



ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
Α.Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ
ΣΧΟΛΗ Τ.Ε.Φ.
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΤΣΙΩΛΗΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ



ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ ΚΑΙ ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΤΟΠΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ



ΜΙΧΕΛΗΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΟΥ

30662

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2012

«Στον πατέρα μου οφείλω το ζην
στον δασκαλό μου το ευ ζην»
ΜΕΓΑΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

Ευχαριστήριο σημείωμα

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέπων καθηγητή της πτυχιακής μου εργασίας κ Τσιώλη Σπυρίδων, καθηγητής εφαρμογών, για την ανάθεση της παρούσας μελέτης και την άριστη συνεργασία μας καθόλη τη διάρκεια τις επιτέλεσής της . Χωρίς την πολύτιμη καθοδήγησή του, η πραγματοποίηση της εργασίας θα ήταν αδύνατη.

ΜΙΧΕΛΗΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν το Αιολικό πάρκο, καθώς και η σύνδεση του με το τοπικό δίκτυο. Σχεδόν αναπόφευκτη καθίσταται η άφιξη του «ενεργειακού χειμώνα» στον πλανήτη μας. Η αιολική ενέργεια, ο άνεμος, υπήρξε μια από τις πρώτες πηγές ενέργειας που χρησιμοποίησε ιστορικά ο άνθρωπος. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται κινητικότητα ως προς τη μελέτη και κατασκευή μεγάλης ισχύος ανεμογεννητριών για την οικονομικότερη παραγωγή ηλεκτρισμού, την παράλληλη λειτουργία ανεμογεννητριών και συμβατικών σταθμών (ντήζελ), με μεγάλη εισδοχή ηλεκτρικής ενέργειας σαν ποσοστό της συνολικής εγκατεστημένης, τον υπολογισμό των αιολικών χαρακτηριστικών και την επιλογή των κατάλληλων θέσεων εγκατάστασης ανεμογεννητριών και αιολικών πάρκων.

Ο υπολογισμός των αιολικών χαρακτηριστικών των υποψηφίων θέσεων προς μελέτη αποσκοπεί στην επιλογή των θέσεων εκείνων οι οποίες πληρούν τα απαραίτητα κριτήρια για την εγκατάσταση, χωροθέτηση, με επιτυχία είτε μεμονωμένων ανεμογεννητριών, είτε αιολικών πάρκων. Επίσης, η εξασφάλιση της οικονομικής ελκυστικότητας αιολικών εγκαταστάσεων καθιστά την αιολική ενέργεια πλήρως ανταγωνιστική στη διεθνή ενεργειακή αγορά.

Οι αιολικές μηχανές αποτελούν ανθρώπινες επινοήσεις, που έχουν σαν σκοπό την αξιοποίηση της κινητικής ενέργειας του ανέμου. Υπάρχουν διάφορες αιολικές μηχανές, οι οποίες παρατίθενται και αναλύονται με βάση τον τύπο και τα χαρακτηριστικά τους. Επιπλέον, μελετάται ο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός για τη βέλτιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ανεμογεννήτρια και από τη σύνδεσή της στο τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο. Τέλος, πραγματοποιείται ένας απολογισμός για την αιολική ενέργεια, τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματα που έχει η αξιοποίησή της.

Λέξεις κλειδιά: Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, Ανεμογεννήτρια, Αιολικό πάρκο, Ηλεκτρική ενέργεια.

Keywords: Renewable energy, wind turbine, wind farm, Electricity energy.



Abstract

In the present study the wind farm and the connection to the local network. Becomes almost inevitable arrival of the "winter energy" in the planet. The wind energy, the wind, was one of the first sources of energy used historical man. Recent years have seen mobility in the design and manufacture of high power wind turbine for the economical production of electricity, while wind turbine operation and conventional power plants (diesel) with high admission electricity as a percentage of total installed, the calculation of wind characteristics and selection appropriate positions installation of wind turbines and wind farms.

The calculation of wind characteristics of candidate sites for consideration to the selection of those positions that meet the necessary criteria for the installation, location, successfully or individual wind turbine or wind farms. Also, to ensure the economic attractiveness of wind facilities makes wind energy fully competitive in the international energy market.

The wind machines are human inventions, which are intended to exploit the kinetic energy of the wind. There are several wind machines, which are listed and analyzed based on the type and characteristics. Moreover, we study the electromechanical equipment for optimal production of electricity from wind turbine and its connection to the local grid. Finally, we conduct an inventory for wind energy, disadvantages and the advantages of its exploitation.

Key words: Renewable energy sources, Wind turbine, Wind farm, Electricity.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ8

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Η Παγκόσμια Ενεργειακή Κατάσταση Και Η Στροφή Στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας10

1.1 Εισαγωγή 11

1.2 Άνθρωπος και Ενέργεια11

1.3 Κύριες Αιτίες Κατασπατάλησης της Ενέργειας12

 1.3.1 Συνεχής αύξηση της κατά κεφαλήν κατανάλωσης ενέργειας12

 1.3.2 Ανομοιομορφία στην παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας13

 1.3.3 Αύξηση του πληθυσμού της γης14

 1.3.4 Απώλειες συστημάτων παραγωγής και μεταφοράς ενέργειας14

 1.3.5 Μη ορθολογική χρήση της ενέργειας14

 1.3.6 Αδιαφορία και σπατάλη ενέργειας15

1.4 Παγκόσμια Ενεργειακή Κατανάλωση15

1.5 Ενέργεια και Περιβάλλον16

1.6 Στροφή στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας17

1.7 Η Αιολική Ενέργεια18

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Κριτήρια Χωροθετησης Αιολικού Πάρκου σε μια Τοπική Κοινωνία19

2.1 Εισαγωγικά20

2.2 Παράγοντες Που Επηρεάζουν Την Επιλογή Θέσεων.....21

 2.2.1 Η σταθερότητα του ανέμου21

 2.2.2 Η αξιοπιστία των αιολικών δεδομένων22

 2.2.3 Τα διάφορα φυσικά και μετεωρολογικά φαινόμενα22

 2.2.4 Η οικονομική βιωσιμότητα της εγκατάστασης23

 2.2.5 Επιπτώσεις στο περιβάλλον24

 2.2.6 Η επίδραση στους κατοίκους της περιοχής24

 2.2.7 Περιορισμοί στην χρήση γης25

2.3 Χρήσιμο Ερωτηματολόγιο Για Την Επιλογή Θέσης Εγκατάστασης Ανεμογεννήτριας.25

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Οικονομική Ανάλυση Εγκατάστασης Αιολικού Πάρκου26

3.1 Εισαγωγή27

3.2 Η Διαχρονική Αξία του Χρήματος27

3.3 Κόστος Αγοράς Αιολικών Μηχανών28

3.4 Κόστος Ίδρυσης μιας Αιολικής Εγκατάστασης30

 3.4.1 Αρχικό κόστος30

 3.4.2 Κόστος αγοράς και εγκατάστασης30

 3.4.3 Κόστος εγκατάστασης31

 3.4.4 Κύριες συνιστώσες κόστους αρχικής επένδυσης31

3.5 Κόστος Συντήρησης και Λειτουργίας Αιολικής Μονάδος32

 3.5.1 Σταθερό κόστος συντήρησης & λειτουργίας32

 3.5.2 Μεταβλητό κόστος συντήρησης και λειτουργίας33

3.6 Έσοδα Λειτουργίας Αιολικών Σταθμών34

3.7 Χρόνος Απόσβεσης-Εξίσωση Νεκρού Σημείου36

3.8 Βαθμός Οικονομικής Απόδοσης-Χρόνος Διπλασιασμού Κεφαλαίου37

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Ανάλυση Αιολικών Μηχανών	39
4.1 Εισαγωγή στην ανάλυση αιολικών μηχανών	40
4.2 Κατάταξη αιολικών μηχανών	40
4.3 Βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη αιολικών μηχανών	43
4.4 τύποι ανεμογεννητριών	45
4.4.1 Τυπικές μορφές Α/Γ οριζοντίου άξονα	45
4.4.2 Τυπικές μορφές Α/Γ κατακόρυφου άξονα	47
4.4.2.1 Χαρακτηριστικά Α/Γ κατακόρυφου άξονα τύπου Savonius	47
4.4.2.2 Χαρακτηριστικά Α/Γ κατακόρυφου άξονα τύπου Darrieus	48
4.5 Υποσυστήματα Α/Γ οριζοντίου άξονα	49

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

Μελέτη Συστήματος Για Τη Βέλτιστη Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας Από Την Ανεμογεννήτρια Και Τη Σύνδεση Της Στο Τοπικό Ηλεκτρικό Δίκτυο	60
5.1 Εισαγωγή	61
5.2 Άνεμος	62
5.2.1 Μέτρηση ταχύτητας και διεύθυνσης του ανέμου	63
5.2.2 Στατιστική ανάλυση της ταχύτητας του ανέμου – κατανομή Weibull	66
5.2.3 Θεωρητική ενέργεια από τον άνεμο	69
5.2.4 μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος πάνω από το έδαφος	71
5.3 Γενική μελέτη υποσυστημάτων Α/Γ για τη βέλτιστη εκμετάλλευση της ισχύος του αέρα	73
5.4 Συστήματα αποθήκευσης της αιολικής ενέργειας	77
5.5 Παράλληλη λειτουργία Α/Γ με το Σ.Η.Ε.	80
5.6 Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ηλεκτρικό δίκτυο.....	81
5.7 Προσομοίωση συστήματος σύνδεσης με το δίκτυο.....	85
5.7.1 Προσομοίωση σύνδεσης μονοφασικού αντιστροφέα με το δίκτυο (χωρίς Μ/Σ).....	85
5.7.2 Προσομοίωση σύνδεσης μονοφασικού αντιστροφέα με το δίκτυο (χωρίς Μ/Σ).....	88
5.8 Συμπεριφορά του συστήματος σε μεταβολή της αναφοράς του ρεύματος.....	89
5.9 Σχεδίαση και ανάλυση του βρόχου ελέγχου του ρεύματος στο πεδίο του LAPLACE...91	
5.10 Προτεινόμενο σύστημα μεταβλητών στροφών-σταθερής συχνότητας για τη σύνδεση ανεμογεννήτριας με το δίκτυο.....	91
5.11 Σχεδιασμός του συστήματος.....	92

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

Κέρδη Επιπτώσεις Συμπεράσματα Από Την Εκμετάλλευση Αιολικής Για Την Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	94
6.1 Μειονεκτήματα Αξιοποίησης της Αιολικής Ενέργειας	95
6.2 Πλεονέκτημα Αξιοποίησης της Αιολικής Ενέργειας	96
6.3 Επιπτώσεις Αξιοποίησης Της Αιολικής Ενέργειας	97
6.4 Το Περιβαλλοντικό Κέρδος Από Τα Αιολικά Πάρκα	101
6.5 Προδιαγραφές Για Μ.ΕΠ. Αιολικών Πάρκων	101
6.6 Συμπέρασμα	102
Βιβλιογραφία	103

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Παράρτημα Α	105
Απόδειξη του αεροδυναμικού βαθμού απόδοσης C_p	
Παράρτημα Β	107
Μονάδες	107
Πυκνότητα αέρα υπό σταθερή ατμοσφαιρική πίεση	107
Τάξη εδάφους	108
Ισχύς ανέμου	110
Παράρτημα Γ	111
Αρχιτιόλεξα πτυχιακής	

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο ηλεκτρισμός είναι σήμερα η πιο γενικευμένη μορφή ενέργειας σε παγκόσμια κλίμακα, η συνεχώς αυξανόμενη ζήτησή του, κυρίως στις αναπτυσσόμενες χώρες και η παράλληλη μείωση των αποθεμάτων των συμβατικών καυσίμων (πετρέλαιο, άνθρακας, κλπ), πάνω στα οποία στηρίχθηκε παραδοσιακά η παραγωγή του, οδηγεί την ανθρωπότητα σε διλήμματα και προβληματισμό σχετικά με το μέλλον και την δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών αναγκών.

Η ενεργειακή κρίση των αρχών της δεκαετίας του '70 και η παρατεταμένη αστάθεια στην αγορά πετρελαίου κατά τη δεκαετία του '80 κατέστησε σαφή την αναγκαιότητα απεξάρτησης των βιομηχανικών κρατών από το πετρέλαιο. Οι εναλλακτικές λύσεις που για πολλά χρόνια είχαν περιορισμένο ερευνητικό κυρίως ενδιαφέρον, βρέθηκαν και πάλι στη πρώτη γραμμή της επικαιρότητας. Οι ανανεώσιμες μορφές ενέργειας, που περιλαμβάνουν την αιολική, την ηλιακή, την γεωθερμική, την ενέργεια από υδατοπτώσεις, από βιομάζα και από κύματα αποτελούν πλέον τη λύση για το ενεργειακό πρόβλημα του πλανήτη.

Παράλληλα, τα συνεχή ατυχήματα στους σταθμούς πυρηνικής ενέργειας ενδυναμώνει την τάση προς ευρύτερη χρήση των ήπιων μορφών, λόγω της φιλικότητάς τους προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο. Τέλος, το ανεξάντλητο της φύσης αυτών των πηγών και η δυνατότητά τους να υπερχαλύψουν τις παγκόσμιες ανάγκες σε ενέργεια είναι ένα επιπλέον κίνητρο προς περαιτέρω μελέτη και αξιοποίησή τους.

Η κατάσταση όπως παρουσιάζεται σήμερα είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντική. Οι περισσότερες ανεπτυγμένες χώρες επενδύουν σημαντικά ποσά προς την κατεύθυνση αυτή, επιδιώκοντας την βελτίωση των υπαρχόντων συστημάτων ανανεώσιμων μορφών ενέργειας και τον σχεδιασμό νέων με καλύτερα αποτελέσματα κυρίως από πλευράς οικονομικότητας και απόδοσης. Ο αντικειμενικός στόχος είναι η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τέτοια συστήματα να γίνει συγκρίσιμη τόσο από πλευράς κόστους, όσο και από πλευράς αξιοπιστίας με την αντίστοιχη των συμβατικών συστημάτων παραγωγής.

Η αιολική ενέργεια, ο άνεμος, υπήρξε μια από τις πρώτες πηγές ενέργειας που χρησιμοποίησε ιστορικά ο άνθρωπος. Ένα απλό παράδειγμα που δείχνει την ευρύτατη εφαρμογή του ανέμου στις καθημερινές ανάγκες της ζωής, είναι τα ιστιοφόρα πλοία καθώς και οι γραφικοί ανεμόμυλοι των διαφόρων νησιών(βλ. εικ. 1.1).



Εικόνα 1.1 Άποψη από παραδοσιακό ανεμόμυλο

Η γενίκευση της χρήσης του ηλεκτρισμού ανέκοψε αυτή την πανάρχαια σχέση ανθρώπου – ανέμου, χωρίς όμως να την αποκόψει οριστικά. Αντίθετα, πρόσφατα άρχισε να υπάρχει έντονο ενδιαφέρον για την εφαρμογή της αιολικής ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρισμού. Ήδη έχουν γίνει σημαντικά βήματα προς την κατεύθυνση αυτή.

