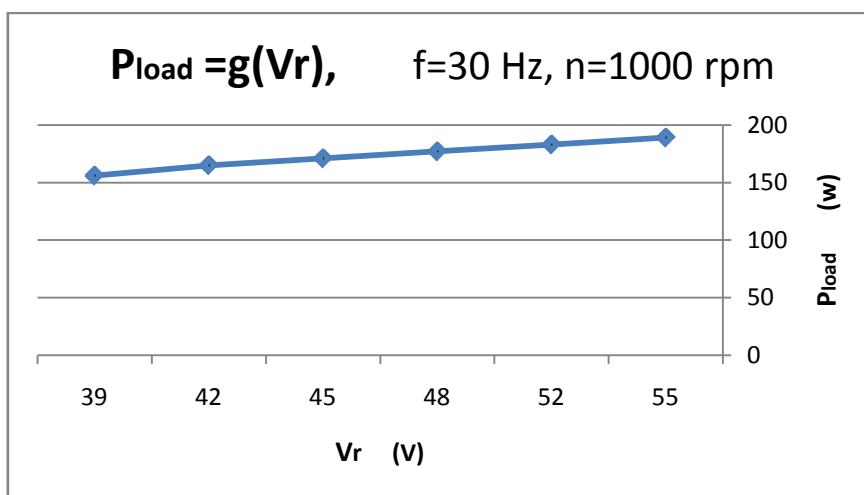


**Γράφημα 4.54** Ισχύς φορτίου συναρτήσει της ισχύος διέγερσης σε παράθεση για διάφορες ταχύτητες περιστροφής

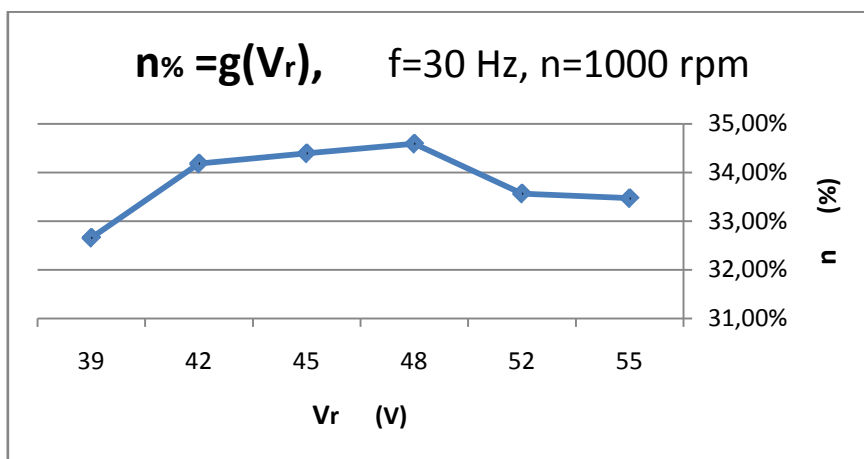
Αμέσως μετά για σταθερή ταχύτητα περιστροφής του dc κινητήρα στις 1000 σαλ κάνουμε καταγραφή των μετρήσιμων μεγεθών ενώ παράλληλα μεταβάλλουμε και τη συχνότητα διέγερσης σε 30, 15, 2, 1 Hz, οι μετρήσεις αυτές φαίνονται στους πίνακες 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 αντίστοιχα, καθώς και για κάθε συχνότητα μεταβάλλουμε την τάση διέγερσης μέσω μετασχηματιστή. Ενώ οι γραφικές που εξάγονται από τους πίνακες φαίνονται στα γραφήματα 4.55 ως 4.70.

**Πίνακας 4.14** Μετρήσεις στις 1000 rpm και για συχνότητα διέγερσης 30 Hz

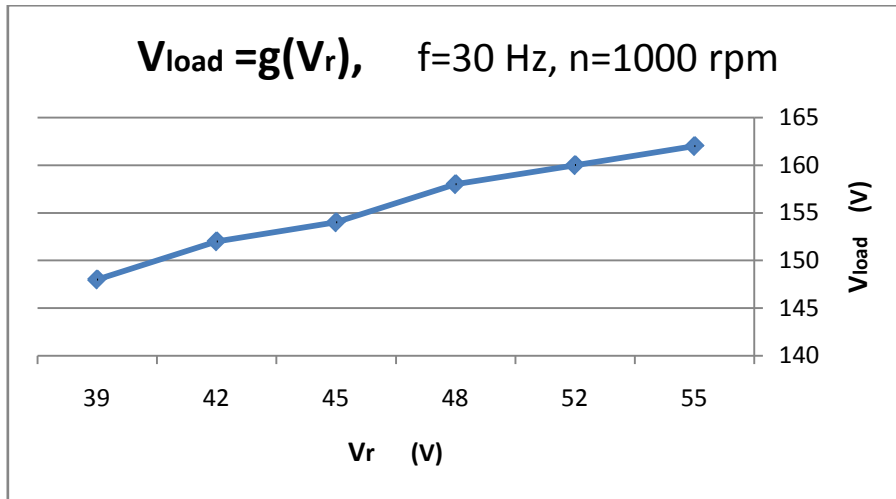
Ζεύγος AC γεννήτριας Siemens και DC κινητήρα AEG														
r=135	ac motor						dc motor							
	Δρομέας (διέγερση)			Φορτίο			Τύμπανο			Διέγερση				
rpm	f	Vr	W*5	I	V	W	Ia	Va	Pa	Is	Vs	Ps	Pdc=Pa+Ps	n(%)
1000	30	55	90	6,4	162	189	2,3	190	437	0,23	164	37,72	474,72	0,334679
		52	80	6	160	183	2,25	190	427,5	0,23	164	37,72	465,22	0,335644
		48	75	5,7	158	177	2,1	190	399	0,23	164	37,72	436,72	0,345892
		45	70	5,5	154	171	2,05	190	389,5	0,23	164	37,72	427,22	0,343912
		42	65	5,5	152	165	2	190	380	0,23	164	37,72	417,72	0,341813
		39	60	5,4	148	156	2	190	380	0,23	164	37,72	417,72	0,326551
αύξηση ρεύματος - ταχύτητας και τάσης dc κινητήρα														



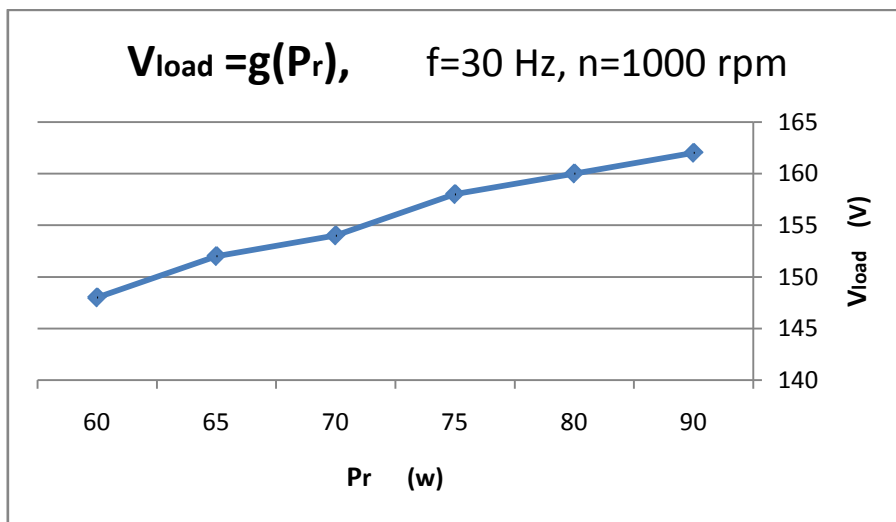
**Γράφημα 4.55** Ισχύς φορτίου συναρτήσει της τάσης διέγερσης



**Γράφημα 4.56** Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της τάσης διέγερσης



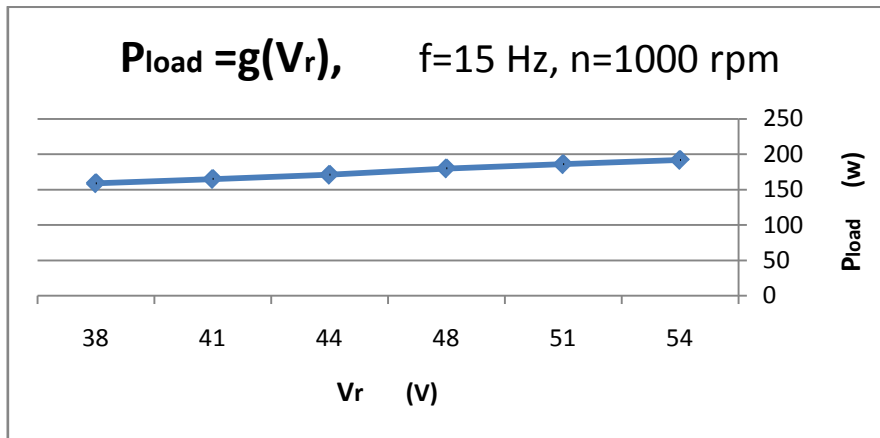
**Γράφημα 4.57** Τάση φορτίου συναρτήσει της τάση διέγερσης



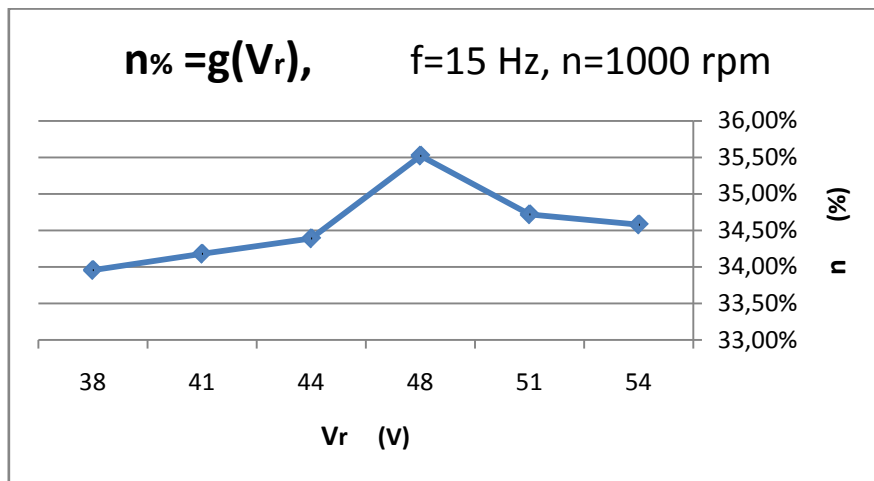
**Γράφημα 4.58** Τάση φορτίου συναρτήσει της ισχύος διέγερσης