Η κινητικότητα των τελευταίων χρόνων επικεντρώνεται κυρίως σε τρεις άξονες:

i) Στην μελέτη και κατασκευή μεγάλης ισχύος ανεμογεννητριών για την οικονομικότερη παραγωγή ηλεκτρισμού. Οι μηχανές αυτές είναι συνδεδεμένες με το ηλεκτρικό σύστημα, είτε μεμονωμένες, είτε σε μορφή συστοιχιών, που ονομάζονται αιολικά πάρκα.

ii) Στην παράλληλη λειτουργία ανεμογεννητριών και συμβατικών σταθμών (ντήζελ), με μεγάλη εισδοχή ηλεκτρικής ενέργειας σαν ποσοστό της συνολικής εγκατεστημένης. Η περίπτωση μικρών και απομονωμένων ηλεκτρικών συστημάτων έχει μεγάλο ενδιαφέρον, λόγω της ιδιομορφίας του Ελληνικού χώρου, με τα νησιά, τα περισσότερα των οποίων δεν έχουν διασύνδεση με το κύριο δίκτυο.

iii) Στον υπολογισμό των αιολικών χαρακτηριστικών και την επιλογή των κατάλληλων θέσεων εγκατάστασης ανεμογεννητριών και αιολικών πάρκων, χρησιμοποιώντας δεδομένα μακροχρόνιων μετρήσεων μετεωρολογικών σταθμών. Η διαδικασία αυτή είναι περισσότερο γνωστή με τον αγγλικό όρο *siting*.

Το πρόβλημα του καθορισμού των αιολικών χαρακτηριστικών μιας τοποθεσίας επιλύεται από την μετεωρολογία με την ανάπτυξη φυσικών μοντέλων, τα οποία αξιοποιούν τις μετρήσεις της ταχύτητας και διεύθυνσης του ανέμου σε μια τοποθεσία, υπολογίζοντας τον γεωστροφικό άνεμο της περιοχής. Ως γεωστροφικός ονομάζεται ο άνεμος ο οποίος είναι πλέον ανεπηρέαστος από τις επιδράσεις του εδάφους και των διαφόρων εμποδίων της συγκεκριμένης τοποθεσίας. Ο άνεμος αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των αιολικών χαρακτηριστικών άλλων τοποθεσιών, λαμβάνοντας υπόψη τον περιβάλλοντα χώρο τους (έδαφος, εμπόδια, ορογραφία). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται ευρύτατα στην διαδικασία επιλογής θέσεων, αν και συχνά παρουσιάζονται δυσκολίες στην εύρεση των αιολικών στοιχείων μιας τοποθεσίας, κυρίως σε πολύπλοκη τοπογραφία.

Η διαδικασία επιλογής και αξιολόγησης θέσεων για εγκατάσταση ανεμογεννητριών και αιολικών πάρκων βασίζεται τόσο στην υπολογιζόμενη πυκνότητα ισχύος της τοποθεσίας όσο και στην εμπειρία του μηχανικού που θα λάβει την τελική απόφαση. Συχνά η πυκνότητα ισχύος δεν είναι το μόνο κριτήριο αξιολόγησης. Ένας έμπειρος μηχανικός πρέπει να επισκεφτεί την υποψήφια θέση, να εξετάσει προσεκτικά τη μορφή του εδάφους και του γύρω χώρου για τυχόν εμπόδια, να συνυπολογίσει την επίδραση που θα έχουν οι ανεμογεννήτριες τόσο στο φυσικό περιβάλλον και στον άνθρωπο (θόρυβος, αισθητική κλπ) καθώς και την αβεβαιότητα και την αξιοπιστία των μεθόδων υπολογισμού του αιολικού δυναμικού.

Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας εξετάζονται οι ανάγκες οι οποίες οδήγησαν τους ανθρώπους και τις χώρες τους στην στροφή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και κυριότερα στην αιολική. Στο δεύτερο κεφάλαιο εξετάζονται όλα εκείνα τα κριτήρια τα οποία λαμβάνονται υπόψη για την χωροθέτηση μιας ανεμογεννήτριας ή ενός αιολικού πάρκου. Στη συνέχεια στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη οικονομική ανάλυση εγκατάστασης αιολικού πάρκου. Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των αιολικών μηχανών με βάση τον τύπο και τα χαρακτηριστικά τους. Μια πιο λεπτομερής ανάλυση της αιολικής μηχανής οριζοντίου άξονα τύπου έλικας και των υποσυστημάτων της ο οποίος είναι και ο επικρατέστερος τύπος στις μέχρι τώρα εφαρμογές. Στο πέμπτο κεφάλαιο μελετάται ο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός της ανεμογεννήτριας για την καλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την Α/Γ. Τέλος στο έκτο κεφάλαιο γίνεται ένας απολογισμός για την αιολική ενέργεια, τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματα που έχει η αξιοποίησή της.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Η ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ Η ΣΤΡΟΦΗ ΣΤΙΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

§ 1.1 Εισαγωγή

Η αντικατάσταση εκ μέρους του ανθρώπου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, από τα συμβατικά και μη ανανεώσιμα καύσιμα και η σπάταλη και αλόγιστη κατανάλωσή τους, θέτει σε κίνδυνο τη μελλοντική εξασφάλιση του βιοτικού επιπέδου του ανθρώπου. Η συνεχής αύξηση της κατά κεφαλήν κατανάλωσης ενέργειας, σε συνδυασμό με την έντονη ανομοιομορφία της ενεργειακής ζήτησης στις διάφορες περιοχές του πλανήτη, εγγυώνται τη διατήρηση υψηλών ρυθμών κατανάλωσης ενέργειας και κατά τα επόμενα χρόνια. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψιν τις τεχνολογικά αναπόφευκτες σήμερα απώλειες ενέργειας στα συστήματα παραγωγής και μεταφοράς, καθώς και τη μη ορθολογική χρήση της ενέργειας, όπως και την αδιαφορία και έλλειψη ενημέρωσης των πολιτών για την αναμενόμενη εξάντληση των βεβαιωμένων ενεργειακών αποθεμάτων, αρκετοί επιστήμονες πιστεύουν ότι η άφιξη του "ενεργειακού χειμώνα" στον πλανήτη μας καθίσταται σχεδόν αναπόφευκτη.

Πράγματι, σχετικά ακριβείς αναλύσεις εκτιμούν την παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση τα επόμενα χρόνια να έχουν συνεχείς αυξητικούς ρυθμούς, τη στιγμή που το σύνολο των απολύτως βεβαιωμένων αποθεμάτων συμβατικών καυσίμων (άνθρακας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο, σχάσιμα υλικά), δεν ξεπερνούν τα 250Q, ενώ τα πιθανά ενεργειακά αποθέματα ίσως να πλησιάζουν στην καλύτερη περίπτωση στα 2500Q. Με σταθερούς τους σημερινούς ρυθμούς αύξησης της κατανάλωσης ενέργειας, τα συνολικά γήινα αποθέματα συμβατικών καυσίμων δεν επαρκούν για περισσότερα από τριακόσια χρόνια. Παράλληλα η χώρα μας δεν θεωρείται ευνοημένη από πλευράς ύπαρξης αποθεμάτων συμβατικών καυσίμων, γεγονός που την υποχρεώνει σε έντονη εξάρτηση από εισαγόμενα καύσιμα και σχετικά μικρό συντελεστή ενεργειακής αυτόρκειας.

Τέλος, η διαδικασία παραγωγής ενέργειας με τη χρήση συμβατικών καυσίμων επιβαρύνει έντονα το περιβάλλον, π.χ. όξινη βροχή, φαινόμενο θερμοκηπίου, ραδιενεργά απόβλητα, αλλοίωση τοπίου. Συνεπώς η μόνη απάντηση στην εξάντληση των συμβατικών καυσίμων και στη διαρκή επιβάρυνση του περιβάλλοντος από τη λειτουργία συμβατικών σταθμών παραγωγής, είναι η στροφή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι οποίες δεν εξαντλούνται και δε ρυπαίνουν το περιβάλλον. Μία από τις πλέον ελκυστικές ήπιες μορφές ενέργειας είναι και η αιολική ενέργεια.

§ 1.2 Άνθρωπος και Ενέργεια

Η προσπάθεια του ανθρώπου για τη συνεχή άνοδο του βιοτικού του επιπέδου, σε συνδυασμό με τη ραγδαία αύξηση του πληθυσμού της γης και την αλόγιστη σπάταλη και κακή χρήση των ενεργειακών αποθεμάτων του πλανήτη μας, απειλούν να οδηγήσουν σύντομα την ανθρωπότητα σύμφωνα με έγκυρες απόψεις ειδικών, σε έναν μακρύ ενεργειακό χειμώνα.

Σε μια προσπάθεια να συνειδητοποιήσουμε το μέγεθος της κατασπατάλησης των διαθέσιμων ενεργειακών πόρων του πλανήτη μας, αξίζει να σημειώσουμε ότι η ανθρωπότητα έχει δαπανήσει τα τελευταία εκατό χρόνια, αποθέματα πρώτων υλών και πηγών ενέργειας, τα οποία αποταμιεύθηκαν κατά τη διάρκεια της μέχρι σήμερα ζωής του πλανήτη μας. Πράγματι μέχρι τον 16^ο αιώνα το ξύλο, μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, αποτελούσε την αποκλειστική σχεδόν πηγή εκμεταλλεύσιμης θερμικής ενέργειας. Μετά όμως από την πρώτη βιομηχανική επανάσταση, το ξύλο αντικαταστάθηκε σχεδόν ολοκληρωτικά από μια νέα μορφή ενέργειας, τον άνθρακα. Η χρήση του άνθρακα για την παραγωγή ενέργειας εμφανίζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τη χρήση του ξύλου, γι' αυτό άλλωστε συνεχίζεται μέχρι και

σήμερα. Όμως, η βασική ειδοποιός διαφορά μεταξύ του άνθρακα και του ξύλου, ως πηγή ενέργειας, είναι ότι ο άνθρακας αποτελεί μη ανανεώσιμη ή συμβατική πηγή ενέργειας σε αντίθεση με το ξύλο.

Στα επόμενα χρόνια (αρχές του 20ου αιώνα), ο άνθρακας υποκαθίσταται από μια νέα πλέον εύχρηστη, αλλά επίσης μη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, το πετρέλαιο. Με την αξιοποίηση των κοιτασμάτων του πετρελαίου δόθηκε στην ανθρωπότητα η ευκαιρία να βελτιώσει το βιοτικό της επίπεδο, με τη χρήση της -από εκατομμυρίων ετών αποταμιευμένης ενεργειακής κληρονομιάς του πλανήτη μας. Το αποτέλεσμα όμως της χρήσης του πετρελαίου ήταν τελείως διαφορετικό. Τα αποθέματα πετρελαίου καθώς και των υπολοίπων φυσικών πόρων κατασπαταλήθηκαν από ορισμένους μόνο λαούς (Ευρώπη, Β. Αμερική), σε μια ξέφρενη πορεία ανάπτυξης, η οποία δημιούργησε αντίστοιχα μια νέα σειρά από προβλήματα.

Ένα χαρακτηριστικό αριθμητικό παράδειγμα που αποδεικνύει την κατασπατάληση της ενέργειας η οποία συντελείται από το σύγχρονο άνθρωπο, προκύπτει εάν αναλογιστούμε ότι, ενώ απαιτούνται κατά μέσο όρο 2500 Kcal ημερησίως για τη διατροφή ενός ενήλικα ανθρώπου, η κατά κεφαλήν κατανάλωση ενέργειας από το μέσο κάτοικο των Η.Π.Α. υπερβαίνει τις 250,000 Kcal την ημέρα.

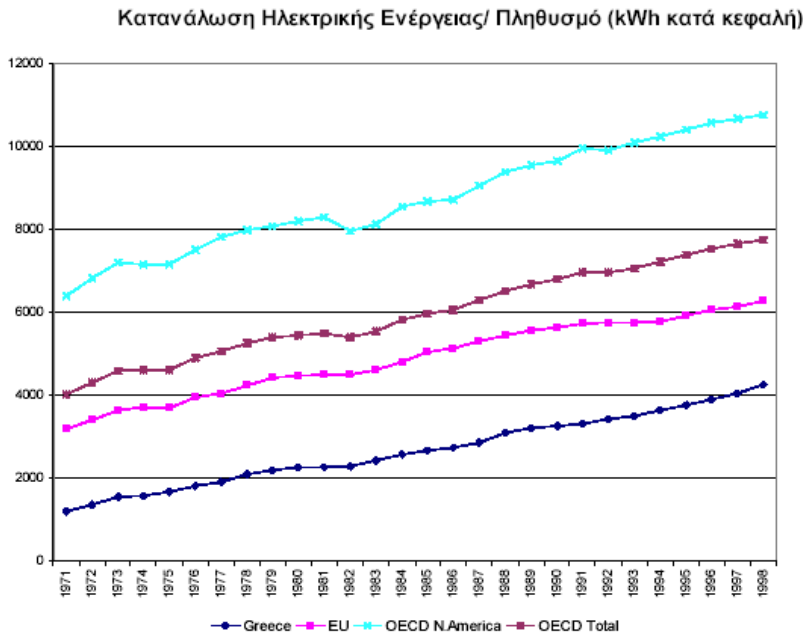
Με τα απλά αυτά παραδείγματα καθίσταται προφανές ότι η συνεχής τεχνολογική εξέλιξη αναστάτωσε το ενεργειακό ισοζύγιο του πλανήτη μας. Η αντικατάσταση των ανανεώσιμων ενεργειακών πηγών, όπως το ξύλο και η μυϊκή δύναμη, από τα συμβατικά μη ανανεώσιμα καύσιμα και η αλόγιστη μέχρι σπατάλης κατανάλωση αυτών, έθεσε σε κίνδυνο ακόμα και τη διασφάλιση του σημερινού βιοτικού επιπέδου του ανθρώπου. Μόλις πρόσφατα η ανθρωπότητα ανεγνώρισε ότι, τα από εκατομμυρίων ετών αποταμιευμένα αποθέματα ενεργειακών καυσίμων, αποτελούν το πάγιο ενεργειακό κεφάλαιο του πλανήτη μας. Ένα κεφάλαιο που όπως αναφέρεται "είναι δυστυχώς άτοικο ή τοκίζεται με πολύ μικρό τόκο". Το κεφάλαιο αυτό δυστυχώς έχει σχεδόν καταναλωθεί κατά τη διάρκεια του 20ου αιώνα, από τους ανθρώπους χωρίς ενεργειακή παιδεία και με άγνοια των βασικών αρχών της εξοικονόμησης ενέργειας.

§ 1.3 Κύριες Αιτίες Κατασπατάλησης της Ενέργειας

Αν και η ανθρωπότητα τα τελευταία είκοσι χρόνια συνειδητοποίησε τον κίνδυνο του επερχόμενου ενεργειακού χειμώνα, οπότε ξεκίνησε ορισμένες φιλότιμες προσπάθειες περιορισμού της κατανάλωσης και ορθολογικότερης χρήσης των ενεργειακών αποθεμάτων, ωστόσο οι βασικότερες αιτίες συνεχούς αύξησης της κατανάλωσης ενέργειας παραμένουν και συνοψίζονται ως εξής:

§1.3.1 Ανομοιομορφία στην παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας

Η προσπάθεια του ανθρώπου για βελτίωση του βιοτικού του επιπέδου (π.χ. παραγωγή περισσότερων καταναλωτικών αγαθών), συνεχίζεται με αυξανόμενους ρυθμούς. Αν και γίνονται προσπάθειες περιορισμού της κατανάλωσης ενέργειας, κυρίως στις ανεπτυγμένες χώρες του πλανήτη μας, αυτές δεν αποδίδουν πάντοτε καρπούς.

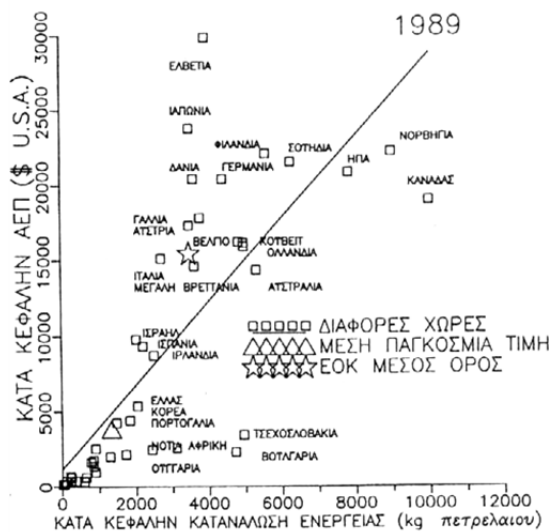


Σχήμα 1.1

Πιο συγκεκριμένα, μετά τις διαδοχικές ενεργειακές κρίσεις της τελευταίας τριακονταετίας, οι ανεπτυγμένες χώρες έδειξαν ότι διαθέτουν τα περιθώρια κάποιας περιορισμένης μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας, κυρίως στον τομέα της βιομηχανίας. Αντίθετα, χώρες λιγότερο ανεπτυγμένες με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, έχουν μικρότερα ή και μηδενικά περιθώρια περιορισμού των ενεργειακών τους αναγκών.

§ 1.3.2 Ανομοιομορφία στην παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας

Κατά κεφαλήν ενεργειακή κατανάλωση και Α.Ε.Π.



Σχήμα 1.2

Το παραπάνω γεγονός υπογραμμίζει την τρομακτική ανομοιομορφία που διέπει την κατά κεφαλήν κατανάλωση ενέργειας στις διάφορες περιοχές του πλανήτη μας. Σαν παράδειγμα, αναφέρουμε ότι η κατά κεφαλήν κατανάλωση ενέργειας στις Η.Π.Α. και στον Καναδά, είναι περίπου εικοσαπλάσια, από αυτήν των υπό ανάπτυξη χωρών όπως το Μεξικό, η Βραζιλία, η Συρία κ.λπ. Η πραγματικότητα αυτή πρέπει να συνδυασθεί και με το γεγονός ότι η παραγωγικότητα ενός λαού, το κατά κεφαλήν ακαθάριστο εθνικό προϊόν (Α.Ε.Π. ή "GNP") και η κατά κεφαλήν

κατανάλωση ενέργειας μεταβάλλονται σχεδόν ανάλογα (βλ. σχήμα 1.1).

Το συμπέρασμα που προκύπτει από την παραπάνω ανάλυση, βλέπε και Σχήμα 1.2, είναι ότι ορισμένοι λαοί καταναλίσκουν αρκετά μεγαλύτερα ποσά ενέργειας από ορισμένους άλλους. Χώρες αναπτυσσόμενες που βρίσκονται στη φάση της εκβιομηχάνισης και ανάπτυξης των ανέσεων της ζωής (σύγχρονες κατοικίες με θέρμανση και κλιματισμό, ιδιωτικής χρήσεως αυτοκίνητα κ.λπ.), έχουν υψηλή εισοδηματική ελαστικότητα ενέργειας, γι' αυτό είναι αδύνατο να συνδυάσουν τη συνέχιση της ανάπτυξής τους με τη μείωση της ενεργειακής έντασης. Πώς λοιπόν είναι δυνατόν να ζητηθεί από τους υπό ανάπτυξη λαούς να περιορίσουν την

ενεργειακή τους κατανάλωση, τη στιγμή που καταναλίσκουν μόλις το 5% της ενέργειας των πλούσιων και ανεπτυγμένων χωρών;

§ 1.3.3 Αύξηση του πληθυσμού της γης

Η ανομοιογενής ενεργειακή κατανάλωση στις διάφορες περιοχές του πλανήτη μας συνοδεύεται και από τη διαρκή αύξηση του πληθυσμού της γης. Όμως το πλέον σημαντικό στοιχείο, είναι η πληθυσμιακή έκρηξη που παρατηρείται στις υπό ανάπτυξη χώρες του πλανήτη μας, πράγμα που περιορίζει τις δυνατότητες μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας. Στις περιπτώσεις δε αυτές, ακόμα και με σταθερή κατά κεφαλήν κατανάλωση ενέργειας, οδηγούμαστε σε μια αύξηση της συνολικής κατανάλωσης, τουλάχιστον ανάλογης με την αύξηση του πληθυσμού.

§ 1.3.4 Απώλειες συστημάτων παραγωγής και μεταφοράς ενέργειας

Στις παραπάνω αιτίες θα πρέπει να προστεθεί και ένας αριθμός τεχνολογικών λόγων, οι οποίοι οδηγούν αναπόφευκτα στην αύξηση του ρυθμού κατανάλωσης των ενεργειακών μας αποθεμάτων. Σύμφωνα λοιπόν με τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο είναι αδύνατον να εξαφανισθεί δεδομένη ποσότητα ενέργειας (υλιενέργειας) ή να παραχθεί ενέργεια από το μηδέν. Όμως κατά τη μετατροπή της ενέργειας από τη μια μορφή σε άλλη, υφίστανται ορισμένες απώλειες ωφέλιμης ενέργειας, οι οποίες εκφράζονται από την τιμή της εντροπίας του υπό διερεύνηση ενεργειακού συστήματος. Οι απώλειες ενέργειας, σύμφωνα με το δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο, αποτελούν ποσότητες ενέργειας χαμηλότερης ποιότητας, όπως για παράδειγμα η θερμική ενέργεια. Με τον τρόπο αυτό σε κάθε μετατροπής ενέργειας έχουμε παραγωγή θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας, η οποία δεν μπορεί να αξιοποιηθεί και στη συνέχεια απορρίπτεται στο περιβάλλον με τη μορφή θερμικής ρύπανσης, συντελώντας ταυτόχρονα στο "θερμικό θάνατο" του πλανήτη μας. Παράλληλα σημαντικά ποσά ενέργειας χάνονται κατά τη μεταφορά και διανομή της ενέργειας από τον τόπο παραγωγής στην περιοχή κατανάλωσής της.

Συνοψίζοντας, αναφέρουμε ότι ο βαθμός απόδοσης μιας θερμικής μηχανής κυμαίνεται σήμερα από 15% έως 45%, κάτι το οποίο, εάν συνδυασθεί με το πλήθος των θερμοηλεκτρικών σταθμών που τροφοδοτούν με ηλεκτρική ενέργεια τον πλανήτη μας, κάνει προφανή τη σημασία των ενεργειακών απωλειών των συστημάτων παραγωγής ενέργειας. Φυσικά γίνονται σημαντικές προσπάθειες μείωσης των απωλειών και αύξησης του βαθμού απόδοσης των ενεργειακών μας συστημάτων, γεγονός όπως το οποίο θα βελτιώσει ελάχιστα προς το παρόν το πλανητικό ενεργειακό ισοζύγιο. Τέλος, μορφές ενέργειας όπως η ηλεκτρική, θεωρούνται εξευμενισμένες, δεδομένου ότι μας παρέχουν τη δυνατότητα μετατροπής τους με ελάχιστες απώλειες, σε κάθε άλλη επιθυμητή μορφή ενέργειας. Ο διαχωρισμός αυτός της ενέργειας σε διαφορετικής ποιότητας μορφές, μας οδηγεί στην επόμενη αιτία κατασπατάλησης της ενέργειας.

§ 1.3.5 Μη ορθολογική χρήση της ενέργειας

Όπως προαναφέραμε, η ενέργεια διατίθεται σε διάφορες ποιότητες, οι οποίες σχετίζονται με

το βαθμό μετατρεψιμότητάς των σε άλλη επιθυμητή μορφή ενέργειας. Είναι συνεπώς σκόπιμο να αξιολογηθούν και να ιεραρχηθούν οι απαιτήσεις της ανθρωπότητας στις μορφές ενέργειας διαφορετικής ποιότητας. Είναι για παράδειγμα ενεργειακά απαράδεκτο να χρησιμοποιείται για τη θέρμανση κατοικιών ή για οικιακή χρήση ηλεκτρική ενέργεια υψηλής ποιότητας, τη στιγμή που ακόμα και χαμηλής ποιότητας θερμότητα (π.χ. θερμοκρασίας 40°C έως 90°C) καλύπτει πλήρως τις απαιτήσεις μας. Παράλληλα, με κατάλληλη διαχείριση της ζήτησης ενέργειας μπορούν να μειωθούν και να μετατεθούν οι αιχμές ζήτησης, με αποτέλεσμα να επιτευχθεί σημαντική εξοικονόμηση εγκατεστημένης ισχύος.

§ 1.3.6 Αδιαφορία και σπατάλη ενέργειας

Η έλλειψη ενημέρωσης των πολιτών καθώς και η επικράτηση της άποψης ότι τα αποθέματα ενέργειας και πρώτων υλών είναι απεριόριστα, οδηγούν το μέσο άνθρωπο στην αδιαφορία για την κατασπατάληση της ενέργειας που προκαλεί. Συχνά μάλιστα η κατασπατάληση της ενέργειας αποτελεί μέσο επίδειξης και απόδειξης πλούτου. Μόλις πρόσφατα άρχισε να γίνεται αντιληπτό το περιορισμένο μέγεθος των ενεργειακών μας αποθεμάτων, με αποτέλεσμα να ληφθούν κάποιες τιμολογιακές και διοικητικές αποφάσεις, που σκοπό έχουν την εξοικονόμηση ενέργειας.

Ολοκληρώνοντας, πρέπει να τονίσουμε ότι όλοι οι παραπάνω λόγοι συντελούν στην εξάντληση των ενεργειακών μας αποθεμάτων. Κοινή συνεπώς προσπάθεια όλων μας, πρέπει να είναι ο περιορισμός της σπατάλης και τελικά η σταδιακή και μεθοδευμένη απεξάρτηση πριν την πλήρη εξάλειψή τους.

§ 1.4 Παγκόσμια Ενεργειακή Κατανάλωση

Στις προηγούμενες παραγράφους αναφέρθηκε ότι η κατανάλωση ενέργειας εμφάνισε δραματική αύξηση, ιδιαίτερα το τελευταίο μισό του αιώνα. Στο σημείο αυτό είναι σκόπιμο να παρουσιάσουμε την παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας κατά πηγή, τα τελευταία τριάντα χρόνια, βλέπε Πίνακα 1.2. Σαν μονάδα μέτρησης της ενέργειας στις περιπτώσεις αυτές αναφέρεται το 1 Quad (1Q) ή το 1mQ (=10⁻³Q), η οποία αποτελεί μια τεράστια ποσότητα ενέργειας, καθώς 1Q=10¹⁸B.T.U.= 2.929.10¹⁴kWh. Επίσης το 1Q είναι αντίστοιχα ισοδύναμο με 26.92 δισεκατομμύρια τόνους πετρελαίου. Από τον Πίνακα 1.1 συμπεραίνουμε ότι υπάρχει σημαντικότερη αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας, η οποία μέσα σε τριάντα χρόνια έχει υπερτριπλασιασθεί, ενώ το πετρέλαιο αποτελεί την κύρια πηγή πρωτογενούς ενέργειας. Σημαντική συμβολή κατά τα τελευταία χρόνια στο παγκόσμιο ενεργειακό ισοζύγιο

Ενεργειακή κατανάλωση (mQ), κατά πηγή

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΗΓΗ	1960	1970	1980	1985	1990
Άνθρακες	61,5	66,8	79,2	85,7	92,0
Πετρέλαιο	45,3	69,9	132,3	147,2	165,0

Φυσικά αέρια	18,0	40,6	56,8	67,3	77,1
Ανανεώσιμες πηγές	6,9	11,8	15,4	17,1	18,8
Πυρηνική	-	0,8	12,6	33,6	63,6
ΣΥΝΟΛΟ	131,7	216,9	296,3	350,9	416,6

Πίνακας 1.1

έχει και η πυρηνική ενέργεια. Τέλος, περιορισμένη είναι η συμμετοχή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η οποία στηρίζεται στην υδροηλεκτρική παραγωγή κατά κύριο λόγο στις ανεπτυγμένες χώρες και στην αξιοποίηση της βιομάζας στις υπό ανάπτυξη, δεν υπερβαίνει όμως σε ποσοστιαία βάση το 7% της συνολικής κατανάλωσης του πλανήτη.

§ 1.5 Ενέργεια και Περιβάλλον

Ολόκληρη η διαδικασία παραγωγής ενέργειας, και ιδιαίτερα η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση συμβατικών καυσίμων, είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες μόλυνσης της ατμόσφαιρας και γενικότερα υποβάθμισης του περιβάλλοντος. Για παράδειγμα αναφέρονται οι σημαντικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα "CO₂" και οξειδίων του θείου "SO_x", ενώ δεν πρέπει να αγνοούνται οι περιπτώσεις άμεσης απειλής από την χρήση πυρηνικής ενέργειας.

Μείωση εκπομπών CO₂ ανάπτυξη ΑΠΕ

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΠΕ	Εκατομ. tn
Αιολικά Πάρκα	1,0
Εφαρμ. Ηλιακής ενέργειας	1,0
Μικρά Υδροηλεκτρικά	0,9
Αξιοποίηση Γεωθερμίας	0,2
Αξιοποίηση Βιομάζας	0,1
Επιδεικτικά Προγράμματα	0,1
ΣΥΝΟΛΟ	3,3

Πίνακας 1.3

Τόσο το CO₂ όσο και το SO₂ παράγονται κατά την καύση των υδρογονανθράκων (πετρέλαιο, άνθρακας κ.λπ.) και το μεν SO₂ μαζί με τυχόν νιτρώδεις ατμούς θεωρείται υπεύθυνο για την όξινη βροχή, που καταστρέφει την πανίδα της βόρειας και κεντρικής Ευρώπης, ενώ το CO₂ θεωρείται υπεύθυνο για τη βαθμιαία αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη μας, επιτείνοντας το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου προκαλείται από το γεγονός ότι το CO₂ έχει την ιδιότητα να απορροφά την υπέρυθη ακτινοβολία, με αποτέλεσμα υψηλές συγκεντρώσεις του στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας να εμποδίζουν την απαγωγή θερμότητας από τη γη στο διάστημα, με τελικό αποτέλεσμα την αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη μας. Πρέπει να σημειωθεί ότι η ετήσια παγκόσμια παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα είναι περίπου 22 δισεκατομμύρια τόνοι, εκ των οποίων το ένα τέταρτο παράγεται στις Η.Π.Α. Τέλος και η συνεισφορά της Ευρώπης στην παραγωγή του CO₂ είναι σημαντική, δεδομένου ότι οι εκτιμήσεις αναφέρουν ότι μείωση κατά 10% της ευρωπαϊκής παραγωγής CO₂ θα επιφέρει αντίστοιχη μείωση κατά 5% σε παγκόσμιο επίπεδο.

Στα πλαίσια της γενικότερης προσπάθειας της Ε.Ε. η χώρα μας εκπόνησε (1995) το "Ελληνικό Πρόγραμμα για την Κλιματική Μεταβολή". Στο πρόγραμμα αυτό αναγνωρίζεται ότι οι ΑΠΕ είναι "οι μόνες πηγές ενέργειας που δεν επιβαρύνουν την ατμόσφαιρα με CO₂". Για το λόγο αυτό προτείνεται η θεσμική και οικονομική ενίσχυση επενδυτικών πρωτοβουλιών στον τομέα αξιοποίησης των ΑΠΕ με άμεσο περιβαλλοντικό όφελος τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά 3.3 εκατ. τόνους ετησίως, βλέπε Πίνακα 1.3. Φυσικά για την επίτευξη ενός τέτοιου στόχου πρέπει η συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς στη χώρα μας να είχε φτάσει τα 300MW 2000! Πράγμα που συνέβη μόλις στο τέλος του 2002.