**Πίνακας 4.15** Μετρήσεις στις 1000 rpm και για συχνότητα διέγερσης 15 Hz

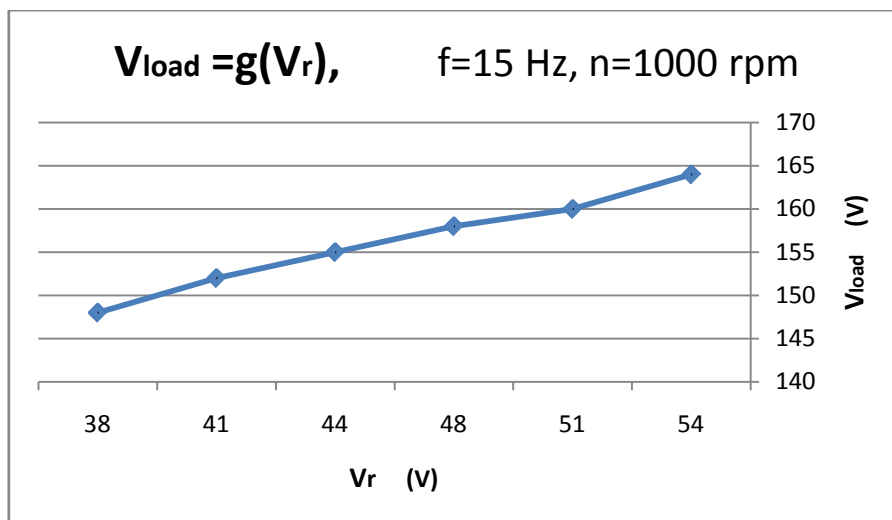
Ζεύγος AC γεννήτριας Siemens και DC κινητήρα AEG														
r=135	ac motor						dc motor							
	Δρομέας (διέγερση)			Φορτίο			Τύμπανο			Διέγερση				
rpm	f	$V_r$	$W^*5$	$I$	$V$	$W$	$I_a$	$V_a$	$P_a$	$I_s$	$V_s$	$P_s$	$P_{dc}$	$n(\%)$
		54	90	6,4	164	192	2,25	190	427,5	0,23	164	37,72	465,22	0,345809
1000	15	51	80	6	160	186	2,2	190	418	0,23	164	37,72	455,72	0,347196
		48	70	5,7	158	180	2,1	190	399	0,23	164	37,72	436,72	0,355226
		44	70	5,6	155	171	2,05	190	389,5	0,23	164	37,72	427,22	0,343912
		41	65	5,4	152	165	2	190	380	0,23	164	37,72	417,72	0,341813
		38	60	5,4	148	159	1,95	190	370,5	0,23	164	37,72	408,22	0,339584



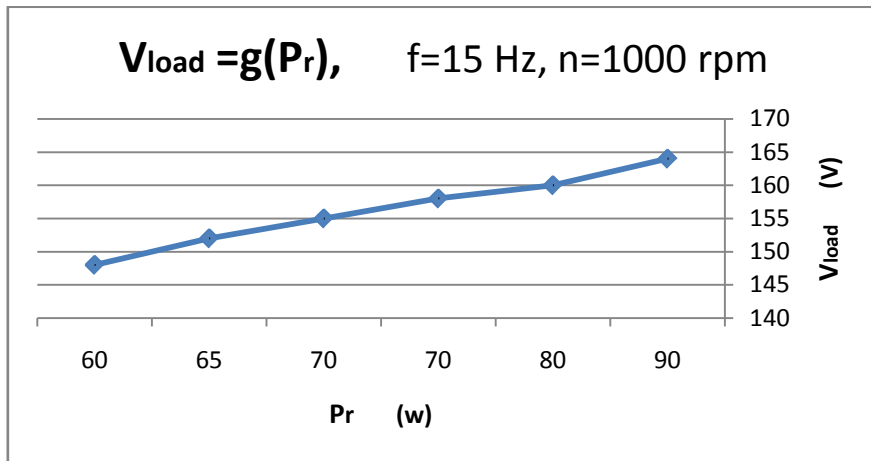
**Γράφημα 4.59** Ισχύς φορτίου συναρτήσει της τάσης διέγερσης



**Γράφημα 4.60** Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της τάσης διέγερσης



**Γράφημα 4.61** Τάση φορτίου συναρτήσει της τάσης διέγερσης

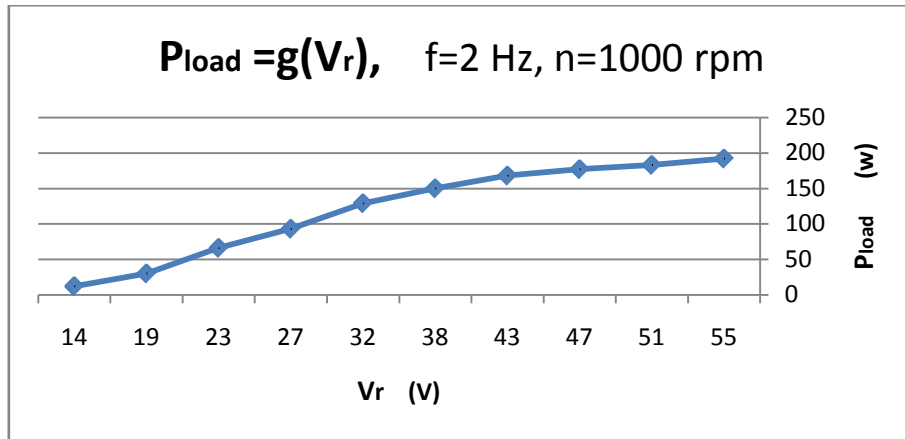


**Γράφημα 4.62** Τάση φορτίου συναρτήσει της ισχύος διέγερσης

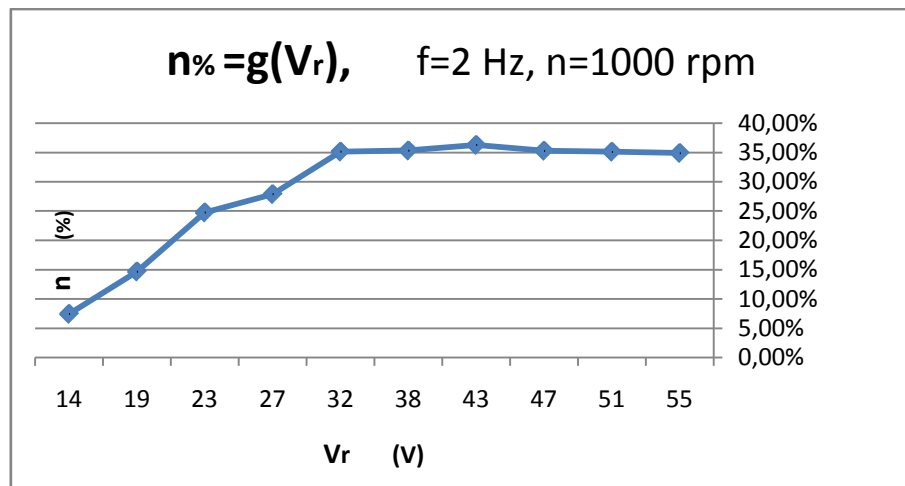
**Πίνακας 4.16** Μετρήσεις στις 1000 rpm και για συχνότητα διέγερσης 2 Hz

Ζεύγος AC γεννήτριας Siemens και DC κινητήρα AEG														
r=135	ac motor						dc motor							
	Δρομέας (διέγερση)			Φορτίο			Τύμπανο			Διέγερση				
rpm	f	Vr	W	I	V	W	Ia	Va	Pa	Is	Vs	Ps	Pdc	n(%)
1000	2	55	85	6,3	162	192	2,25	190	427,5	0,23	164	37,72	465,22	0,348951
		51	75	5,9	160	183	2,15	190	408,5	0,23	164	37,72	446,22	0,351099
		47	65	5,5	158	177	2,1	190	399	0,23	164	37,72	436,72	0,352786
		43	55	5	154	168	1,95	190	370,5	0,23	164	37,72	408,22	0,362679
		38	45	4,4	145	150	1,8	190	342	0,23	164	37,72	379,72	0,353174
		32	35	3,6	134	129	1,55	190	294,5	0,23	164	37,72	332,22	0,351288
		27	30	3	115	93	1,4	190	266	0,23	164	37,72	303,72	0,278677
		23	20	2,4	96	66	1,1	190	209	0,23	164	37,72	246,72	0,247451
		19	15	1,6	68	30	0,8	190	152	0,23	164	37,72	189,72	0,146542
		14	10	1	36	12	0,6	190	114	0,23	164	37,72	151,72	0,074202
αύξηση ρεύματος - ταχύτητας και τάσης dc κινητήρα														

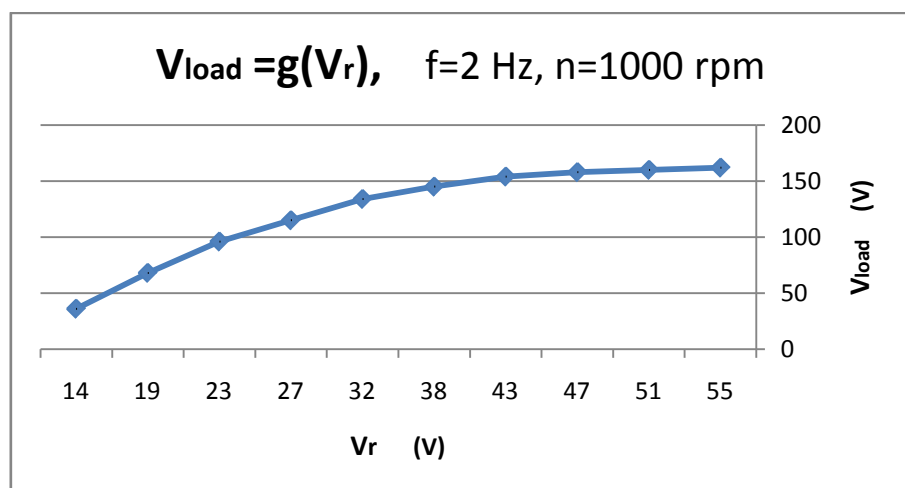




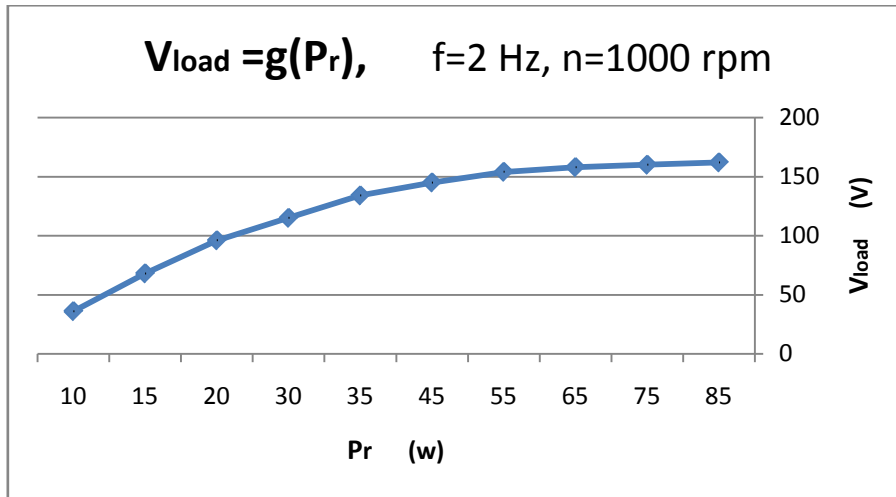
**Γράφημα 4.63** Ισχύς φορτίου συναρτήσει της τάσης διέγερσης