Μέχρι το σημείο αυτό αναφερθήκαμε στα αποτελέσματα χρήσης των υδρογονανθράκων για την παραγωγή ενέργειας, τα οποία όντως είναι σημαντικά. Δεν πρέπει όμως να αγνοήσουμε και τη σημαντική αλλοίωση του φυσικού χώρου, που συνοδεύει αναπόφευκτα την εξόρυξη πετρελαίου και άνθρακα, ενώ ιδιαίτερη ανάλυση απαιτείται για την αποτίμηση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης που συνοδεύει την εξόρυξη, επεξεργασία και εμπλουτισμό των σχάσιμων ραδιενεργών υλικών.

Από πλευράς ατμοσφαιρικής ρύπανσης, οι πυρηνικοί αντιδραστήρες αναφέρονται σαν ακίνδunami τουλάχιστον σε σύγκριση με τους υπόλοιπους συμβατικούς θερμικούς σταθμούς. Αντίθετα, ένα από τα βασικά μειονεκτήματα των πυρηνικών μονάδων αποτελεί η ισχυρή θερμική ρύπανση που αυτές προκαλούν. Σημαντικότερο όμως από πλευράς περιβαλλοντικής ρύπανσης είναι το πρόβλημα των ραδιενεργών καταλοίπων, που πρέπει να απορριφθούν από τον αντιδραστήρα. Η εμπειρία μας στη διαχείριση ραδιενεργών καταλοίπων δεν είναι μεγάλη, δεδομένου και του μικρού χρόνου λειτουργίας των πυρηνικών αντιδραστήρων, Τέλος δεν πρέπει να παραβλέψουμε την πιθανότητα πυρηνικού ατυχήματος, η οποία αν και εξαιρετικά μικρή, λόγω των αυξημένων μέτρων ασφάλειας, είναι δυνατό να προκαλέσει εκτεταμένες άμεσες και έμμεσες καταστροφές.

§ 1.6 Στροφή στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Ανακεφαλαιώνοντας, πρέπει να επισημάνουμε ότι αμέσως μετά τη δεύτερη ενεργειακή κρίση, στις αρχές της δεκαετίας του 1980, η διεθνής κοινότητα άρχισε να αναγνωρίζει το πεπερασμένο των παγκόσμιων αποθεμάτων των συμβατικών πηγών ενέργειας (κάρβουνο, πετρέλαιο, ουράνιο κλπ.) σε σύγκριση με την ανεξέλεγκτη αύξηση των ρυθμών κατανάλωσης ενέργειας, ιδιαίτερα στις ανεπτυγμένες χώρες του πλανήτη μας.

Ίσως οι προβλέψεις της πρώτης έκθεσης της Λέσχης της Ρώμης (1970) με τίτλο "Τα όρια της ανάπτυξης" να μην πραγματοποιήθηκαν στο βαθμό που η έκθεση προέβλεπε, όμως οι αρνητικές επιπτώσεις που συνοδεύουν την αλόγιστη κατανάλωση ενέργειας εξακολουθούν να ισχύουν και να επιβεβαιώνονται από τα πορίσματα της δεύτερης έκθεσης η οποία συνετάχθη το 1991. Αναφέρεται δε, ότι η μείωση των ενεργειακών αποθεμάτων και η ρύπανση του περιβάλλοντος μαζί με τον υπερπληθυσμό και την εξάντληση των φυσικών πόρων του πλανήτη μας, αποτελούν τις τέσσερις πληγές του ανθρώπινου είδους. Δεν πρέπει συνεπώς να λησμονούμε, ότι τα βεβαιωμένα αποθέματα των κυριότερων συμβατικών καυσίμων επαρκούν στις καλύτερες περιπτώσεις για τα επόμενα εκατό χρόνια, ενώ ακόμα και εάν ανακαλυφθούν στο μέλλον χιλιαπλάσια αποθέματα συμβατικών καυσίμων, με τους σημερινούς ρυθμούς κατανάλωσης ενέργειας, θα παρατείνουν για άλλα εκατό πενήντα μόλις χρόνια την άφιξη του ενεργειακού χειμώνα στον πλανήτη μας.

Ταυτόχρονα η επιταχυνόμενη συσσώρευση επικίνδυνων ρυπαντών (τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα) και η αντίστοιχη καταστροφή του περιβάλλοντος, οδηγούν στην εμφάνιση σημαντικών προβλημάτων υγείας, υποβαθμίζοντας παράλληλα την ποιότητα ζωής στις

περισσότερες μεγαλουπόλεις π.χ. Λονδίνο, Ρώμη, Αθήνα κ.α.

Η χρήση της πυρηνικής ενέργειας και η προσπάθεια ελέγχου της πυρηνικής σύντηξης έδωσαν προσωρινά κάποιες ελπίδες για τη συνέχιση των υφιστάμενων ρυθμών ανάπτυξης. Δυστυχώς η αναμενόμενη όξυνση των περιβαλλοντικών προβλημάτων, κυρίως από τη διάθεση των ραδιενεργών καταλοίπων και την πιθανότητα μείζονος ατυχήματος, σε συνδυασμό με το υψηλό κόστος προστασίας από τη ραδιενέργεια, έθεσε σοβαρά και αναπάντητα ερωτήματα που αφορούν τη βιωσιμότητα αντίστοιχων προσπαθειών.

Λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα παραπάνω προβλήματα που πηγάζουν από τη χρήση των συμβατικών πηγών ενέργειας, αρκετοί ειδικοί πρότειναν την αξιοποίηση των ήπιων ή ανανεώσιμων ή εναλλακτικών πηγών ενέργειας.

Φυσικά, οι ανανεώσιμες πηγές δεν είναι δυνατόν τη στιγμή αυτή να επιλύσουν το συνολικό ενεργειακό πρόβλημα της ανθρωπότητας, τουλάχιστον με τα σημερινά οικονομικά και τεχνολογικά δεδομένα. Εάν όμως η αξιοποίησή τους συνδυασθεί με την προσπάθεια εξοικονόμησης των συμβατικών πηγών ενέργειας και με την ορθολογική διαχείριση των υφιστάμενων ενεργειακών πόρων, είναι δυνατή η σταδιακή απομάκρυνση του εφιάλτη της ανθρωπότητας, δηλαδή του επερχόμενου ενεργειακού χειμώνα.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι οι περισσότερες ανανεώσιμες μορφές ενέργειας είναι γνωστές από τη στιγμή της εμφάνισης του ανθρώπου στον πλανήτη μας, ενώ έχουν χρησιμοποιηθεί με σημαντική επιτυχία και από τον άνθρωπο των αρχαιοτάτων ιστορικών χρόνων. Δεν πρέπει να ξεχνάμε, όσον αφορά την αιολική ενέργεια, ότι μέχρι το δέκατο όγδοο (18^ο) αιώνα η ναυτιλία στηρίζονταν σε ιστιοφόρα πλοία, ενώ στην ξηρά οι ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν για την άντληση νερού και την άλεση των σιτηρών. Η χώρα μας έχει μεγάλη παράδοση χρήσης των ανεμόμυλων, λόγω και της ιδιαίτερης γεωγραφικής μορφής της. Ονομαστοί δε είναι μέχρι σήμερα οι ανεμόμυλοι της Μυκόνου (κυκλαδίτικος ανεμόμυλος) και του οροπεδίου του Λασιθίου.

§1.7 Η Αιολική Ενέργεια

Αιολική ενέργεια ονομάζεται η κινητική ενέργεια του ανέμου και οφείλεται κυρίως στη θέρμανσή της (ή) από τον ήλιο. Από τη ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στη Γη, ποσοστό 1,5%-2% μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια αερίων μαζών στην ατμόσφαιρα. Η ισχύς των ανέμων σε όλη τη Γη υπολογίζεται σε 3,6 δις MW, ποσότητα τεράστια αν συγκριθεί με τις ανάγκες τις ανθρωπότητας.

Η αιολική ενέργεια αν και αποτελεί μια “αραιή” μορφή ενέργειας, είναι δηλαδή μικρή η ποσότητα ενέργειας που μπορεί να δεσμευτεί ανά μονάδα χρόνου και ανά τετραγωνικό μέτρο που προσβάλλεται από τον άνεμο, έχει ένα σημαντικό πλεονέκτημα. Δίνει απ’ ευθείας μηχανική ενέργεια, η οποία με πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης και απλά μέσα μετατρέπεται σε οποιαδήποτε άλλη μορφή ενέργειας.

Η εφαρμογή της ωστόσο έχει επικεντρωθεί στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των ανεμογεννητριών. Σ’ αυτή την κατεύθυνση έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια σημαντικά βήματα προόδου, με την ανάπτυξη της τεχνολογίας κατασκευής και τη βελτίωση των στοιχείων κόστους και αξιοπιστίας των συστημάτων. Η εξέλιξη αυτή έχει επιτρέψει την ανταγωνιστικότητα με τα άλλα συστήματα συμβατικών καυσίμων, με συνέπεια η ανάπτυξη και η εφαρμογή της αιολικής ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή τα επόμενα χρόνια να αναμένεται ραγδαία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΣΕ ΜΙΑ ΤΟΠΙΚΗ ΚΟΙΝΩΝΙΑ

§ 2.1 Εισαγωγικά

Ο υπολογισμός των αιολικών χαρακτηριστικών των υποψηφίων θέσεων προς μελέτη αποσκοπεί στην επιλογή των θέσεων εκείνων οι οποίες πληρούν τα απαραίτητα κριτήρια για την εγκατάσταση με επιτυχία είτε μεμονωμένων ανεμογεννητριών, είτε αιολικών πάρκων. Σε γενικές γραμμές η επιλογή θέσης εγκατάστασης ανεμογεννήτριας παρουσιάζει τα ίδια προβλήματα με την επιλογή θέσης εγκατάστασης οποιουδήποτε συστήματος παραγωγής ενέργειας. Διαφέρει όμως σ' ένα βασικό σημείο: είναι αδύνατο να προσδιορισθεί η καθαρή παραγωγή ενέργειας ή το κατά προσέγγιση κόστος αυτής, αν δεν είναι γνωστή η ακριβής θέση εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας. Η συμπεριφορά του ανέμου σε μια θέση, είναι αυτή που καθορίζει και τη λειτουργική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας. Έτσι, η οικονομική βιωσιμότητα μιας συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας, σ' ένα συγκεκριμένο τόπο δεν μπορεί να προβλεφθεί χωρίς την γνώση της συμπεριφοράς του ανέμου στη θέση αυτή. Επομένως, η ένταση του ανέμου και οι διακυμάνσεις στο μέτρο και τη διεύθυνση είναι οι βασικές παράμετροι για την επιλογή της θέσης της ανεμογεννήτριας όχι όμως και οι μοναδικές. Ανεμογεννήτριες τοποθετημένες σε βιώσιμες θέσεις πρέπει να πληρούν τις ακόλουθες ιδιότητες:

- Η παραγωγή ενέργειας να είναι συμφέρουσα οικονομικά (το κόστος της παραγόμενης KWh να είναι μικρό)
- Η εγκατάσταση να μην έχει αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον.
- Η λειτουργία της ανεμογεννήτριας να είναι συμβατή με τη λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου.
- Να έχουν ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό της ανεμογεννήτριας οι πιθανές ακραίες μετεωρολογικές συνθήκες της συγκεκριμένης θέσης (παγετοί, εξαιρετικά ισχυροί άνεμοι κλπ.).
- Η επιλεγμένη θέση να είναι αποδεκτή από το κοινό.

Η διαδικασία επιλογής θέσης εγκατάστασης ανεμογεννήτριας μπορεί να χαρακτηριστεί επιτυχής, όταν είναι δυνατός, μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα, ο προσδιορισμός περιοχής με υψηλό αιολικό δυναμικό. Έπειτα, αφού γίνει προσεκτικός έλεγχος της περιοχής αυτής, επιλέγονται οι θέσεις που ικανοποιούν τις υπόλοιπες παραμέτρους που απαριθμήθηκαν προηγουμένως.

Ένας πρωταρχικός παράγοντας που σχετίζεται με την οικονομική βιωσιμότητα της εγκατάστασης είναι το μέγεθος και οι περιοδικές διακυμάνσεις της έντασης του ανέμου. Η συμπεριφορά όμως του ανέμου κοντά στην επιφάνεια της γης είναι περίπλοκη και η ταχύτητα του μπορεί να μεταβληθεί απότομα, τόσο στο οριζόντιο όσο και στο κατακόρυφο επίπεδο. Οι τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί για να ανάγουμε υπάρχοντα δεδομένα, σε θέσεις που μας ενδιαφέρουν δεν είναι ακριβείς. Έτσι, δεν μπορούμε να σχεδιάσουμε ένα δίκτυο μετρήσεων ταχυτήτων του ανέμου που να μπορεί να μας δώσει το αιολικό δυναμικό σε κάθε θέση μιας μεγάλης περιοχής. Επίσης οι μετρήσεις χρειάζονται χρόνο και χρήματα να πραγματοποιηθούν.

Η πιο πρακτική λύση στο πρόβλημα επιλογής θέσης ανεμογεννήτριας, είναι να χρησιμοποιήσουμε υπάρχουσες πληροφορίες για τον προσδιορισμό περιοχών με υψηλό αιολικό δυναμικό, τέτοιο που να δικαιολογεί την οικονομική βιωσιμότητα της εγκατάστασης. Έπειτα, μέσα στις περιοχές αυτές, επιλέγονται τοποθεσίες στις οποίες η εγκατάσταση ανεμογεννήτριας είναι πρακτικώς εφικτή. Τέλος εκτελούνται μετρήσεις των ανέμων στις συγκεκριμένες πλέον θέσεις.

§ 2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή θέσεων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο υπολογισμός των αιολικών χαρακτηριστικών των υποψηφίων θέσεων, είτε άμεσα μέσω επιτόπιων μετρήσεων, είτε έμμεσα, χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία του 5^{ου} Κεφαλαίου και της πυκνότητας ισχύος τους, δεν δίνει τη δυνατότητα άμεσης επιλογής της βέλτιστης από το σύνολο των υποψηφίων θέσεων.

Αντιθέτως, υπάρχουν ορισμένοι άλλοι παράγοντες πέρα από την ενέργεια, οι οποίοι πρέπει να συνεκτιμηθούν στην αξιολόγηση των θέσεων με υψηλό αιολικό δυναμικό. Μάλιστα, υπάρχει η περίπτωση μια θέση με υψηλή πυκνότητα ενέργειας, να μην είναι κατάλληλη για την εγκατάσταση Α/Γ και να προτιμηθεί τελικά κάποια άλλη θέση, με μικρότερη πυκνότητα ενέργειας, η οποία να ικανοποιεί τα άλλα κριτήρια απόφασης, πέρα των αιολικών.

Η επιλογή θέσεων είναι πιο αξιόπιστη, χωρίς να αίρεται πλήρως η αβεβαιότητα λόγω της στοχαστικής φύσης του ανέμου, όταν λαμβάνονται υπόψη οι ακόλουθοι παράγοντες:

§ 2.2.1 Η σταθερότητα του ανέμου

Συχνά η πληροφορία που διαθέτουμε για τον άνεμο μιας περιοχής και η οποία περιγράφεται από τη μέση ετήσια ταχύτητα και από τις σταθερές Λ και k της κατανομής Weibull ανά τομέα, δεν είναι ικανή να περιγράψει με ακρίβεια την συμπεριφορά του ανέμου.

Αντιθέτως υπάρχουν συχνά φαινόμενα όπως οι ριπές του ανέμου, οι οποίες προκαλούν μηχανική καταπόνηση στην Α/Γ και οδηγούν σε σημαντική απώλεια ενέργειας.

Ταυτόχρονα με την αλλαγή στην ταχύτητα, υπάρχει και το φαινόμενο της μεταβολής της διεύθυνσής του. Γενικά είναι αποδεικτό ότι το σύστημα προσανεμισμού (yawing system) μιας μηχανής είναι ικανό να παρακολουθεί τις αλλαγές αυτές. Όμως συχνά αυτό δεν είναι δυνατόν. Το αποτέλεσμα των μεταβολών στην διεύθυνση του ανέμου στην μηχανική αντοχή του συστήματος προσανεμισμού καθώς και στην παραγωγή ενέργειας από την Α/Γ έχει μάλλον υποτιμηθεί μέχρι σήμερα. Πρόσφατα, έγινε αντιληπτό ότι οι συχνές αλλαγές της διεύθυνσης αναπτύσσουν καμπτικές δυνάμεις στα πτερύγια του δρομέα και στο σύστημα προσανεμισμού της Α/Γ.

Μια βασική παρατήρηση που πρέπει να γίνει είναι ότι μια θέση με υψηλό δυναμικό αλλά με συχνές αλλαγές στη διεύθυνση του ανέμου είναι καλύτερο να αποφεύγεται. Αντίθετα, μία θέση με σταθερότητα στον άνεμο είναι πλεονεκτικότερη της προηγούμενης, ακόμα κι αν έχει μικρότερη πυκνότητα αιολικής ενέργειας.

Τέλος, σημαντικό πρόβλημα είναι η διαχρονική μεταβλητότητα των αιολικών δεδομένων. Γενικά, η επίδραση της διαχρονικής μεταβολής του ανέμου είναι άμεση στην παραγωγή ενέργειας από την Α/Γ και στην αναμενόμενη ζωή (life expectancy) της όλης αιολικής εγκατάστασης.

§ 2.2.2 Η αξιοπιστία των αιολικών δεδομένων

Η αξιοπιστία των αιολικών δεδομένων μίας θέσης είναι άμεση συνάρτηση της χρονικής διάρκειας των μετρήσεων του ανέμου που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό των δεδομένων αυτών.

Το παραπάνω πρόβλημα είναι αρκετά πολύπλοκο και δεν έχει κάποια συγκεκριμένη λύση. Γενικά, η αξιοπιστία των αιολικών μετρήσεων βελτιώνεται σημαντικά με την αύξηση του χρόνου καταγραφής της ταχύτητας και διεύθυνσης του ανέμου και με την μείωση της περιόδου δειγματοληψίας.

Εάν στον υπολογισμό των αιολικών δεδομένων της θέσης χρησιμοποιούνται μαθηματικά μοντέλα, θα πρέπει η θέση αναφοράς, πέρα της αξιοπιστίας των μετρήσεών της, να μην είναι ιδιαίτερα μακρινή από την υποψήφια θέση υπό μελέτη. Θα πρέπει να τονιστεί ότι η απόσταση αυτή έχει άμεση σχέση με την μορφολογία του εδάφους και την ύπαρξη ορογραφίας μεταξύ της θέσης αναφοράς και της υποψήφιας. Ακριβή πάντως όρια δεν έχουν τεθεί. Στην πράξη, οι υποψήφιας θέσεις πρέπει να βρίσκονται σε μια ακτίνα μικρότερη των 100km από τη θέση αναφοράς, τα δεδομένα αιολικού άτλαντα της οποίας χρησιμοποιούνται.

§ 2.2.3 Τα διάφορα φυσικά και μετεωρολογικά φαινόμενα

Συχνά στις υποψήφιας θέσεις εμφανίζονται ακραία μετεωρολογικά και φυσικά φαινόμενα τα οποία έχουν άμεση επίπτωση στην μηχανική αντοχή της ανεμογεννήτριας και στην παραγωγή ενέργειας από τον άνεμο.

Ο παγετός, που είναι συχνό φαινόμενο σε περιοχές της Ελλάδας κυρίως κατά τη διάρκεια του χειμώνα, δημιουργεί μια αύξηση στα στατικά και δυναμικά φορτία της κατασκευής και κυρίως της πτερωτής. Ο υπολογισμός των παραπάνω φορτίων πρέπει συνεπώς να λαμβάνει υπόψη τα επιπλέον φορτία στον σχεδιασμό της Α/Γ κάτι που οδηγεί σε μια αναμφίβολη αύξηση του κόστους της εγκατάστασης. Σε περιπτώσεις παγετού, η μηχανή σταματά για καθαρισμό και η απώλεια της ενέργειας είναι ανάλογη του χρόνου συντήρησης. Μάλιστα, η απώλεια αυτή μεγιστοποιείται όταν ο άνεμος έχει υψηλή ταχύτητα, όπως συμβαίνει συχνά κατά τους χειμερινούς μήνες.

Οι ίδιες παρατηρήσεις ισχύουν και για την περίπτωση χιονοπτώσεων στις υποψήφιας θέσεις. Συνεπώς είναι καλό να αποφεύγονται περιοχές με υψηλή συχνότητα εμφάνισης των παραπάνω φαινομένων, ώστε να αποφεύγονται δυσάρεστα αποτελέσματα στην παραγωγή ενέργειας από Α/Γ.

Φυσικά φαινόμενα τα οποία εν πρέπει να διαφεύγουν της προσοχής μας κατά την επιλογή θέσεων, είναι οι σεισμοί, οι κατολισθήσεις, οι κεραινοί και οι πιθανές ακραίες τιμές θερμοκρασίας στις υποψήφιας θέσεις. Τα φαινόμενα αυτά έχουν άμεση επίπτωση στην μηχανική αντοχή της Α/Γ και κατά συνέπεια στο χρόνο οικονομικής ζωής της εγκατάστασης.

Ένα άλλο σημείο με ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι οι υπερβολικά ισχυροί άνεμοι σε μια περιοχή. Οι υψηλοί άνεμοι και κυρίως εκείνοι που η τιμή τους είναι πάνω από την ταχύτητα αποκοπής της Α/Γ (cut-out wind speed) έχουν άμεση συνέπεια στην παραγωγή ενέργειας. Όμως εκείνο που πρέπει να μελετάται προσεκτικά είναι το φαινόμενο των θυελλωδών ανέμων

σε μια περιοχή το οποίο είναι άμεσα συνδεδεμένο με την διάρκεια ζωής της μηχανής. Πολύ ισχυροί άνεμοι είναι ικανοί να καταστρέψουν ολοκληρωτικά τα θεμέλια, τον πύργο στήριξης και την πτερωτή της Α/Γ. Γι αυτό οι μηχανικοί οφείλουν να κάνουν ανάλυση της επικινδυνότητας (risk analysis) των υποψηφίων θέσεων για τις πολύ υψηλές ταχύτητες ανέμου, πριν γίνει η επιλογή της θέσης εγκατάστασης Α/Γ.

Οι μηχανές που εγκαθίσταται κοντά σε θαλάσσιες περιοχές, η και αυτές που τοποθετούνται εντός της θάλασσας (off-shore) έχουν υψηλότερη απόδοση ενέργειας από αυτές που βρίσκονται σε περιοχές της ενδοχώρας.

Όμως πρέπει στην περίπτωση αυτή να λαμβάνεται υπόψη η διάβρωση και ορισμένα τμήματα της μηχανής οφείλουν να διαθέτουν αντισκωρική προστασία, γεγονός με άμεση επίπτωση στο κόστος της Α/Γ και της παραγόμενης αιολικά ηλεκτρικής ενέργειας. Ταυτόχρονα, είναι σημαντικό να συνυπολογίζονται τα πιθανά υλικά που μεταφέρει ο άνεμος, όπως σκόνη, άμμος, χαλίγια, τα οποία είναι δυνατόν να προκαλέσουν ζημιές στα πτερύγια και σε άλλα τμήματα της κατασκευής. Η προστασία από τα φαινόμενα αυτά με ενίσχυση των πτερυγίων και διάφορες σχεδιαστικές τροποποιήσεις έχει επίπτωση στο κόστος της Α/Γ και συνεπώς στην οικονομική βιωσιμότητα της εγκατάστασης.



Εικόνα 2.1 Άποψη από
Off – shore Α/Γ

Τέλος, μια σημαντική παράμετρος στην επιλογή θέσεων είναι η εμφάνιση τυρβώδους ροής. Στην περίπτωση αυτή το διάγραμμα της ταχύτητας σε κάθε σημείο του αέρα σαν ρευστού, παρουσιάζει συχνές διακυμάνσεις, τόσο κατά μέτρο όσο και διεύθυνση. Αυτό το φαινόμενο επιδρά στη μηχανική αντοχή της Α/Γ και στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας οδηγώντας σε αύξηση του κόστους και μείωση της διάρκειας ζωής του συστήματος. Οι μέχρι τώρα προσεγγίσεις στο θέμα δεν έχουν δώσει ικανοποιητική απάντηση στο ποιες θέσεις παρουσιάζουν αυξημένη τυρβώδη ροή και γιατί. Γενικά, αποφεύγονται θέσεις με πολύπλοκη μορφολογία του εδάφους, οι οποίες συνήθως παρουσιάζουν υψηλό επίπεδο τύρβης.

Τέλος, μια σημαντική παράμετρος στην επιλογή θέσεων είναι η εμφάνιση τυρβώδους ροής. Στην περίπτωση αυτή το διάγραμμα της ταχύτητας σε κάθε σημείο του αέρα σαν ρευστού, παρουσιάζει συχνές διακυμάνσεις, τόσο κατά μέτρο όσο και διεύθυνση. Αυτό το φαινόμενο επιδρά στη μηχανική αντοχή της Α/Γ και στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας οδηγώντας σε αύξηση του κόστους και μείωση της διάρκειας ζωής του συστήματος. Οι μέχρι τώρα προσεγγίσεις στο θέμα δεν έχουν δώσει ικανοποιητική απάντηση στο ποιες θέσεις παρουσιάζουν αυξημένη τυρβώδη ροή και γιατί. Γενικά, αποφεύγονται θέσεις με πολύπλοκη μορφολογία του εδάφους, οι οποίες συνήθως παρουσιάζουν υψηλό επίπεδο τύρβης.

§ 2.2.4 Η οικονομική βιωσιμότητα της εγκατάστασης

όπως έχει αναφερθεί στην εισαγωγή, η βασική παράμετρος που ώθησε στην ανάπτυξη των Α/Γ, ήταν το υψηλό κόστος του πετρελαίου στην διεθνή αγορά κατά την δεκαετία του 1970. Είναι συνεπώς σημαντικό να επιτυγχάνεται μείωση του κόστους της παραγόμενης αιολικά ενέργειας σε σχέση με το κόστος των συμβατικών σταθμών παραγωγής. Σήμερα οι τιμές κόστους παραγωγής ανά μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας είναι συγκρίσιμες και υπάρχει η τάση να γίνει πιο ελκυστική η αιολικά παραγόμενη, αν υπολογιστεί και η επίπτωση του συμβατικού καυσίμου στο περιβάλλον.

Η οικονομική βιωσιμότητα μιας αιολικής εγκατάστασης είναι άμεση συνάρτηση της θέσης. Το αρχικό κόστος της επένδυσης μειώνεται αισθητά όταν η προτεινόμενη θέση βρίσκεται

κοντά σε κεντρικές οδικές αρτηρίες ή λιμάνια, δηλαδή είναι εύκολη στην πρόσβαση, γειτονεύει με γραμμές μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας και έχει χαμηλό κόστος αγοράς γης και έργων πολιτικού μηχανικού.

Μια άλλη σημαντική παράμετρος κυρίως σε περιπτώσεις κρατικών συνεργασιών είναι η δυνατότητα κατασκευής τμημάτων της Α/Γ στην τοπική αγορά καθώς και η ύπαρξη ειδικευμένων τεχνιτών, όπως συντηρητών, σε περιοχές όχι μακριά από την θέση εγκατάστασης, ώστε να μειωθεί το κόστος συντήρησης. Τέλος σημαντικό στοιχείο είναι και ο αναμενόμενος χρόνος λειτουργίας ετησίως (availability), που εκφράζει την συχνότητα και διάρκεια των προγραμματισμένων συντηρήσεων της Α/Γ.

§ 2.2.5 Επιπτώσεις στο περιβάλλον

Η παράμετρος αυτή είναι σήμερα θέμα ιδιαίτερου ενδιαφέροντος και μελέτης. Γενικά, υπάρχει η αντίληψη ότι η Α/Γ είναι φιλική προς το περιβάλλον κάτι που ενισχύεται από το γεγονός ότι δεν μολύνει με απόβλητα όπως συμβαίνει με τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας. Όμως, οι αιολικές εγκαταστάσεις επιδρούν στο περιβάλλον κυρίως αισθητικά καθώς η κατασκευή μεγάλων και άκομφων μηχανών σε μικρό σχετικά χώρο δεν είναι ευχάριστο θέαμα. Γι αυτό είναι προτιμότερη η τοποθέτηση Α/Γ σε μορφές αιολικών πάρκων, σε μεγάλες και ανοικτές εκτάσεις ώστε να είναι αισθητικά αποδεκτές.

Μια ακόμα επίπτωση στο φυσικό περιβάλλον είναι στα πτηνά της περιοχής και κυρίως στα αποδημητικά. Η εγκατάσταση ανεμογεννήτριας σε βιότοπους διαφόρων ειδών πουλιών εγκυμονεί κινδύνους για την ισορροπία του οικοσυστήματος της περιοχής και πρέπει να αποφεύγεται.

Τέλος, δεν πρέπει να παραβλέπεται το γεγονός της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης που δημιουργείται με την σιέδαση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στα πτερύγια της Α/Γ, κυρίως όταν αυτά περιστρέφονται. Το πρόβλημα αυτό είναι ιδιαίτερα έντονο σε ορισμένες περιπτώσεις καθώς δημιουργούνται παρεμβολές στις τηλεοπτικές και ραδιοφωνικές μεταδόσεις και στις τηλεπικοινωνίες της περιοχής. Γενικά, το θέμα της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης βρίσκεται υπό μελέτη και έχουν προταθεί διάφορες λύσεις για την αντιμετώπιση του προβλήματος.

§ 2.2.6 Η επίδραση στους κατοίκους της περιοχής

Η επιτυχής επιλογή μιας θέσης εγκατάστασης συνδέεται συχνά και με την αποδοχή από το κοινό (public acceptance). Τα τελευταία χρόνια έχει δοθεί ιδιαίτερο βάρος σε αυτό το σημείο κυρίως στα επίπεδα θορύβου τα οποία οφείλουν να πληρούν οι κατασκευαστές Α/Γ.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, κυρίως στην Ολλανδία, οι Α/Γ σταματούν κατά τη διάρκεια της νύχτας, ώστε να αποφεύγεται η ενόχληση των περιοίκων. Γενικά, οι σημερινές ανεμογεννήτριες παρουσιάζουν ικανοποιητικά επίπεδα θορύβου, θέτοντας αυστηρές προϋποθέσεις και όρια.

Η τάση του κοινού είναι θετική απέναντι στις Α/Γ. Έχει γίνει συνείδηση πλέον η ανάγκη προστασίας του περιβάλλοντος και η ανεύρεση πηγών ενέργειας που θα είναι φιλικές απέναντί του, διασφαλίζοντας παράλληλα την συνέχιση του υψηλού βιοτικού επιπέδου του σύγχρονου ανθρώπου, κριτήρια που ικανοποιεί η αιολική ενέργεια.