**Γράφημα 4.64** Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της τάσης διέγερσης



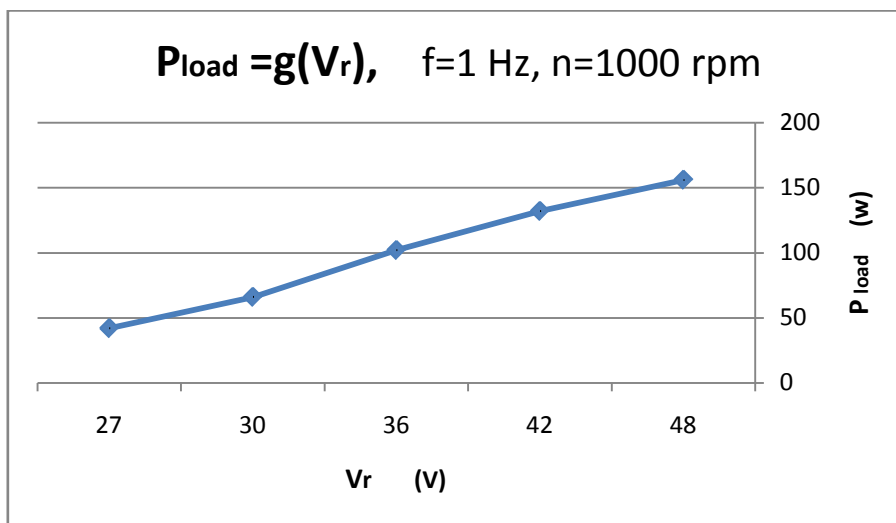
**Γράφημα 4.65** Τάση φορτίου συναρτήσει της τάσης διέγερσης



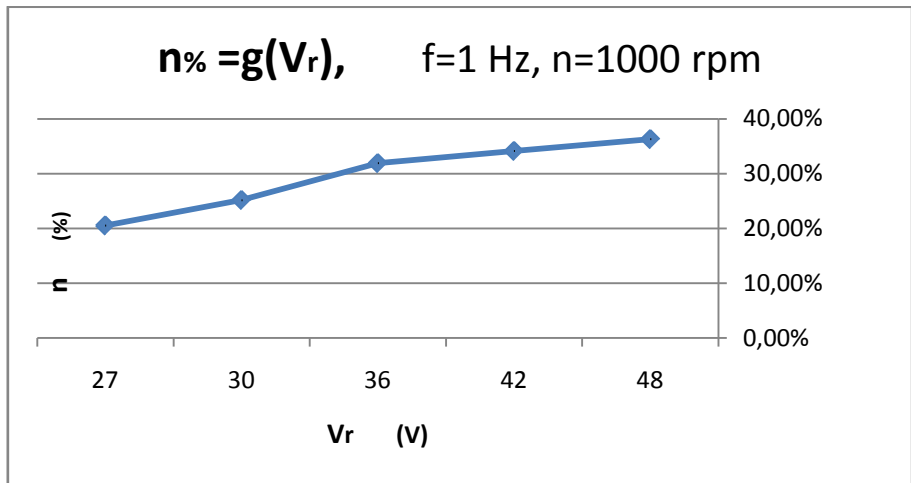
**Γράφημα 4.66** Τάση φορτίου συναρτήσει της ισχύος διέγερσης

**Πίνακας 4.17** Μετρήσεις στις 1000 rpm και για συχνότητα διέγερσης 1 Hz

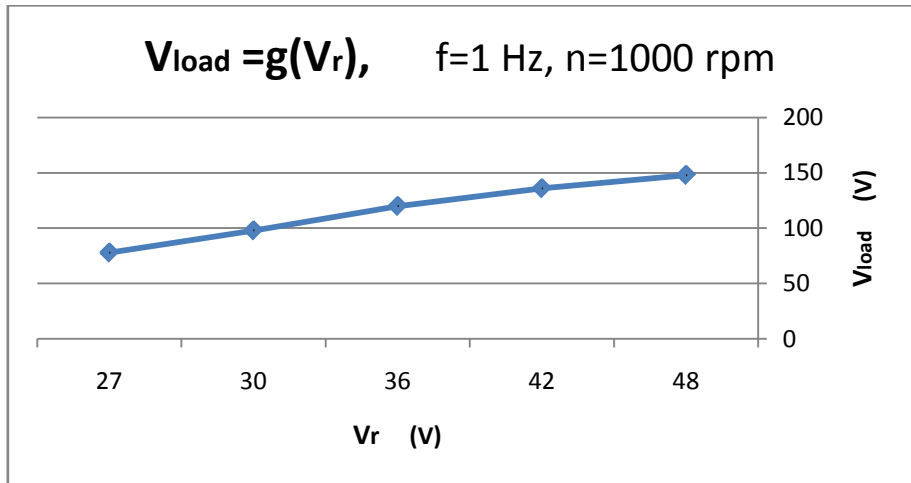
Ζεύγος AC γεννήτριας Siemens και DC κινητήρα AEG														
r=135		ac motor					dc motor							
		Δρομέας (διέγερση)			Φορτίο		Τύμπανο			Διέγερση				
rpm	f	V <sub>r</sub>	W	I	V	W	I <sub>a</sub>	V <sub>a</sub>	P <sub>a</sub>	I <sub>s</sub>	V <sub>s</sub>	P <sub>s</sub>	P <sub>dc</sub> =P <sub>a</sub> +P <sub>s</sub>	η(%)
		48	50	4,4	148	156	1,8	190	342	0,23	164	37,72	379,72	0,363027
1000	1	42	45	3,7	136	132	1,6	190	304	0,23	164	37,72	341,72	0,341332
		36	35	3,1	120	102	1,3	190	247	0,23	164	37,72	284,72	0,319029
		30	25	2,4	98	66	1,05	190	199,5	0,23	164	37,72	237,22	0,251697
		27	15	1,8	78	42	0,8	190	152	0,23	164	37,72	189,72	0,205158



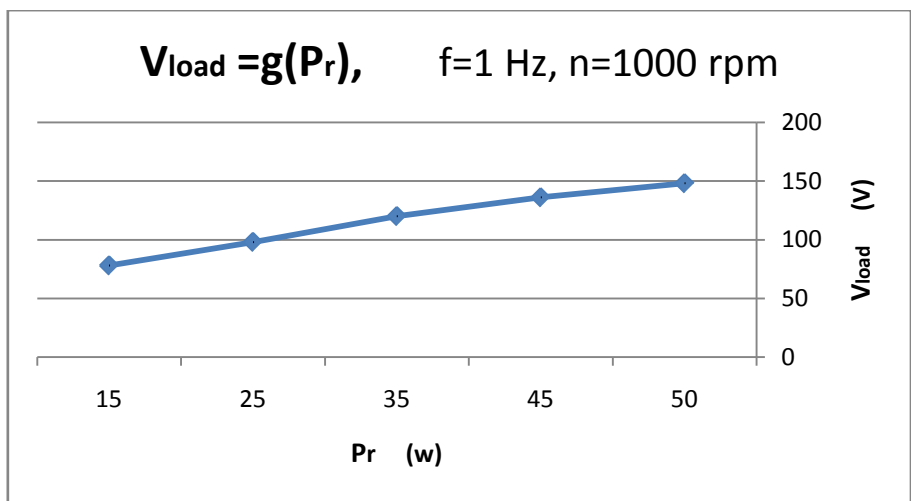
**Γράφημα 4.67** Ισχύς φορτίου συναρτήσει της τάσης διέγερσης



**Γράφημα 4.68** Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της τάσης διέγερσης

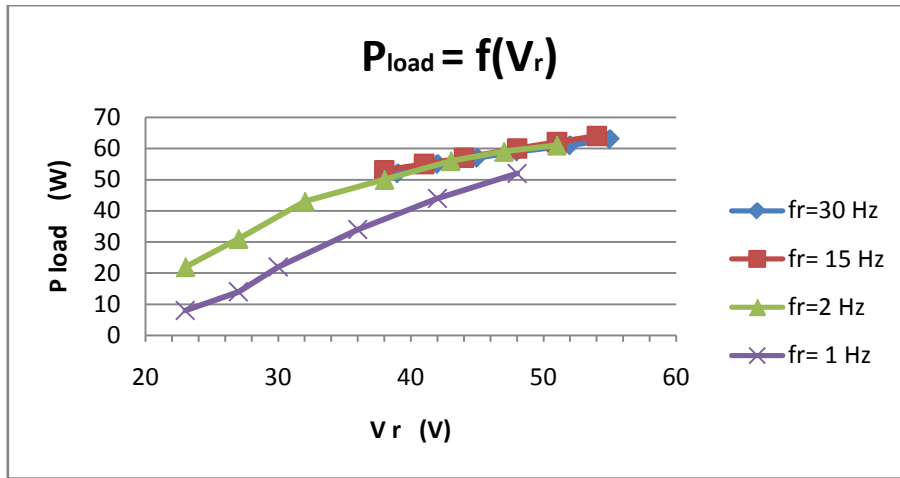


**Γράφημα 4.69** Τάση φορτίου συναρτήσει της τάσης διέγερσης

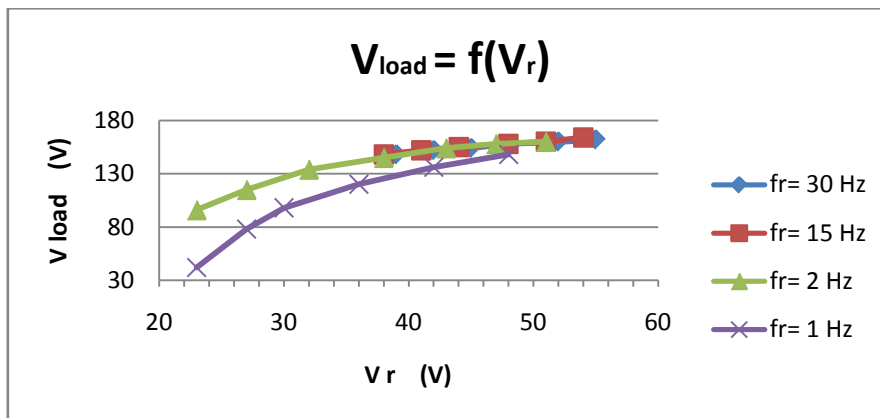


**Γράφημα 4.70** Τάση φορτίου συναρτήσει της ισχύος διέγερσης

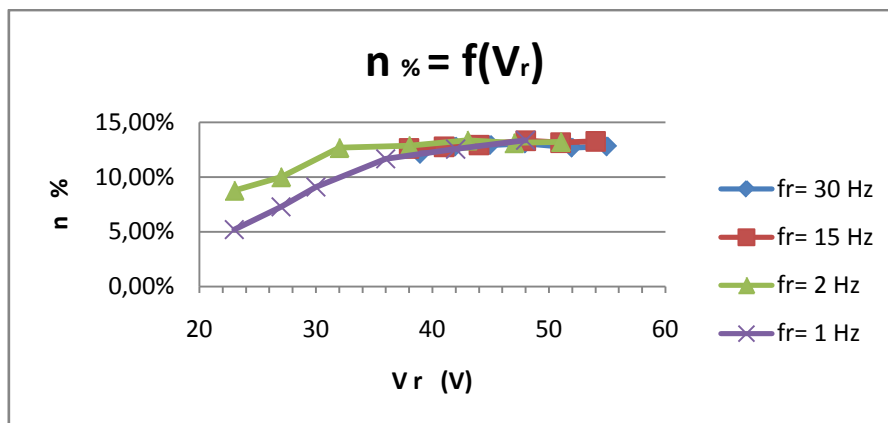
Αμέσως μετά παραθέτουμε σε κοινό διάγραμμα για συγκρίσεις, την ισχύ φορτίου, την τάση φορτίου, τον βαθμό απόδοσης, σε σχέση με την τάση διέγερσης στις διάφορες ταχύτητες περιστροφής, οι γραφικές παραστάσεις φαίνονται στα σχήμα 4.71, 4.72, και 4.73 αντίστοιχα.



**Γράφημα 4.71** Ισχύς φορτίου συναρτήσει της τάσης διέγερσης σε διάφορες συχνότητες



**Γράφημα 4.72** Τάση φορτίου συναρτήσει της τάσης διέγερσης σε διάφορες συχνότητες



**Γράφημα 4.73** Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της τάσης διέγερσης σε διάφορες συχνότητες

**Πίνακας 4.18** Μετρήσεις μεταβάλλοντας την ταχύτητα περιστροφή αντιστρόφως ανάλογα με τη συχνότητα διέγερσης

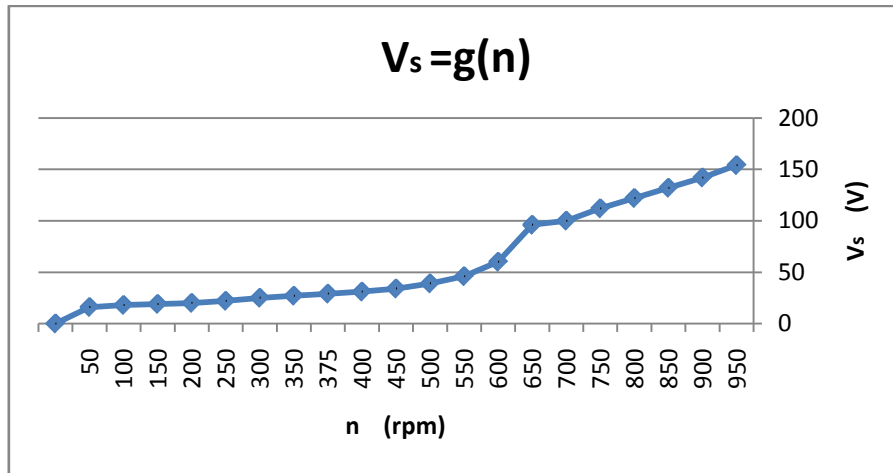
Ζεύγος AC γεννήτριας Siemens και DC κινητήρα AEG															
	ac motor						dc motor								
	Διέγερση (δρομέας)				Στάτης (φορτίο)		Τύμπανο			Διέγερση					Ptotal
rpm	f	Vr	w	lr	v	w	Ia	Va	Pa	Is	Vs	Pf	Pdc		
1060	14,6	54	85	6,4	178	213	2,3	202	464,6	0,25	176	44	508,6	593,6	0,35882
950	18,3	54	85	6,4	154	171	2,3	174	400,2	0,21	154	32,34	432,54	517,54	0,33040
900	20	54	85	6,3	146	153	2,3	162	372,6	0,2	142	28,4	401	486	0,31481
850	21,6	54	85	6,2	138	135	2,2	150	330	0,18	132	23,76	353,76	438,76	0,30768
800	23,3	54	85	6,2	130	120	2,15	140	301	0,17	122	20,74	321,74	406,74	0,29502
750	25	54	85	6,2	120	102	2,1	123	258,3	0,15	112	16,8	275,1	360,1	0,28325
700	26,6	54	85	6,2	110	84	2,1	112	235,2	0,12	100	12	247,2	332,2	0,25286
650	28,3	54	85	6,2	96	66	2,1	98	205,8	0,11	96	10,56	216,36	301,36	0,21900
600	30	54	85	6,1	76	24	2,1	66	138,6	0,1	60	6	144,6	229,6	0,10453
550	31,6	54	85	6	69	12	2	50	100	0,08	46	3,68	103,68	188,68	0,0636
500	33,3	54	85	5,9	62	9	1,9	43	81,7	0,05	39	1,95	83,65	168,65	0,05336
450	35	54	85	5,8	50	6	1,8	39	70,2	0,03	34	1,02	71,22	156,22	0,03840
400	36,6	54	85	5,8	40	3	1,65	34	56,1	0,01	31	0,31	56,41	141,41	0,02121
375	37,5	54	85	5,8	38	3	1,55	32	49,6	0,01	29	0,29	49,89	134,89	0,02224
350	38,3	54	85	5,8	32	3	1,45	30	43,5	0,01	27	0,27	43,77	128,77	0,02329
300	40	54	85	5,8	30	3	1,35	27	36,45	0,01	25	0,25	36,7	121,7	0,02465
250	41,6	54	85	5,8	26	3	1,25	24	30	0,01	22	0,22	30,22	115,22	0,02603
200	43,3	54	85	5,8	24	3	1,15	22	25,3	0,01	20	0,2	25,5	110,5	0,02714
150	45	54	85	5,8	24	3	1,1	21	23,1	0,01	19	0,19	23,29	108,29	0,02770
100	46,6	54	85	5,8	24	3	1,05	19	19,95	0,01	18	0,18	20,13	105,13	0,02853
50	48,3	54	85	5,8	24	3	1	17	17	0,01	16	0,16	17,16	102,16	0,02936

Ακολουθεί το τελευταίο σετ μετρήσεων το οποίο περιλαμβάνει σταθερή τάση διέγερσης, μεταβάλλοντας την ταχύτητα λειτουργίας του dc κινητήρα από 1060 σαλ μέχρι 50 σαλ ενώ ταυτόχρονα μεταβάλουμε αντίστροφα τη συχνότητα λειτουργίας αντίστροφα σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής. Η αύξηση της συχνότητας έχει στόχο αφού προστεθεί στην ταχύτητα περιστροφής της επαγωγικής γεννήτριας να διατηρηθεί στην ονομαστική ταχύτητα περιστροφής (λίγο πάνω).

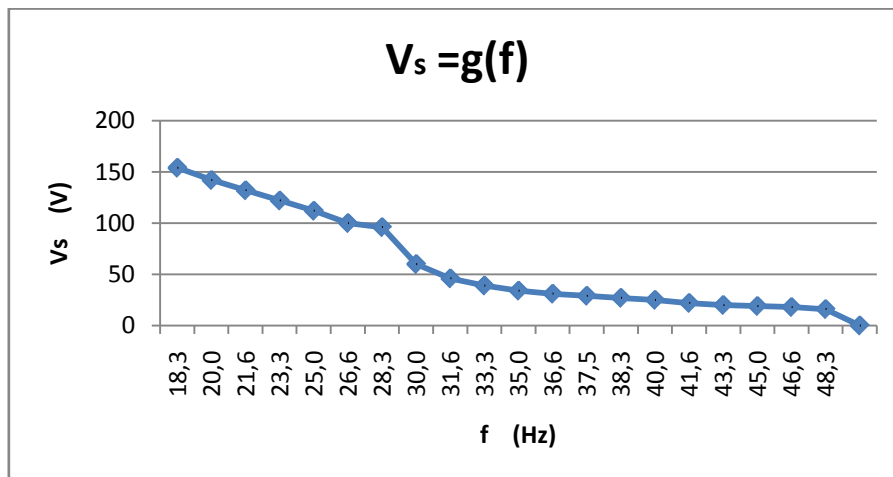
Ο υπολογισμός της συχνότητας σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφή προκύπτει :

$$\omega = \frac{4\pi f}{p}, \text{ όπου } p \text{ ο αριθμός των πόλων της μηχανής.}$$

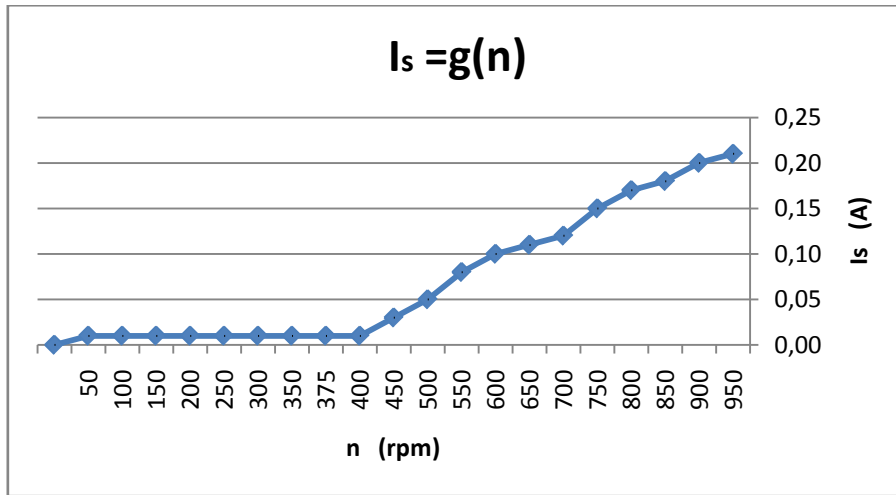
Ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από τις μετρήσεις του πίνακα 4.18, την τάση διέγερσης του dc κινητήρα σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής και τη συχνότητα διέγερσης της ac μηχανής γραφήματα 4.74, 4.75. Τα αντίστοιχα διαγράμματα του ρεύματος διέγερσης στα γραφήματα 4.76 και 4.77. Η ισχύς διέγερσης σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής και συχνότητα διέγερσης στα 4.78 και 4.79 αντίστοιχα. Τις αντίστοιχες γραφικές για την ισχύ αυτή τη φορά εξόδου του στάτη στις 4.80 και 4.81. Τέλος ο βαθμός απόδοσης σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής και την συχνότητα διέγερσης στα σχήματα 4.82 και 4.83.