§ 2.2.7 Περιορισμοί στην χρήση γης

Συχνά η νομοθεσία δεν επιτρέπει την εγκατάσταση Α/Γ σε ορισμένες περιοχές, όπως αρχαιολογικοί χώροι, υδροβιότοποι, ιστορικά μνημεία κλπ. Επίσης, σε ορισμένες χώρες όπως η Δανία, υπάρχουν διατάξεις, οι οποίες εμποδίζουν και περιορίζουν την εγκατάσταση Α/Γ σε καθορισμένο αριθμό, ανάλογα με την περιοχή. Οι παραπάνω περιορισμοί πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη στην επιλογή θέσεων, ώστε να αποφεύγονται δυσάρεστες επιπλοκές κάτι που έχει συμβεί κατά το παρελθόν στη χώρα μας. Ο σεβασμός και η γνώση των νομοθετικών περιορισμών κατά την επιλογή θέσεων εγκατάστασης Α/Γ είναι απαραίτητα στοιχεία για την προώθηση της γενικευμένης χρήσης της αιολικής ενέργειας.

§ 2.3 Χρήσιμο ερωτηματολόγιο για την επιλογή θέσης εγκατάστασης ανεμογεννήτριας

1. Όνομα θέσης
2. Σημειώστε τη θέση πάνω στο χάρτη (1:50000)
3. Μήπως η θέση βρίσκεται σε απαγορευμένη περιοχή; Στρατιωτική; Αρχαιολογική ή (ενδείξεις για ύπαρξη αρχαιοτήτων); Εθνικός δρυμός; Παραδοσιακός οικισμός; Καταφύγιο ζώων – βιότοπος; Πυκνοκατοικημένη περιοχή; Εγγύτητα σε αεροδρόμιο (περιορισμοί ασφάλειας πτήσης);
4. Απόσταση πλησιέστερου οικισμού; Απόσταση πλησιέστερων κατοικιών; Εγγύτητα σε σταθμό radar – ΟΤΕ – ΕΡΤ – TV; Χαρακτηρίζεται το τοπίο ως ιδιαίτερου κάλους; Δημιουργείται οπτική αλλοίωση στο τοπίο από την εγκατάσταση της ανεμογεννήτριας;
5. Εάν είναι νησί: υπάρχει λιμάνι; Προσεγγίζει πλοίο;
6. Στοιχεία του δρόμου προσπέλασης: Είδος δρόμου (ασφάλτινος ή χωμάτινος); Μήκος, ελάχιστο πλάτος, μέγιστη κλίση, κλειστές στροφές; Κινείται μεγάλο φορτηγό(τριαξονικό); Γέφυρες: πλάτος – ικανότητα φορτίου; Επικίνδυνα σημεία κατολισθήσεις; Υπάρχει ιδιωτικό τμήμα του δρόμου;
7. Καθεστώς ιδιοκτησίας του χώρου; Δασικό δημόσιο κοινοτικό; Ιδιωτικό; Κόστος γης;
8. Περιγραφή του χώρου: νέα διάνοιξη δρόμου; Είδος επιφάνειας; Έδαφος; Βλάστηση; Βασικές διαστάσεις;
9. Απόσταση θέσης από το δίκτυο της Δ.Ε.Η.;
10. Ανεμολογικά στοιχεία περιοχής; Ενδείξεις για επικρατούσες διευθύνσεις ανέμου(δένδρα);
11. Γερανοί για την ανέγερση των ανεμογεννητριών;

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ

§ 3.1 Εισαγωγή

Η οικονομική βιωσιμότητα των αιολικών εγκαταστάσεων έχει ήδη από αρκετά χρόνια αποδειχθεί για πλήθος ενεργειακών εφαρμογών. Παράλληλα η εξασφάλιση και της οικονομικής ελκυστικότητας μιας τέτοιας επένδυσης καθιστά την αιολική ενέργεια πλήρως ανταγωνιστική στη διεθνή ενεργειακή αγορά.

Για το λόγο αυτό απαιτείται συστηματική και διαχρονική έρευνα της αγοράς ώστε να προσδιορισθούν οι τιμές διάθεσης των εμπορικών ανεμογεννητριών, καθώς και το απαιτούμενο πρόσθετο κόστος εγκατάστασης των μηχανών. Παράλληλα ιδιαίτερη επίδραση στην οικονομική συμπεριφορά μιας ενεργειακής επένδυσης έχει και το σταθερό και μεταβλητό κόστος συντήρησης και λειτουργίας.

Οι τρόποι εύρεσης των απαραίτητων επενδυτικών κεφαλαίων, περιλαμβάνουν δανειακά κεφάλαια που αξιολογούνται με βάση το κόστος του χρήματος, κρατικές και κοινοτικές επιδοτήσεις (με πρακτικά μηδενικό κόστος) και ίδια κεφάλαια, για τα οποία καθορίζεται και ο ελάχιστος αποδοτικός βαθμός απόδοσής των.

Τα έσοδα της εγκατάστασης προέρχονται είτε από τη διάθεση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στη ΔΕΗ είτε από την εξοικονόμηση χρημάτων που στο παρελθόν διατίθεντο για αγορά ή και για αυτόνομη παραγωγή ενέργειας από συμβατικά καύσιμα. Σε όλες τις περιπτώσεις συνυπολογίζεται στην εξέλιξη των ετήσιων εσόδων και η προβλεπόμενη ετήσια ανατίμηση των διάφορων μορφών ενέργειας. Ταυτόχρονα λαμβάνεται υπόψιν και η πιθανή φορολογία των κερδών της μονάδος. Για τον προσδιορισμό του χρόνου απόσβεσης συγκρίνονται τα έσοδα και τα έξοδα της επένδυσης, έτσι ώστε να βρεθεί το χρονικό σημείο εξίσωσης των ή ισοδύναμα το χρονικό σημείο μηδενισμού των κερδών. Παράλληλα διερευνάται και η οικονομική ελκυστικότητα μιας αιολικής επένδυσης με τον προσδιορισμό του χρόνου διπλασιασμού του αρχικού κεφαλαίου, αλλά και με την εκτίμηση της γενικότερης πορείας του οικονομικού βαθμού απόδοσης. Στα πλαίσια της διαχρονικής διερεύνησης των οικονομικών μεγεθών, χρησιμοποιούνται κατά κανόνα αποπληθωρισμένα μεγέθη (σε σταθερές τιμές). Για την ολοκληρωμένη οικονομική ανάλυση μιας ενεργειακής επένδυσης εξετάζεται και η πορεία των χρηματορροών κατά τη διάρκεια λειτουργίας της εγκατάστασης.

§ 3.2 Η Διαχρονική Αξία του Χρήματος

Οι σημαντικότεροι παράγοντες που χαρακτηρίζουν τις επενδυτικές αποφάσεις είναι ο χρόνος, η αβεβαιότητα, οι επενδυτικές ευκαιρίες και οι προτιμήσεις των επενδυτών. Η διαχρονική αξία του χρήματος καθορίζεται με τη χρησιμοποίηση επιτοκίων. Για να εξηγηθεί η ύπαρξη θετικών επιτοκίων σε μια οικονομία πρέπει να καταγραφούν οι βασικοί λόγοι για τους οποίους διάφορα άτομα δεν καταναλώνουν μέρος του εισοδήματός τους, αλλά το καταθέτουν σε λογαριασμούς αποταμιεύσεων. Τρεις είναι οι βασικοί και γενικά αποδοκτοί μηχανισμοί κινήτρων που σχετίζονται με τις προσωπικές προτιμήσεις, τις προσδοκίες για τις εξελίξεις της αγοράς και φυσικά την αβεβαιότητα. Πιο συγκεκριμένα έχουμε:

- α. Σχέδια μελλοντικής καταναλώσεως είναι προτιμότερα από τα παρόντα, καθώς διάφορα άτομα στο κοινωνικό σύνολο αποταμιεύουν, ώστε να επιτύχουν μια ανακατανομή των μελλοντικών εισοδημάτων περισσότερο σύμφωνη με τις προτιμήσεις τους, "κίνητρο ανακατανομής του εισοδήματος".

- β. Τα επιθυμητά σχέδια μελλοντικής καταναλώσεως είναι αβέβαια και μπορεί να μείνουν ανεπιπλήρωτα λόγω απρόβλεπτων γεγονότων, "κίνητρο πρόνοιας".
- γ. Οι διαθέσιμες μελλοντικές επενδυτικές ευκαιρίες είναι άγνωστες προς το παρόν, αλλά σίγουρα υπάρχουν άφθονες. Για να είναι δυνατή η εκμετάλλευση παρόμοιων ευκαιριών, διάφορα άτομα αποταμιεύουν μέρος του εισοδήματός τους, "επενδυτικό κίνητρο".

Συνοψίζοντας την εισαγωγική αυτή παράγραφο πρέπει να αναφερθούν οι δύο θεμελιώδεις αρχές επενδυτικών αποφάσεων, οι οποίες υποστηρίζουν ότι:

- i. οι μεγάλες αποδόσεις είναι προτιμότερες από τις μικρές,
- ii. οι σύντομες αποδόσεις είναι προτιμότερες από τις καθυστερημένες.

Με βάση τις παραπάνω διευκρινήσεις είναι δυνατή στη συνέχεια η αξιολόγηση των οικονομικών δραστηριοτήτων στον τομέα των αιολικών εφαρμογών.

§ 3.3 Κόστος Αγοράς Αιολικών Μηχανών

Αναφερόμενοι τώρα στις τιμές διάθεσης των αιολικών μηχανών, οι πλέον καθιερωμένες τιμές είναι οι "Ex works", "FOB" και "Turnkey". Η τιμή "Ex works" ή "EXW" είναι η τιμή του προϊόντος παραδοτέου στην έξοδο του εργοστασίου. Στην τιμή αυτή δεν περιλαμβάνονται δασμοί, μεταφορικά και εγκατάσταση της ανεμογεννήτριας. Με τον τρόπο αυτό ο πωλητής ελαττώνει τον κίνδυνο με το να διαθέτει τα προϊόντα στην έδρα του. Αντίστοιχα η τιμή "FOB" ή "Free on board" αναφέρεται στην παράδοση του προϊόντος επάνω στο πλοίο, μετά από μεταφορά σε συγκεκριμένο και σαφώς κατονομαζόμενο λιμάνι φόρτωσης. Με αυτό τον τρόπο ο πωλητής, οργανώνει, πληρώνει και δέχεται όλο τον κίνδυνο της μεταφοράς μέσα στη χώρα του πριν τη θαλάσσια μεταφορά. Στη τιμή αυτή περιλαμβάνεται και ο εκτελωνισμός των εμπορευμάτων. Τέλος η τιμή "Turnkey" ή με το "κλειδί στο χέρι", μεταφράζεται στο ότι ο πωλητής αναλαμβάνει όχι μόνο το κόστος μεταφοράς στον τόπο εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας αλλά και τα έξοδα εγκατάστασης και διασύνδεσης με το δίκτυο.

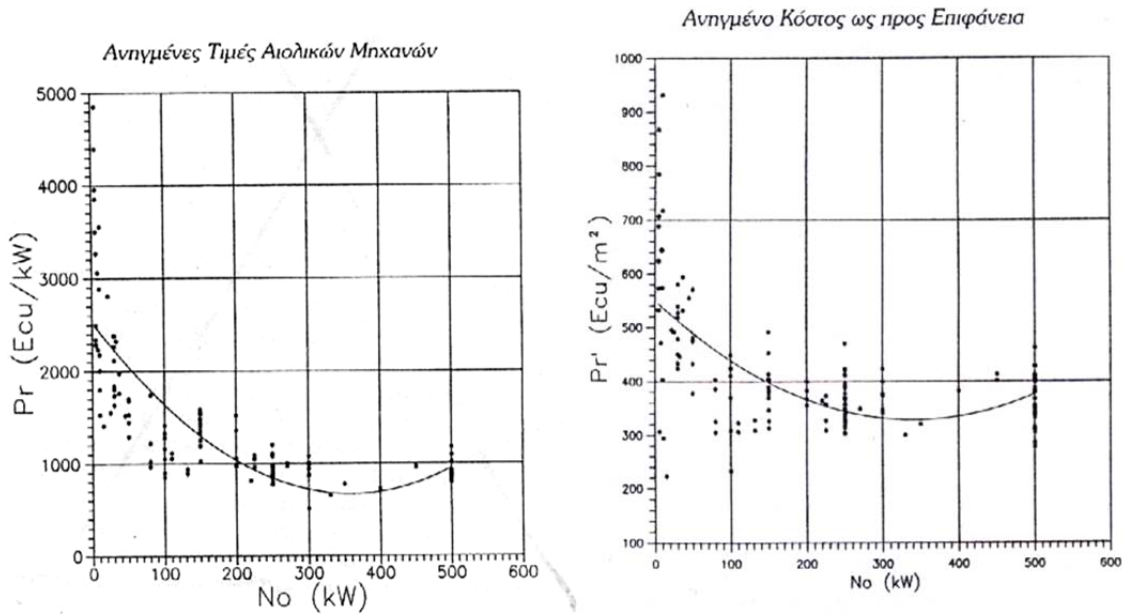
Διακύμανση Τιμής Αγοράς Αιολικών Μηχανών

ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ (kW)	ΑΚΡΙΒΟΤΕΡΟΣ ΤΥΠΟΣ	ΚΟΣΤΟΣ σε Ecu	ΦΘΗΝΟΤΕΡΟΣ ΤΥΠΟΣ	ΚΟΣΤΟΣ σε Ecu
30	Sudwind 1200	70300	Kramer K-30	48200
100	Fuhrlander 100	139600	Kramer K-100	70300
250	HSW 250T	295000	Zephyr Wts	190400
500	Enercon-40	580000	Ned Wind 40	390900

Πίνακας 3.1

Συγκεντρώνοντας στη συνέχεια τα στοιχεία διάθεσης αιολικών μηχανών από διάφορους κατασκευαστές (τιμές 1996) είναι δυνατόν να καταγραφούν ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα. Αρχικά είναι σημαντικό να επισημανθεί η σχετικά μεγάλη διακύμανση τιμών εκ μέρους των κατασκευαστών για μηχανές της ίδιας ονομαστικής ισχύος, βλέπε και Πίνακα 3.1. Το γεγονός αυτό είναι λογικό δεδομένου του μεγέθους και της πολιτικής της κάθε εταιρείας, αλλά και των επιπλέον παρεχομένων εγγυήσεων ή και εξοπλισμού, ενώ σημαντική

είναι και η συμμετοχή του ύψους και της γενικής δομής του πύργου στήριξης της ανεμογεννήτριας στο διαμορφούμενο τελικό κόστος. Παρόλα αυτά όμως διαφοροποιήσεις στις τιμές των παρεχομένων αιολικών μηχανών της τάξης του 50% ή και 100% προξενούν πάντοτε εντύπωση και καταδεικνύουν το βαθμό του ανταγωνισμού που επικρατεί στη διεθνή αιολική αγορά.