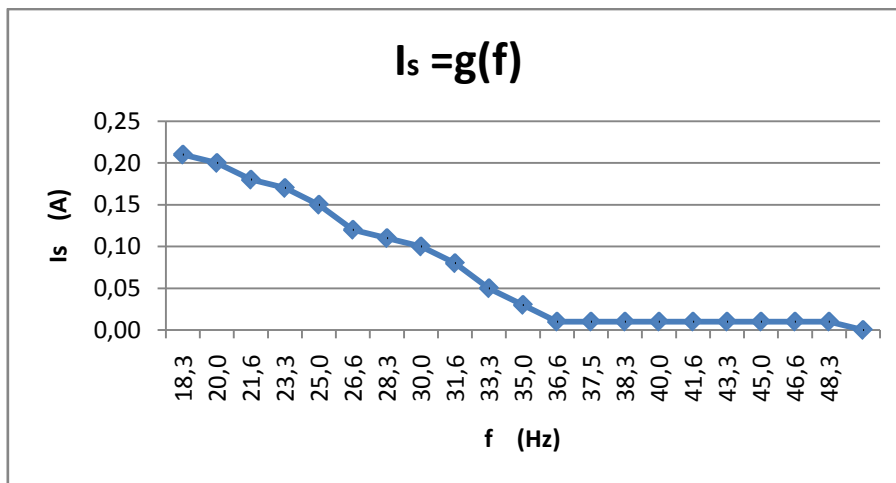
**Γράφημα 4.74** Τάση διέγερσης dc μηχανής συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής



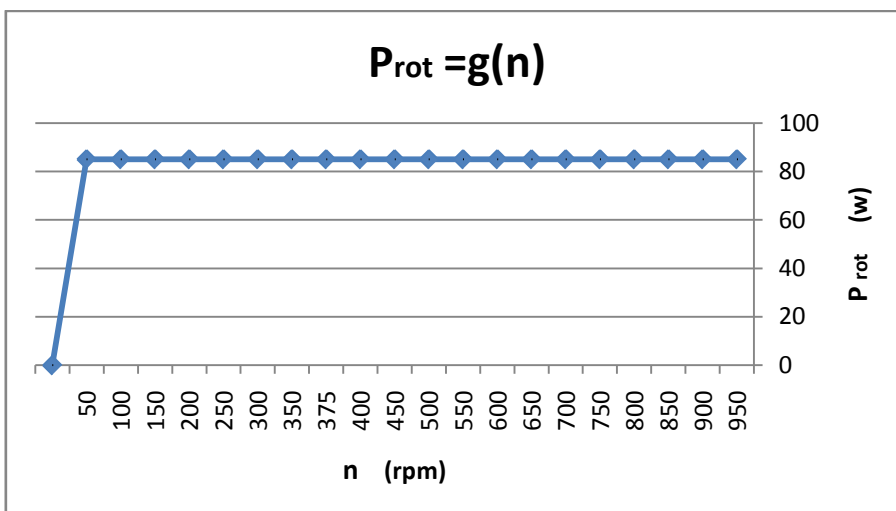
**Γράφημα 4.75** Τάση διέγερσης dc μηχανής συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης



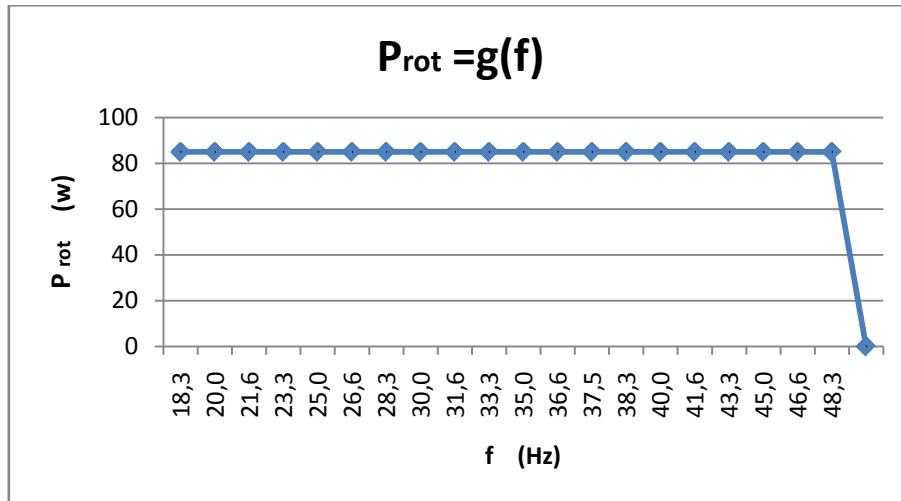
Γράφημα 4.76 Ρεύμα διέγερσης dc μηχανής συναρτήσει ταχύτητας περιστροφής



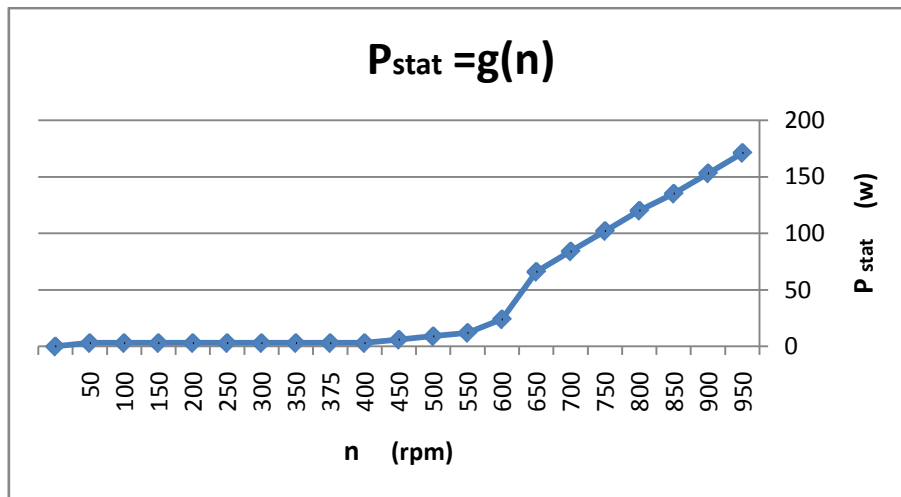
Γράφημα 4.77 Ρεύμα διέγερσης dc μηχανής συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης



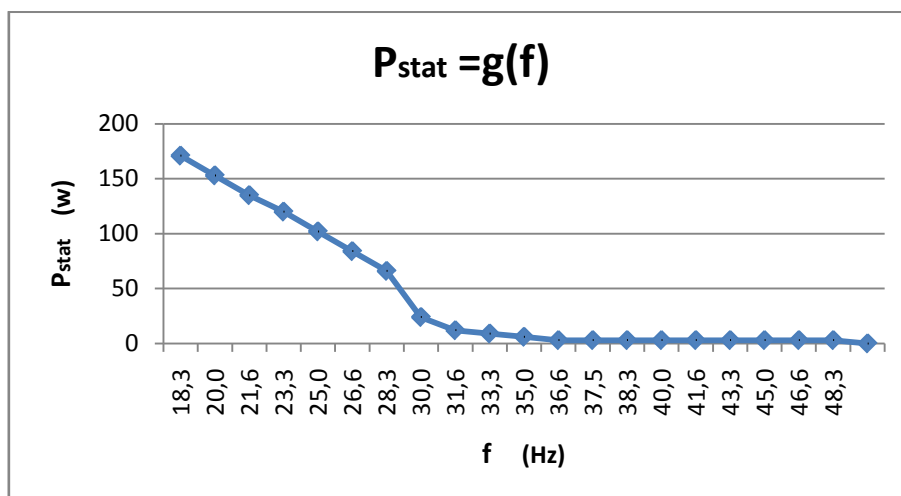
Γράφημα 4.78 Ισχύς διέγερσης συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής



**Γράφημα 4.79** Ισχύς διέγερσης συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης

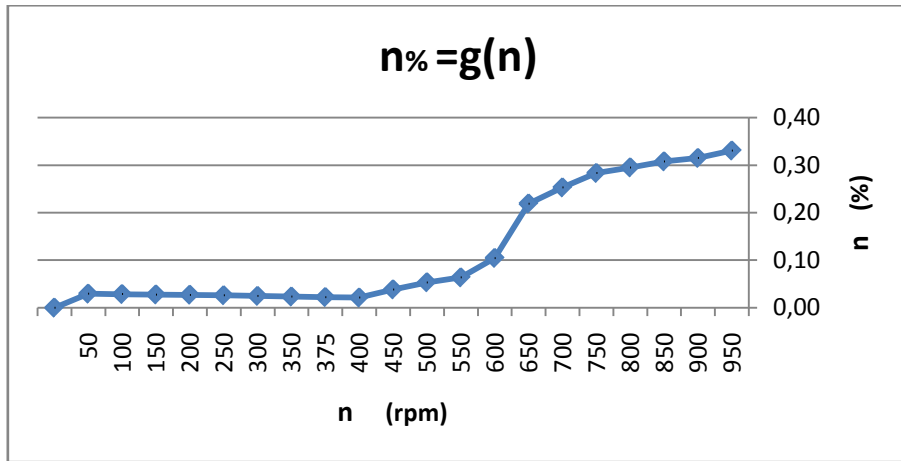


**Γράφημα 4.80** Ισχύς εξόδου συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής

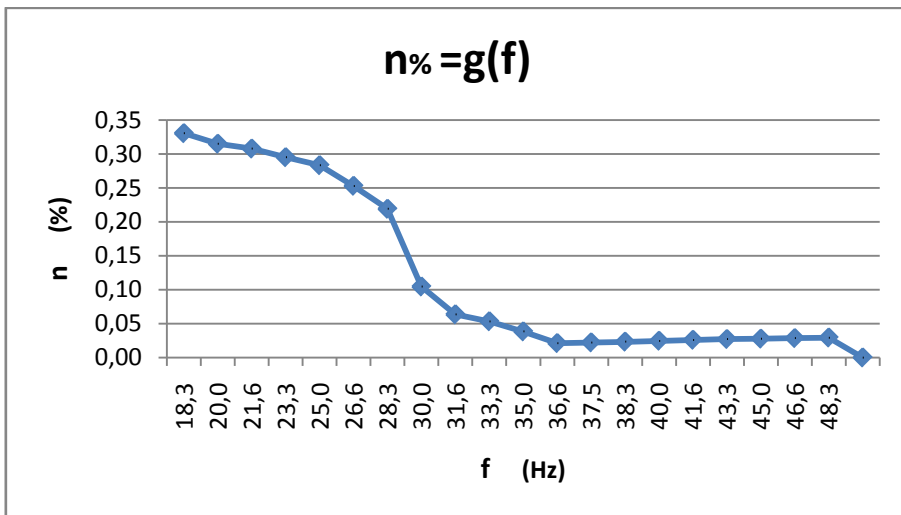


**Γράφημα 4.81** Ισχύς εξόδου συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης





**Γράφημα 4.82** Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής

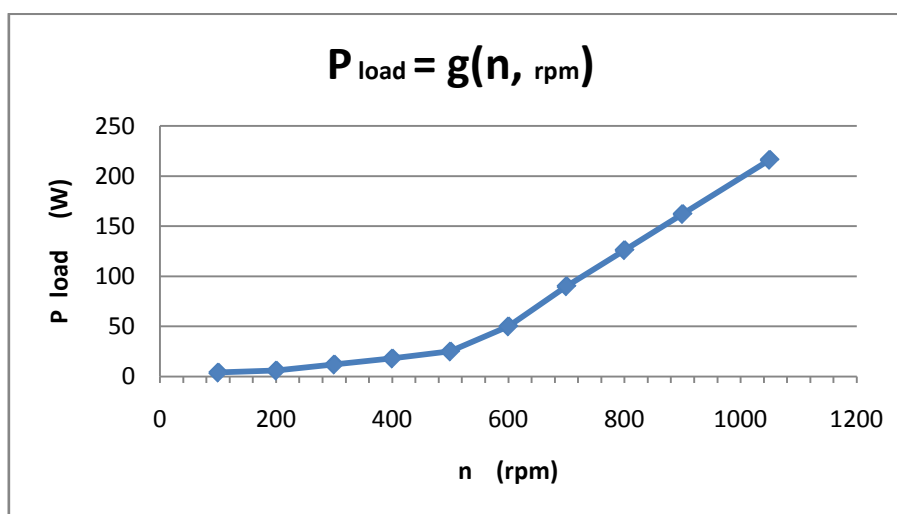


**Γράφημα 4.83** Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης

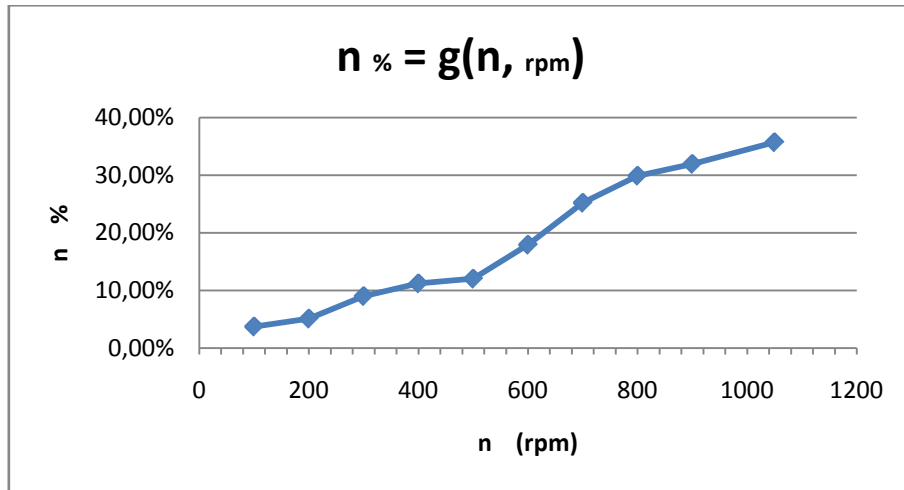
Τέλος ακολουθούν μετρήσεις ενώ μεταβάλλεται η ταχύτητα περιστροφής για συγκεκριμένες συχνότητες διέγερσης 50, 40, 1.4, 1, 0.8 και εικονίζονται στους πίνακες 4.19 ως 4.23. Για κάθε ομάδα από αυτές τις μετρήσεις έγιναν γραφικές παραστάσεις για να παρατηρήσουμε τη σχέση μεταξύ ισχύος φορτίου και ταχύτητας περιστροφής, βαθμού απόδοσης με την ταχύτητα περιστροφής του συστήματος, οι γραφικές απεικονίζονται στα γραφήματα 4.84 ως 4.92.

**Πίνακας 4.19** Μετρήσεις υπό σταθερή τάση (54 V) και συχνότητα (50 Hz) διέγερσης σε διάφορες ταχύτητες περιστροφής

ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ C RPM ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ											
r=135	ac motor						dc motor				
	Δρομέας (διέγερση)			Φορτίο			Τύμπανο		Διέγερση		
rpm	f	Vr	Pr	I	V	P	I	V	I	V	n (%)
1050	50	54	90	6,5	174	216	2,3	204	0,26	175	0,357202
900			90	6,4	15	162	2,3	168	0,21	145	0,319621
800			90	6,4	134	126	2,2	140	0,19	122	0,29916
700			90	6,3	112	90	2,2	114	0,16	100	0,252242
600			90	6,2	82	50	2,2	82	0,11	74	0,179507
500			90	6,1	50	25	2,1	54	0,08	49	0,120587
400			90	6	25	18	1,8	38	0,05	34	0,11243
300			90	5,9	20	12	1,5	28	0,03	26	0,090375
200			90	5,8	15	6	1,2	22	0,02	22	0,051352
100			90	5,8	10	4	1	16	0,02	16	0,037622



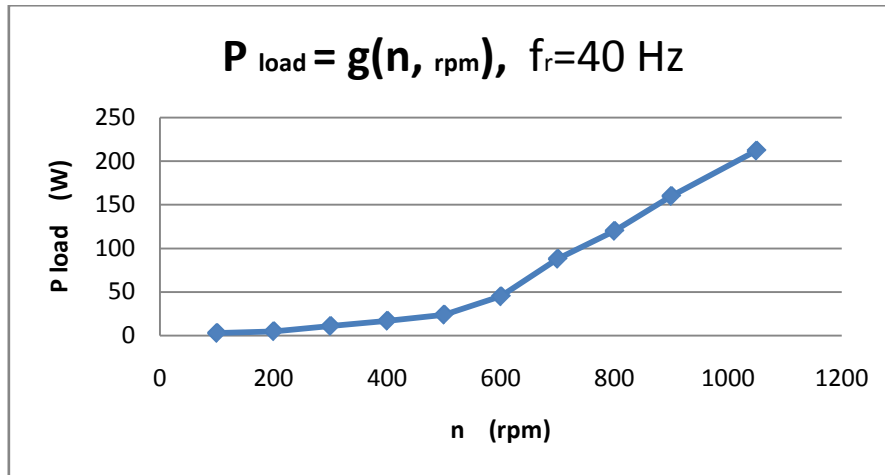
**Γράφημα 4.84** Ισχύς φορτίου συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής



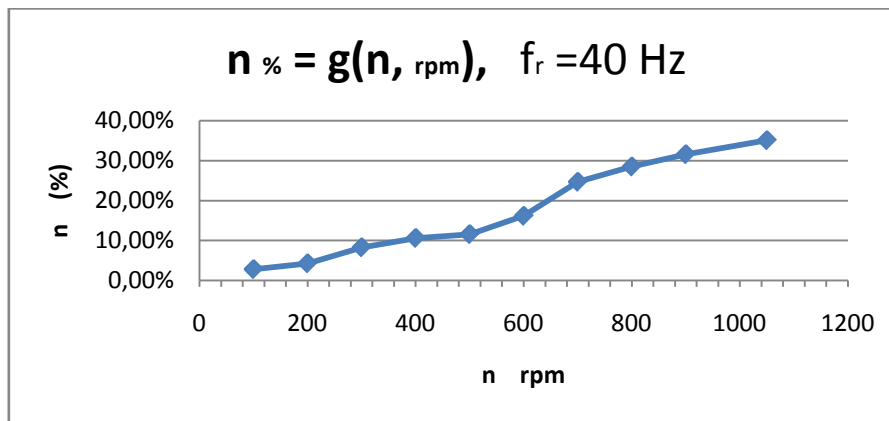
Γράφημα 4.85 Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής

Πίνακας 4.20 Μετρήσεις υπό σταθερή τάση (54 V) και συχνότητα (40 Hz) διέγερσης σε διάφορες ταχύτητες περιστροφής

ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ C RPM ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ											
r=135	ac motor						dc motor				
	Δρομέας (διέγερση)			Φορτίο			Τύμπανο		Διέγερση		
rpm	f	Vr	W*5	I	V	W	I	V	I	V	n (%)
1050	40	54	90	6,5	172	212	2,3	204	0,26	175	0,350587
900			90	6,4	150	160	2,3	168	0,21	145	0,315675
800			90	6,4	134	120	2,2	140	0,19	122	0,284914
700			90	6,3	112	88	2,2	114	0,16	100	0,246637
600			90	6,2	82	45	2,2	82	0,11	74	0,161557
500			90	6,1	50	24	2,1	54	0,08	49	0,115763
400			90	6	25	17	1,8	38	0,05	34	0,106184
300			90	5,9	20	11	1,5	28	0,03	26	0,082844
200			90	5,8	15	5	1,2	22	0,02	22	0,042794
100			90	5,8	10	3	1	16	0,02	16	0,028217



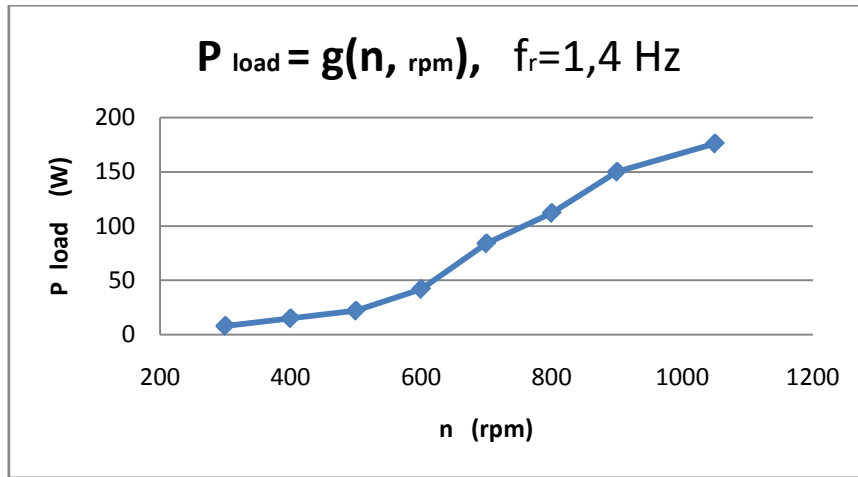
**Γράφημα 4.86** Ισχύς φορτίου συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής



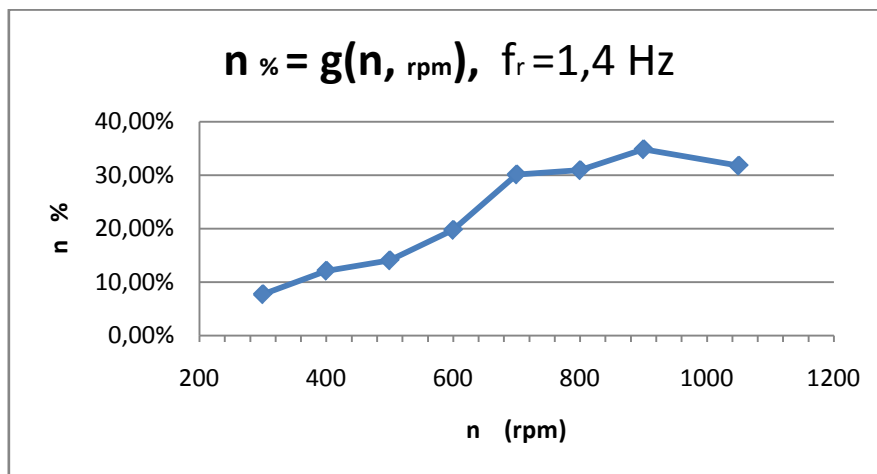
**Γράφημα 4.87** Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής

**Πίνακας 4.21** Μετρήσεις υπό σταθερή τάση (54 V) και συχνότητα (1.4 Hz) διέγερσης σε διάφορες ταχύτητες περιστροφής

ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ C RPM ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ											
r=135	ac motor						dc motor				
	Δρομέας (διέγερση)			Φορτίο			Τύμπανο		Διέγερση		
rpm	f	Vr	W*5	I	V	W	I	V	I	V	n (%)
1050	1,4	54	70	5,4	167	176	2,2	200	0,25	176	0,31769
900			70	5,2	145	150	2,05	162	0,2	142	0,348432
800			70	5	128	112	2	136	0,18	112	0,309256
700			70	4,8	112	84	1,8	108	0,15	96	0,301291
600			70	4,6	92	42	1,7	79	0,12	71	0,19735
500			70	4,4	58	22	1,6	52	0,08	45	0,140306
400			70	4,2	38	15	1,5	35	0,05	31	0,120919
300			70	4	26	8	1,4	24	0,02	23	0,076879



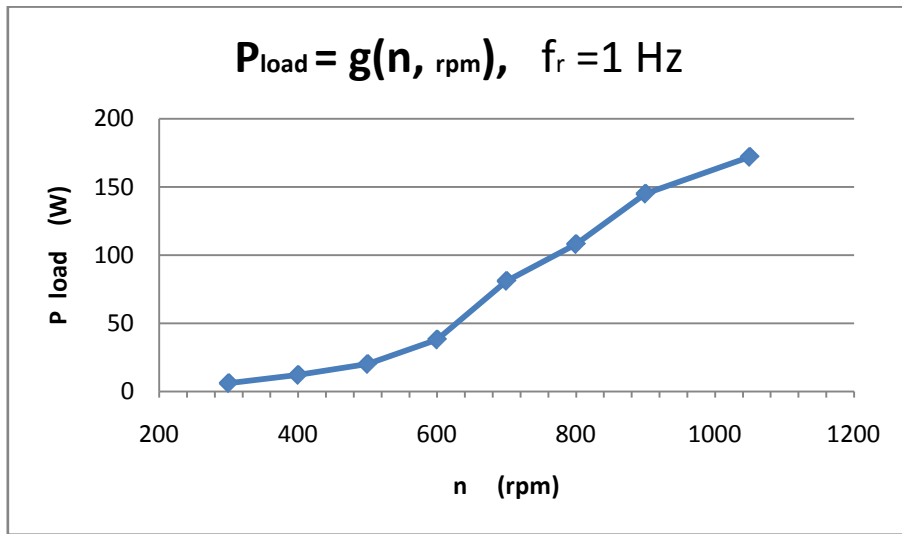
**Γράφημα 4.88** Ισχύς φορτίου συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής



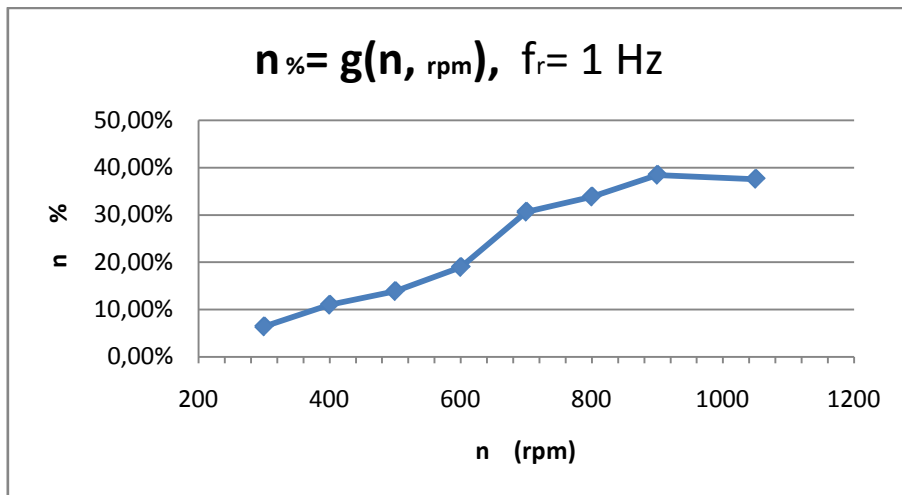
**Γράφημα 4.89** Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής

**Πίνακας 4.22** Μετρήσεις υπό σταθερή τάση (54 V) και συχνότητας (1 Hz) διέγερσης σε διάφορες ταχύτητες περιστροφής

ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ C RPM ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ											
r=135	ac motor						dc motor				
	Δρομέας (διέγερση)		Φορτίο			Τύμπανο		Διέγερση			
rpm	f	Vr	W*5	I	V	W	I	V	I	V	n (%)
1050	1	54	50	4,8	156	172	1,8	202	0,25	176	0,375874
900			50	4,5	135	145	1,8	166	0,2	142	0,384411
800			50	4,2	122	108	1,7	145	0,18	125	0,338558
700			50	4	105	81	1,65	120	0,15	108	0,306586
600			50	3,8	86	38	1,6	88	0,12	78	0,189848
500			50	3,6	53	20	1,6	56	0,08	52	0,139121
400			50	3,3	30	12	1,5	38	0,05	35	0,110345
300			50	3,2	18	6	1,5	28	0,03	28	0,064627



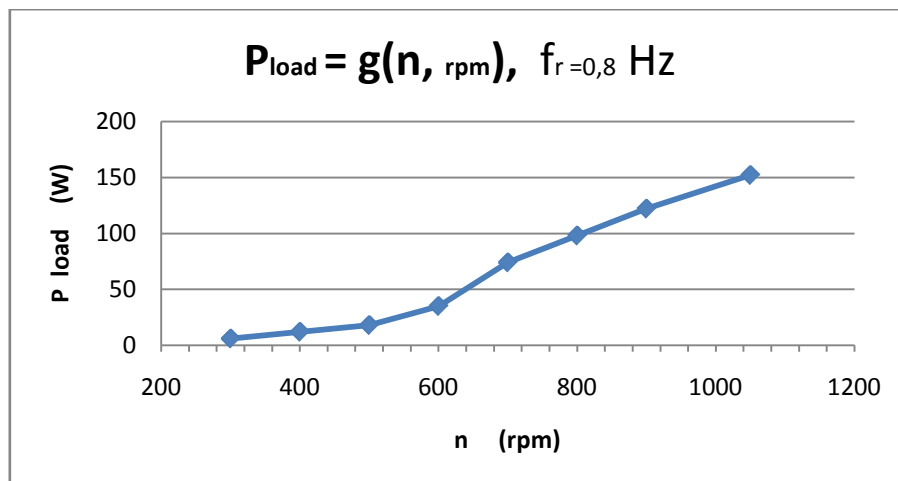
**Γράφημα 4.90** Ισχύς φορτίου συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής



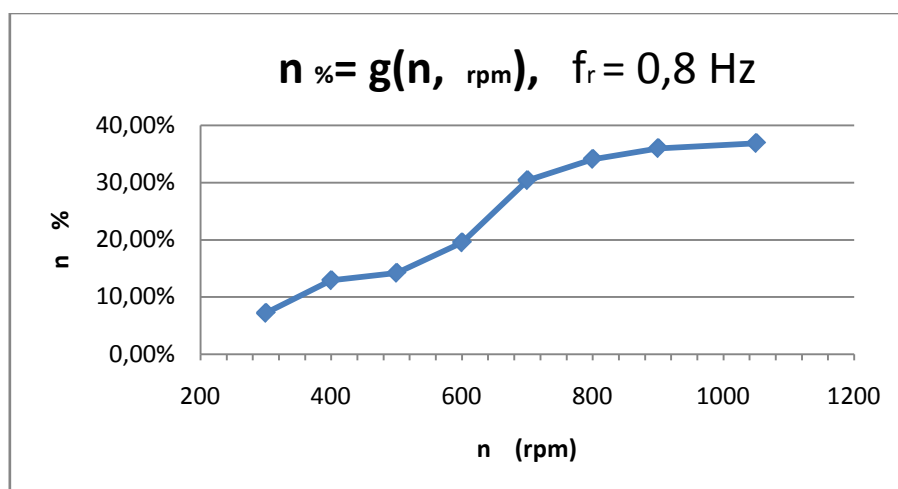
**Γράφημα 4.91** Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής

**Πίνακας 4.23** Μετρήσεις υπό σταθερή τάση (54 V) και συχνότητας (0,8 Hz) διέγερσης σε διάφορες ταχύτητες περιστροφής

ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ C RPM ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ											
r=135	ac motor						dc motor				
	Δρομέας (διέγερση)			Φορτίο			Τύμπανο		Διέγερση		
rpm	f	Vr	Pr	I	V	P	I	V	I	V	n (%)
1050	0,8	54	45	4,8	142	152	1,6	202	0,25	176	0,368753
900			45	4,2	130	122	1,6	166	0,2	142	0,359882
800			45	4	115	98	1,55	142	0,18	124	0,340964
700			45	3,8	102	74	1,55	118	0,15	104	0,303901
600			45	3,7	82	35	1,5	84	0,11	76	0,195138
500			45	3,6	48	18	1,5	52	0,08	48	0,141911
400			45	3,4	24	12	1,45	32	0,05	32	0,129032
300			45	3,4	16	6	1,45	26	0,03	26	0,071874