Σχήμα 3.1

Σχήμα 3.2

Συνοψίζοντας στη συνέχεια τα στοιχεία κόστους των διαθέσιμων αιολικών μηχανών και για περιοχές ισχύος από 0,1kW-1000kW προκύπτει (σχήμα 3.1) μια έντονη μείωση της ανηγμένης τιμής μιας αιολικής μηχανής (σε Ecu / kW) και μέχρι το επίπεδο των 100kW. Στην περιοχή των 100kW - 200kW εμφανίζεται μια μικρή αύξηση της ανηγμένης τιμής, η οποία μετατρέπεται σε σχετική μείωση και μέχρι τα επίπεδα των 500kW, όπου έχουμε μια νέα σταθεροποίηση των τιμών διάθεσης των αιολικών μηχανών. Παρόμοια είναι και η συμπεριφορά του ανηγμένου κόστους μιας ανεμογεννήτριας ως προς την επιφάνεια σάρωσης της μηχανής, (βλ. σχήμα 3.2). Σε εκτενέστερες αναλύσεις μελετώνται ξεχωριστά οι περιπτώσεις πολύ μικρών μηχανών (από 0,1kW έως 10kW) καθώς και οι πολύ μεγάλες μηχανές (≥ 500 kW), οπότε και προκύπτουν αποτελέσματα μεγαλύτερης ακρίβειας. Τέλος από την προσομοίωση των διαθέσιμων στοιχείων τιμών προκύπτει η εξίσωση:

$$Pr = 929.2 + 2435.6 \cdot \exp\left[\frac{-N_0}{33.4}\right] \quad N_0 \text{ (kW)}, \quad Pr \text{ (Ecu /kW)} \quad (3.1)$$

η οποία δίνει την ανηγμένη "ex-works" μέση τιμή "Pr" εμπορικών μηχανών ισχύος έως 500kW σε (Ecu₉₆/kW). Αντίστοιχα αποτελέσματα προκύπτουν ανάγοντας τις τιμές διάθεσης των ανεμογεννητριών ανά τετραγωνικό μέτρο της επιφάνειας σάρωσης της μηχανής ($\pi D^2/4$) οπότε και προκύπτει η:

$$Pr' = 337.1 + 154.1 \cdot \exp\left[\frac{-N_0}{89.1}\right] \quad N_0 \text{ (kW)}, \quad Pr' \text{ (Ecu/m}^2\text{)} \quad (3.2)$$

η οποία παρέχει την ανηγμένη "ex-works" μέση τιμή "P_f" εμπορικών μηχανών ισχύος έως 500kW σε (ΕC_U₉₆/m²).

Προσεγγιστική Ανάλυση Κόστους Υποσυστημάτων Α/Γ Μεγέθους 150-300 Kw.

1.	ΠΤΕΡΥΓΙΑ ΔΡΟΜΕΑ	20%	Κόστους Α/Γ
2.	ΠΛΗΜΝΗ ΔΡΟΜΕΑ	2%	»
3.	ΛΕΟΝΑΣ ΧΑΜΗΛΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ	3%	»
4.	ΕΔΡΑΝΑ ΛΕΟΝΑ ΧΑΜ. ΣΤΟΦΩΝ	2%	»
5.	ΠΛΑΙΣΙΟ ΘΑΛΑΜΟΥ – ΚΑΛΥΜΜΑ	6%	»
6.	ΚΙΒΩΤΙΟ	15%	»
7.	ΠΕΔΗ	3%	»
8.	ΥΔΡΑΥΛΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	3%	»
9.	ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ ΘΑΛΑΜΟΥ	3%	»
10.	ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	8%	»
11.	ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΖΟΜΕΝΟΣ ΕΛΕΓΚΤΗΣ - ΗΛΕΚΤΡ. ΠΙΝΑΚΕΣ – ΚΑΛΩΔΙΩΣΕΙΣ	15%	»
12.	ΠΥΡΓΟΣ	20%	»
ΣΥΝΟΛΟ		100%	
13.	ΤΟ ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ ΕΡΓΩΝ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΚΑΘΩΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΑΝΕΓΕΡΣΗΣ ΤΩΝ Α/Γ ΕΝΟΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΓΙΑ ΤΙΣ ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΚΤΙΜΑΤΑΙ ΣΕ 30% ΠΕΡΙΠΟΥ ΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΠΡΟΜΗΘΕΙΑΣ ΤΩΝ Α/Γ ΤΟΥ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ.		

§ 3.4 Κόστος Ίδρυσης μιας Αιολικής Εγκατάστασης

§ 3.4.1 Αρχικό κόστος

Η διαχρονική αξία του κόστους μιας ενεργειακής εγκατάστασης είναι ένας συνδυασμός του αρχικού κόστους επένδυσης και του αντίστοιχου κόστους συντήρησης και λειτουργίας της εγκατάστασης.

Το **αρχικό κόστος** μιας ενεργειακής εγκατάστασης περιλαμβάνει την αγορά, μεταφορά και εγκατάσταση του απαραίτητου εξοπλισμού (π.χ. για αιολική εγκατάσταση, αγορά και εγκατάσταση της ανεμογεννήτριας) καθώς και του απαραίτητου ηλεκτρονικού-ηλεκτρικού εξοπλισμού, είτε για την αυτόνομη διαχείριση και αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας, είτε για τη σύνδεση με το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο.

Πιο συγκεκριμένα το αρχικό κόστος ίδρυσης μιας αιολικής μονάδας συνίσταται από το **κόστος αγοράς** των ανεμογεννητριών καθώς και από το **κόστος εγκατάστασης**. Στο κόστος εγκατάστασης συμπεριλαμβάνεται το κόστος μεταφοράς και εκτελωνισμού, το κόστος θεμελίωσης και ανέγερσης των μηχανών, το κόστος διασύνδεσης με το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο ή τις καταναλώσεις, τα κόστη μελέτης, επίβλεψης, διαμόρφωσης περιβάλλοντος χώρου, το κόστος των πιθανών έργων οδοποιίας, το κόστος αντικεραυνικής προστασίας, το κόστος των απαραίτητων αδειών και εγκρίσεων, τα πιθανά χρηματοοικονομικά έξοδα καθώς και το κόστος του οικοπέδου του αιολικού σταθμού.

§ 3.4.2 Κόστος αγοράς και εγκατάστασης

Για τον προσδιορισμό του κόστους αγοράς και εγκατάστασης μιας οποιασδήποτε ανανεώσιμης ενεργειακής μονάδος θα πρέπει να γίνει συστηματική έρευνα αγοράς, να συζητηθούν οι όροι εγγύησης και υποστήριξης από τον πωλητή και να ληφθεί υπόψη η

συναλλαγματική ισοτιμία της δραχμής σε περιπτώσεις εισαγωγής του εξοπλισμού από το εξωτερικό. Για παράδειγμα, στον καθορισμό του κόστους αγοράς μιας ανεμογεννήτριας μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε τα αποτελέσματα της προηγούμενης παραγράφου είτε τα δημοσιευμένα αποτελέσματα παλαιότερης έρευνας αγοράς (για μηχανές έως 250kW), τα οποία περιγράφονται από μια αναλυτική σχέση που συνδέει την ανηγμένη τιμή μιας ανεμογεννήτριας "Pr" (σε Ecu/kW) με την ονομαστική της ισχύ "No", δηλαδή:

$$P_r = \frac{a}{b + N_o^x} + c \quad (0 \leq N_o \leq 500K) \quad (3.3)$$

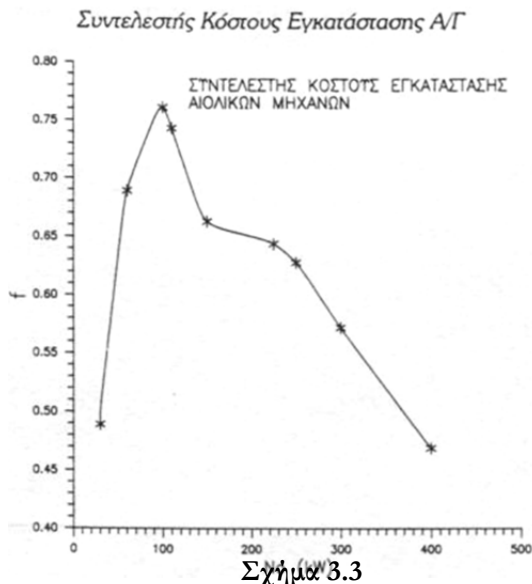
όπου $a=8.7 \times 10^5$, $b=621.$, $x=2.05$ και "c" χρονική συνάρτηση που περιγράφει τη διαχρονική μεταβολή της ασυμπτωτικής τιμής ενός αιολικού kW. Πιο συγκεκριμένα ισχύει:

$$c(t) = c_o \cdot (1 + 0.7e^{-0.125t}) \quad (3.4)$$

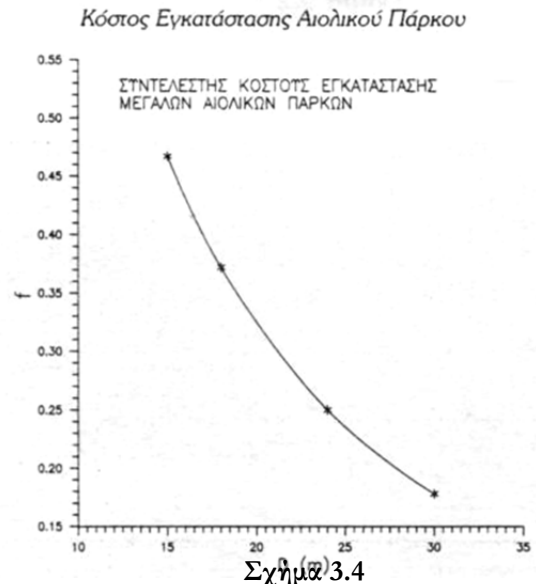
όπου $c_o=700$ Ecu/kW, η αναμενόμενη τιμή του αιολικού kW μετά 20 ÷ 30 έτη και "t" ο αριθμός των ετών μετά το 1990.

§ 3.4.3 Κόστος εγκατάστασης

Αντίστοιχα, το κόστος εγκατάστασης (συμπεριλαμβανομένης και της αξίας του οικοπέδου) εκφράζεται σαν ένα ποσοστό "F" (40÷75%) της τιμής αγοράς της ανεμογεννήτριας, το οποίο διαμορφώνεται βάσει πλήθους αστάθμητων παραγόντων, και εξαρτάται σύμφωνα και με το σχήμα 3.3 για την ελληνική αγορά από την ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι για περιπτώσεις αιολικών πάρκων σημαντικής ονομαστικής αξίας υπάρχει σοβαρή συμπίεση του κόστους εγκατάστασης, η οποία φθάνει και στα επίπεδα του 50%, βλέπε και σχήμα 3.4 που αναφέρεται στη Γερμανική αγορά. Αντίστοιχη μείωση, όχι όμως στον ίδιο βαθμό, παρατηρείται και στη τιμή αγοράς των αιολικών μηχανών, που σε αρκετές περιπτώσεις υπερβαίνει και το 20% του κόστους αγοράς μεμονωμένων μηχανών.



Σχήμα 3.3



Σχήμα 3.4

§ 3.4.4 Κύριες συνιστώσες κόστους αρχικής επένδυσης

Συνοψίζοντας, η διαχρονική αξία μετά -n χρόνια του κόστους αρχικής εγκατάστασης "ICn"

μιας αιολικής ενεργειακής επένδυσης δίνεται σαν:

$$IC_n = \alpha \cdot IC_o \cdot \prod_{i=1}^{i=n} (1 + i_1) + \beta \cdot IC_o \cdot \prod_{i=1}^{i=n} (1 + i'_1) + \gamma \cdot IC_o \quad (3.5)$$

όπου με "ICo" συμβολίζεται το κόστος ίδρυσης της εγκατάστασης τη χρονική στιγμή υλοποίησης της επένδυσης. Χρησιμοποιώντας την παραπάνω ανάλυση θα ισχύει ότι:

$$IC_o = P_r \cdot N_o \cdot (1 + f) \quad (3.6)$$

Στην εξίσωση (3.5) ο όρος " $\alpha \cdot IC_o$ " συμβολίζει τα ίδια επενδεδυμένα κεφάλαια, για τα οποία επιδιώκεται ετήσια απόδοση ίση με " i ". Αντίστοιχα με " $\beta \cdot IC_o$ " περιγράφονται τα ξένα κεφάλαια που χρησιμοποιούνται στην επένδυση, των οποίων το αντίστοιχο ετήσιο κόστος λαμβάνεται ίσο με " i' ". Τέλος στην εξίσωση (3.5) λαμβάνεται μέριμνα και για την περίπτωση επιδοτήσεων και ευνοϊκών χρηματοδοτήσεων, βάσει των υφισταμένων αναπτυξιακών ή επενδυτικών κινήτρων, κατά το ποσό " $\gamma \cdot IC_o$ ". Με βάση τα παραπάνω είναι προφανές ότι:

$$\alpha + \beta + \gamma = 1.0 \quad (3.7)$$

§ 3.5 Κόστος Συντήρησης και Λειτουργίας Αιολικής Μονάδος

Το κόστος συντήρησης και λειτουργίας της εγκατάστασης αποτελείται από το λεγόμενο **σταθερό** και το **μεταβλητό** κόστος λειτουργίας.

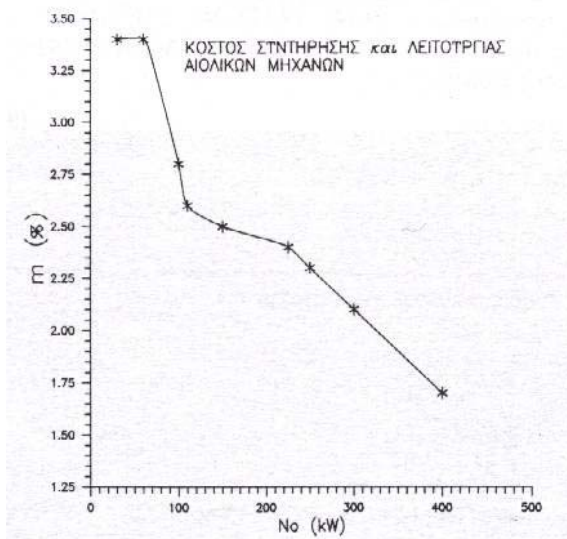
§ 3.5.1 Σταθερό κόστος συντήρησης & λειτουργίας

Το σταθερό ετήσιο κόστος συντήρησης και λειτουργίας της εγκατάστασης εκφράζεται συνήθως σαν ένα ποσοστό " $m\%$ " του αρχικού επενδεδυμένου κεφαλαίου, αναπροσαρμοζόμενο κάθε χρόνο με το ρυθμό του ετήσιου πληθωρισμού " g ", οπότε και προκύπτει ότι η διαχρονική του εξέλιξη είναι:

$$FC_n = m \cdot IC_o \cdot \left[\prod_{i=1}^{i=n} (1 + i_1) + \prod_{i=2}^{i=n} (1 + i_1) \cdot (1 + g_1) + \prod_{j=3}^{j=1-n} (1 + i_1) \cdot \prod_{j=1}^{j=2} (1 + g_j) + \dots + \prod_{j=1}^{j=n-1} (1 + g_j) \cdot (1 + i_n) \right] \quad (3.8)$$

Πιο αναλυτικά το σταθερό κόστος συντήρησης και λειτουργίας "FC" περιλαμβάνει το άμεσο κόστος συντήρησης, το έμμεσο κόστος συντήρησης και λειτουργίας καθώς και το κόστος ασφάλισης της επένδυσης. Όπως είναι προφανές το "FC" (ή το $m\%$) εμφανίζει σημαντικές διακυμάνσεις, οι οποίες εξαρτώνται από το πλήθος και το μέγεθος των χρησιμοποιούμενων μηχανών της αιολικής εγκατάστασης, από το έτος παραγωγής τους καθώς και από τον κατασκευαστή, τον εγκαταστάτη αλλά και τις τοπικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή εγκατάστασης.