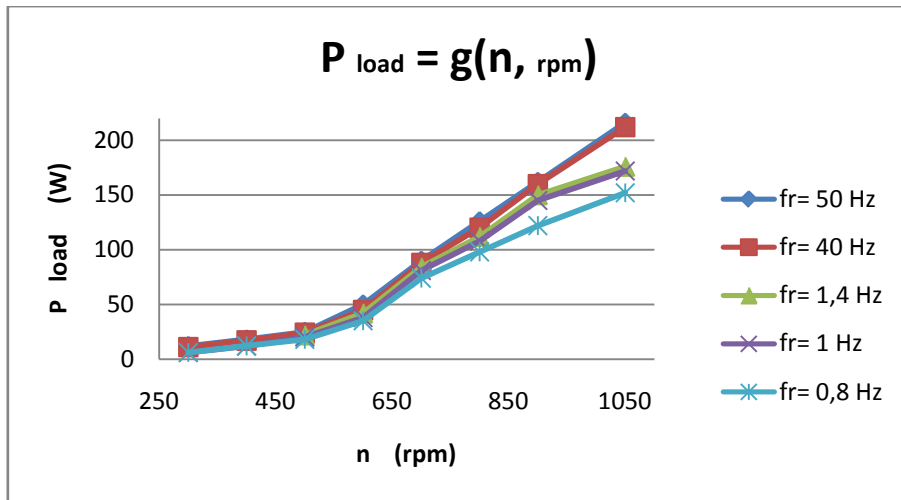


**Γράφημα 4.92** Ισχύς φορτίου συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής

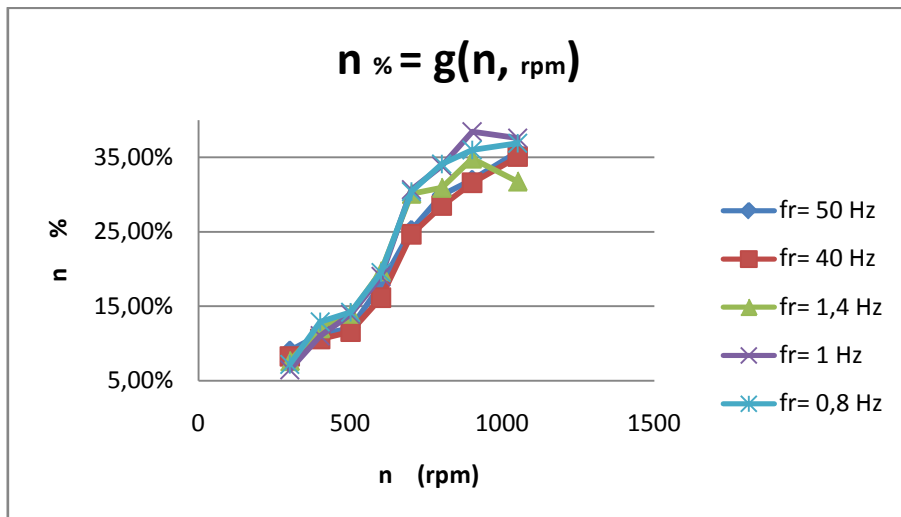


**Γράφημα 4.93** Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής

Από τις παραπάνω θα κάνουμε παραβολή των γραφικών σε κοινό διάγραμμα για τις απαραίτητες συγκρίσεις, των μεγεθών ισχύ φορτίου και βαθμού απόδοσης σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής για τις συγκεκριμένες συχνότητες, όπως φαίνονται στα διαγράμματα 4.94 και 4.95



**Γράφημα 4.94** Σύγκριση γραφικών ισχύος φορτίου – ταχύτητας περιστροφής σε διάφορες συχνότητες περιστροφής



**Γράφημα 4.95** Σύγκριση γραφικών βαθμού απόδοσης – ταχύτητας περιστροφής σε διάφορες συχνότητες διέγερσης



## 5<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### 5.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία αρχικά γίνεται μια συνοπτική αναφορά στο περιβαλλοντικό πρόβλημα που σήμερα αντιμετωπίζει ο πλανήτης. Κατόπιν ανιχνεύουμε τις επιλογές που έχει η ανθρωπότητα για την επίλυση του προβλήματος. Αφού επικεντρωθούμε στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και πιο συγκεκριμένα στην αιολική ενέργεια, εξετάζουμε την περίπτωση της ανεμογεννήτριας επαγωγής διπλής εξόδου (DOIG).

Οι πειραματικές μετρήσεις που παρατέθηκαν παραπάνω έλαβαν μέρος στο Εργαστήριο Συστημάτων Ελέγχου Ηλεκτρικών Μηχανών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών. Οι μετρήσεις μπορούν να διαχωριστούν σ' αυτές που έγιναν κενό φορτίου και κυρίως σ' αυτές υπό φορτίο. Στη δεύτερη περίπτωση η γεννήτρια θεωρείται ότι λειτουργεί αυτόνομα, δηλαδή συνδεδεμένη σε απομονωμένο ηλεκτρικό φορτίο. Οι μετρήσεις αφορούν σε μικρό βαθμό και τα μεγέθη του dc κινητήρα, ο οποίος στην περίπτωσή μας παριστάνει την αιολική δύναμη η οποία και κινεί την γεννήτρια. Η παρατήρηση των μεγεθών αυτών γίνεται κυρίως για την σωστή εποπτεία του dc κινητήρα καθώς μέσω των ηλεκτρικών μεγεθών μεταβάλλουμε την ταχύτητα περιστροφής του συστήματος. Ηλεκτρικά μεγέθη από τα οποία εξάγονται τα βασικά συμπεράσματα προέρχονται από τις μετρήσεις της ac γεννήτριας.

Στην περίπτωση των μετρήσεων κενού φορτίου όπως βλέπουμε στον πίνακα 4.2 αλλά και από τις γραφικές 4.5 και 4.6 βλέπουμε ότι η τάση εξόδου της γεννήτριας επαγωγής κορυφώνεται όταν η τάση διέγερσης είναι στην περιοχή των 40 ως 50 volts, εκτός αυτής της περιοχής η τάση είναι μικρότερη. Αντίστοιχα η συχνότητα διέγερσης είναι μεταξύ 1 Hz και 7 Hz, κάτω από 1 Hz η τάση εξόδου μειώνεται, ενώ πάνω από 7 Hz μέχρι και τα 50 Hz όπου λάβαμε μετρήσεις η τάση μειώνεται κατά ένα μικρό ποσοστό και σταθεροποιείται.

Από τη μεγάλη οικογένεια των υπό 135 Ω φορτίο μετρήσεων τα βασικότερα συμπεράσματα είναι τα ακόλουθα:

Με την ρύθμιση των μεγεθών τάσης και συχνότητας των τυλιγμάτων του δρομέα επιτυγχάνουμε τη ρύθμιση της διέγερσης και κατά συνέπεια των μεγεθών εξόδου της γεννήτριας. Στην περίπτωση που μας αφορά η απαίτηση ενός μικρού, σχετικά με το παραγόμενο ποσό ισχύος, ως άεργο ισχύ, μπορεί και καταστεί συμφέρουσα η λειτουργία της ανεμογεννήτριας (DOIG) σ' ένα μεγάλο εύρος ταχύτητας ανέμου.

Όπως βλέπουμε από τον πίνακα 4.3 αλλά και τις γραφικές παραστάσεις 4.13 και 4.14 η απόδοση της επαγωγικής γεννήτριας μεγιστοποιείται για συχνότητα διέγερσης γύρω στα 2Hz και τάση διέγερσης στην περιοχή των 50 V. Στην λειτουργική αυτή περιοχή η απόδοση τη επαγωγικής μας γεννήτριας μεγιστοποιείται.

Φυσικά ο βαθμός απόδοσης μεγαλώνει καθώς αυξάνεται και η ταχύτητα περιστροφής, καθώς μια επαγωγική γεννήτρια είναι αποδοτικότερη σε ταχύτητες μεγαλύτερες του σύγχρονου αριθμού στροφών της. Στην περίπτωσή μας λόγω κατασκευαστικών περιορισμών δεν μπορούμε να το δούμε εύκολα αυτό, το επιτυγχάνουμε όμως μέσω της έγχυσης άεργου ισχύος από τον δρομέα κατά τη φορά περιστροφής της γεννήτριας.

Η άεργη αυτή ισχύς που απαιτείται για τη λειτουργία της γεννήτριας είναι περίπου σταθερή για ένα μεγάλο εύρος λειτουργίας της γεννήτριας, όπως προκύπτει και από τις γραφικές

παραστάσεις 4.78 και 4.79. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι πολύ σημαντικό διότι έτσι υπολογίζεται η τιμή της απαιτούμενης χωρητικότητας πυκνωτή, σε περίπτωση αυτοδιεγερόμενης επαγωγικής ανεμογεννήτριας.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ

- [1] Μαρία Γ. Ιωαννίδου, ‘Συστήματα Ελέγχου Ηλεκτρικών Μηχανών’, ΕΜΠ, Αθήνα 2003
- [2] Μιχάλης Π. Παπαδόπουλος, ‘Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας’, ΕΜΠ, Αθήνα 1997
- [3] Ιωάννης Ψαρράς, Κωνσταντίνος Πατλιτζιάνας, ‘Διαχείριση Ενέργειας και Περιβαλλοντική Πολιτική’, ΕΜΠ, Αθήνα 2005
- [4] Ιωάννης Α. Τεγόπουλος, ‘Ηλεκτρικές Μηχανές Τόμος Β’, Εκδόσεις Συμμετρία 1991
- [5] Στέφανος Ν. Μανιάς, ‘Ηλεκτρονικά Ισχύος’, Εκδόσεις Συμμετών 2000
- [6] Αρθούρος Ζερβός, ‘Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας’, ΕΜΠ Αθήνα 2004
- [7] Andreas Petersson, Phd ‘Analysis, Modeling and Control of doubly Fed Induction Generators for Wind Turbines’, Division of electric power engineering, Chalmers University of Technology, Sweden 2005
- [8] Robert L. Ames, ‘AC Generators Design and Application’, Research Studies Press 1990
- [9] M. G. Simoes, F.A. Farret, ‘Renewable Energy Systems, Design and Analysis with Induction Generator’, CRC Press 2004
- [10] Stephen J. Chapman, ‘Ηλεκτρικές Μηχανές DC-AC’, Εκδόσεις Τζιόλα 2003
- [11] Hans Rostoen, Tore Undeland, Terje Gjengedal, ‘Doubly fed induction generator in wind turbine’
- [12] E. Muljadi, C. Butterfield, J. Sallan, M. Sanz, ‘Investigation of self-excited induction generators for wind turbine applications’, Phoenix Arizona 1999
- [13] ‘The wind turbine components and operation’, BONUS info Autumm 1999
- [14] Αικατερίνη Μπαξεβάνου, Νικόλαος Βλάχος, ‘Ανασκόπηση μεθόδων μελέτης αεροελαστικότητας μέρος Β: εφαρμογή σε ανεμογεννήτριες’, Τεχνικά Χρονικά Επιστημονικών Εκδόσεων ΤΕΕ, IV, τεύχος 1-2 2004

- [15] Ευάγγελος Τσιμπλοστεφανάκης, Αθανάσιος Σιαφάκας, ‘Δυναμική ανάλυση ασθενούς συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας τροφοδοτούμενου από δηζελογεννήτρια και ανεμογεννήτρια’, Τεχνικά Χρονικά Επιστημονικών Εκδόσεων ΤΕΕ, ΙΙΙ, τεύχος 1-2 2003
- [16] Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ), [www.cres.gr](http://www.cres.gr)
- [17] Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ), [www.rae.gr](http://www.rae.gr)
- [18] Διαχειριστής Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας ΑΕ (ΔΕΣΜΙΕ), [www.desmie.gr](http://www.desmie.gr)
- [19] Ευρωπαϊκή Επιτροπή, <http://ec.europa.eu>
- [20] Eurostat, <http://ec.europa.eu/comm/dgs/eurostat/indexel.htm>
- [21] European wind energy association, [www.ewea.org](http://www.ewea.org)
- [22] World wind energy association, [www.wwindea.org](http://www.wwindea.org)
- [23] Vestas SA, [www.vestas.com](http://www.vestas.com)