Συντελ. Κόστους Συντήρησης & Λειτουργίας Α/Γ



Σχήμα 3.5

Από διαθέσιμα στοιχεία της εγχώριας αγοράς (1993) δίνεται στο σχήμα 3.5 η μεταβολή του "m₀" (χωρίς το κόστος ασφάλισης) σαν συνάρτηση της ονομαστικής ισχύος για μεμονωμένες μηχανές. Επιπλέον από αντίστοιχες μελέτες σε αμερικανικά και ευρωπαϊκά αιολικά πάρκα καταγράφεται μια ετήσια μείωση του "m₀" κατά περίπου 0.1% λόγω της σταδιακής βελτίωσης της αξιοπιστίας των παραγόμενων μηχανών. Τέλος παρατηρείται μια επίσης αξιόλογη μείωση του σταθερού κόστους συντήρησης και λειτουργίας στην περίπτωση των αιολικών πάρκων. Η μείωση της τιμής του "m₀" για μεγάλα αιολικά πάρκα (περισσότερες από 100 μηχανές) πλησιάζει τα επίπεδα του 40% σε σχέση με αυτήν μιας

μεμονωμένης μηχανής ίδιας ισχύος με αυτές που συνιστούν την αιολική εγκατάσταση.

Κόστος Συντήρησης & Λειτουργίας Α.Π.

Συντελεστής	m ₀ '	m ₀ "	δ	m
Μέγιστη Τιμή	1.3%	1.0%	2.3%	4.1%
Ελάχιστη Τιμή	0.3%	1.0%	1.3%	2.3%
Μέση Τιμή	0.8%	1.0%	1.8%	3.2%

Πίνακας 3.2

Στην τιμή "m₀" του συντελεστή σταθερού κόστους συντήρησης και λειτουργίας δεν περιλαμβάνεται το κόστος "δ" πιθανής ασφάλισης της εγκατάστασης. Στην περίπτωση που συναφθεί συμφωνία ασφάλισης του προσωπικού, της εγκατάστασης αλλά και μιας ελάχιστης τιμής της ετήσιας ενεργειακής παραγωγής, ο συντελεστής κόστους ασφάλισης παίρνει τιμές της τάξης του 1.4%. Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή "m₀" και του συντελεστή ασφάλισης "δ" για διάφορες τυπικές περιπτώσεις μηχανών που ανήκουν σε μεγάλα (>100 μηχανές) αιολικά πάρκα. Υπενθυμίζεται δε ότι:

$$m = m_0 + \delta \tag{3.9}$$

§ 3.5.2 Μεταβλητό κόστος συντήρησης και λειτουργίας

Αντίστοιχα, το μεταβλητό κόστος συντήρησης και λειτουργίας της μονάδος οφείλεται κυρίως στην αντικατάσταση βασικών τμημάτων της εγκατάστασης, τα οποία έχουν μικρότερο χρόνο ζωής από τη συνολική εγκατάσταση, όπως για παράδειγμα τα πτερύγια της περρωτής, το κιβώτιο μετάδοσης και η ηλεκτρική γεννήτρια μιας αιολικής εγκατάστασης.

Εάν με "r_i" συμβολιστεί το κόστος αντικατάστασης των "k_o" σημαντικών αυτών τμημάτων της εγκατάστασης εκφραζόμενο σαν ποσοστό του αρχικού κόστους αγοράς και εγκατάστασης της ενεργειακής μονάδος "IC_o", το μεταβλητό κόστος συντήρησης και λειτουργίας της εγκατάστασης δίνεται σαν:

$$VC_n = IC_0 \cdot \sum_{k=1}^{k=k_0} r_k \cdot \sum_{i=1}^{i=ik} (1+g)^{1 \cdot k} \cdot \sum_{i=1}^{i=ik} (1+i)^{n-i \cdot k} \quad (3.10)$$

όπου με τη χρήση της παραμέτρου "Ik" συμβολίζεται το ακέραιο μέρος του πηλίκου $\lfloor (n - 1) / k_{max} \rfloor$ και με "k_{max}" συμβολίζεται ο χρόνος ζωής του καθενός από τα k (όπου k = 1 - k₀) τμήματα της εγκατάστασης, που έχουν συντομότερο χρόνο ζωής από τον αντίστοιχο χρόνο ζωής της κεντρικής μονάδος. Για πρακτικούς καθαρά λόγους στην εξίσωση (9.19) έχει χρησιμοποιηθεί ένα μέσο διαχρονικό επιτόκιο "i" και ένας μέσος διαχρονικά πληθωρισμός "g", με όποια πιθανή μείωση ακρίβειας η προσέγγιση αυτή συνεπάγεται.

Συντελεστής Μεταβλητού Κόστους Συντήρησης Α/Γ

Διάμετρος Μηχανής	15m	18m	24m	30m
Πτερόγιο	12.9%	13.3%	14.4%	15.3%
Υπεριατασκευή	34.7%	36.0%	39.1%	41.8%
Γεννήτρια	3.2%	3.2%	2.9%	2.6%
Κέλυφος	11.9%	12.5%	13.3%	13.8%
Ηλεκτρικά – Έλεγχος	29.5%	27.4%	23.4%	20.1%
Πύργος	7.8%	7.6%	6.9%	6.4%
ΣΥΝΟΛΟ	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%

Πίνακας 3.3

Στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζεται η ποσοστιαία συμμετοχή "r_i" των κύριων μερών μιας αιολικής εγκατάστασης στο συνολικό κόστος μιας μηχανής, σαν συνάρτηση της διαμέτρου της πτερωτής της ανεμογεννήτριας.

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (3.5), (3.8) και (3.10) το συνολικό διαχρονικό κόστος της ενεργειακής εγκατάστασης μπορεί να εκφραστεί βάσει της παρακάτω εξίσωσης:

$$C_n = IC_n + VC_n + FC_n \quad (3.11)$$

η οποία περιγράφει τη χρονική εξέλιξη του συνολικού κόστους μιας παραγωγικής μονάδος αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας.

§3.6 Έσοδα Λειτουργίας Αιολικών Σταθμών

Η μέση ετησίως παραγόμενη ενέργεια από μια εγκατάσταση αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ονομαστικής ισχύος "N₀" δίνεται σαν:

$$E = 8760 \cdot \omega \cdot \Delta \cdot N_0 \quad (\text{kWh}) \quad (3.12)$$

όπου με "m" συμβολίζεται ο μέσος συντελεστής ισχύος της εγκατάστασης και με "Δ"* η τεχνική διαθεσιμότητα της εγκατάστασης. Ο μέσος συντελεστής ισχύος εξαρτάται από τα ηλιακά, υδροδυναμικά ή ανεμολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής εγκατάστασης και από τη χαρακτηριστική λειτουργία της εγκατάστασης, π.χ. ηλιακός συλλέκτης, μικρός υδροστρόβιλος ή ανεμογεννήτρια. Αξίζει να σημειωθεί ότι για την περίπτωση της αιολικής ενέργειας, μόλις πρόσφατα δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στην σωστή αλληλεπίδραση του τοπικού αιολικού δυναμικού και των λειτουργικών χαρακτηριστικών μιας ανεμογεννήτριας,

*Τεχνική διαθεσιμότητα T_L = (8760 - ώρες βλαβών)/8760
 Πραγματική διαθεσιμότητα T_R = ώρες παραγωγής / 8760

υπογραμμίζοντας τη δυνατότητα σημαντικής αύξησης της παραγόμενης ενέργειας.

Πιο συγκεκριμένα ο μέσος συντελεστής ισχύος μιας αιολικής εγκατάστασης δίνεται σαν:

$$\omega = \int_{V_c}^{V_f} \frac{N(V)}{N_0} \cdot f(V) \cdot dV \quad (3.13)$$

Τα συνολικά έσοδα (σε μια περίοδο -n ετών) από τη χρήση μιας ανανεώσιμης εγκατάστασης περιγράφονται ικανοποιητικά βάσει της εξίσωσης (3.14), δηλαδή:

$$R_n = \sum_{j=1}^n [(E_j \cdot c_j - \Phi_j) \cdot \prod_{m=j}^{m=n} (1 + i_m)] \quad (3.14)$$

όπου με (c_j) την ισοδύναμη **τιμή διάθεσης** της παραγόμενης ενέργειας τη χρονική περίοδο "j" και με " Φ_j " τα ποσά που καταβάλλονται ως **φόρος επί των κερδών** της επένδυσης.

Να σημειωθεί " $\Phi_1=0.0$ " και ότι οι πιθανοί προς καταβολή φόροι βασίζονται στα έσοδα και τα κέρδη της προηγούμενης χρονικής περιόδου. Ο υπολογισμός του " Φ_j " προκύπτει από τη λογιστική θέση της εταιρείας, εξαρτάται δε από τα ετήσια έσοδα και έξοδα, τις αποσβέσεις και τις επενδύσεις της επιχείρησης καθώς και από την φορολογική πολιτική της πολιτείας. Για το λόγο αυτό η ακριβής εκτίμησή του ξεφεύγει από τους στόχους της παρούσας ανάλυσης.

Αντίστοιχα η τιμή διάθεσης της παραγόμενης ενέργειας προκύπτει στη γενικότερη περίπτωση σαν ένας συνδυασμός του κόστους " c_s " της ενέργειας, η οποία χρησιμοποιείται (εξοικονομείται) από τον παραγωγό σε αντικατάσταση συμβατικής ενέργειας, και της τιμής πώλησης της τυχόν περίσσειας ενέργειας στο τοπικό δίκτυο " c_a " που καθορίζεται μέχρι σήμερα από τη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (μονοψωνιακή αγορά) βάσει και του ισχύοντος νομικού πλαισίου Ν2244/94. Η τιμή αγοράς από τη ΔΕΗ της παραγόμενης ενέργειας, εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η σύνδεση με το ηπειρωτικό δίκτυο ή με τοπικά νησιωτικά δίκτυα, από το είδος και το μέγεθος του τοπικού θερμοηλεκτρικού σταθμού (αεριοστρόβιλοι, "Diesel", "Μαζούτ") καθώς και από το εάν το παραγόμενο φορτίο είναι φορτίο αιχμής, κανονικής ή χαμηλής ζήτησης. Αντίστοιχα η τιμή αντικατάστασης της συμβατικής ενέργειας εξαρτάται από το είδος του τιμολογίου του καταναλωτή (π.χ. οικιακό, βιοτεχνικό, επαγγελματικό κ.α.), από το μέγεθος του καταναλωτή (εγκατεστημένο φορτίο, τριφασικό-μονοφασικό κ.λπ.), καθώς και από την ύπαρξη ή μη νυκτερινού τιμολογίου ή τιμολογίου ειδικής κατηγορίας.

Αν ακολουθώς ορίσουμε το συντελεστή ιδιοχρησίας " S_j " της παραγόμενης ενέργειας τη χρονική περίοδο "j" σαν το λόγο της ενέργειας που χρησιμοποιεί ο παραγωγός προς τη συνολικά παραγόμενη ενέργεια, τότε η τιμή διάθεσης της ανανεώσιμης ενέργειας προκύπτει σαν:

$$c_j = s_j \cdot c_{sj} + (1 - s_j) \cdot c_{aj} \quad (3.15)$$

Για την ολοκλήρωση της ανάλυσης προσδιορισμού του κόστους διάθεσης της παραγόμενης ενέργειας, είναι σημαντικό να συμπεριλάβουμε και τον ετήσιο ρυθμό αναπροσαρμογής της τιμής αντικατάστασης και της τιμής πώλησης της διαθέσιμης περίσσειας της ανανεώσιμης ενέργειας " e_s " και " e_a " αντίστοιχα. Στην περίπτωση αυτή η τιμή αντικατάστασης της συμβατικής ενέργειας από την παραγόμενη αιολική ενέργεια τη χρονική περίοδο "j" αναφέρεται στα χρήματα που εξοικονομούνται από τη μη αγορά συμβατικής ενέργειας και

μπορεί να εκφραστεί σαν:

$$\mathbf{c}_{s_j} = \mathbf{c}_{s_0} \cdot \prod_{k=1}^{k=j} (\mathbf{1} + \mathbf{e}_{s_k}) \quad (3.16)$$

όπου με " \mathbf{c}_{s_0} " συμβολίζεται η τιμή αντικατάστασης της συμβατικής ενέργειας τη χρονική στιγμή πραγματοποίησης της επένδυσης.

Αντίστοιχα, η τιμή πώλησης της περίσσειας της ενέργειας στο τοπικό (ή εθνικό) δίκτυο εξαρτάται αποκλειστικά από την ενεργειακή-τιμολογιακή πολιτική της ΔΕΗ (μονοφωνιακή αγορά) απέναντι στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και στην ιδιωτική πρωτοβουλία, και τη χρονική περίοδο " j " μπορεί να γραφεί σαν:

$$\mathbf{c}_{a_j} = \mathbf{c}_{a_0} \cdot \prod_{k=1}^{k=j} (\mathbf{1} + \mathbf{e}_{a_k}) \quad (3.17)$$

όπου με " \mathbf{c}_{a_0} " συμβολίζεται η τιμή πώλησης της περίσσειας της ενέργειας στο τοπικό δίκτυο τη χρονική στιγμή της έναρξης λειτουργίας της εγκατάστασης.

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (3.15), (3.16) και (3.17) μέσα στην εξίσωση (3.14) μπορούμε να εκφράσουμε τα συνολικά έσοδα από τη χρήση μιας ενεργειακής εγκατάστασης αξιοποίησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σαν:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_n = & 8760 \cdot \mathbf{N}_0 \cdot \left\{ \mathbf{c}_{s_0} \cdot \sum_{k=1}^n [\omega_j \cdot \Delta_j \cdot s_j \cdot \prod_{k=1}^{k=j} (\mathbf{1} + \mathbf{e}_{s_k}) \cdot \prod_{l=j}^{l=n} (\mathbf{1} + \mathbf{i}_l)] + \right. \\ & \left. \mathbf{c}_{a_0} \cdot \sum_{j=1}^n [\omega_j \cdot \Delta_j \cdot (\mathbf{1} - s_j) \prod_{k=1}^{k=j} (\mathbf{1} + \mathbf{e}_{a_k}) \cdot \prod_{l=j}^{l=n} (\mathbf{1} + \mathbf{i}_l)] \right\} - \sum_{j=1}^n \Phi_j \cdot \prod_{l=j}^{l=n} (\mathbf{1} + \mathbf{i}_l) \end{aligned} \quad (3.18)$$

§ 3.7 Χρόνος Απόσβεσης-Εξίσωση Νεκρού Σημείου

Η εξίσωση νεκρού σημείου χρησιμοποιείται για την εύρεση του χρονικού σημείου απόσβεσης μιας επένδυσης, δηλαδή του χρονικού σημείου που τα έσοδα και τα έξοδα της επένδυσης εξισώνονται. Εάν ο χρόνος απόσβεσης είναι σημαντικά μικρότερος του ωφέλιμου χρόνου μιας ενεργειακής επένδυσης, τότε η επένδυση είναι ισχυρά ελκυστική από οικονομικής άποψης. Στην περίπτωση που ο χρόνος απόσβεσης πλησιάζει ή και υπερβαίνει το χρόνο ζωής της εγκατάστασης, τότε η επένδυση παύει να είναι βιώσιμη.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η εξίσωση νεκρού σημείου προκύπτει, συγκρίνοντας τις εξισώσεις (9.20) και (9.27) οπότε και καταλήγουμε στην παρακάτω εξίσωση νεκρού σημείου:

$$\mathbf{ICn} + \mathbf{FCn} + \mathbf{VCn} = \mathbf{Rn} \quad (\text{για } \mathbf{n} = \mathbf{n}^*) \quad (3.19)$$

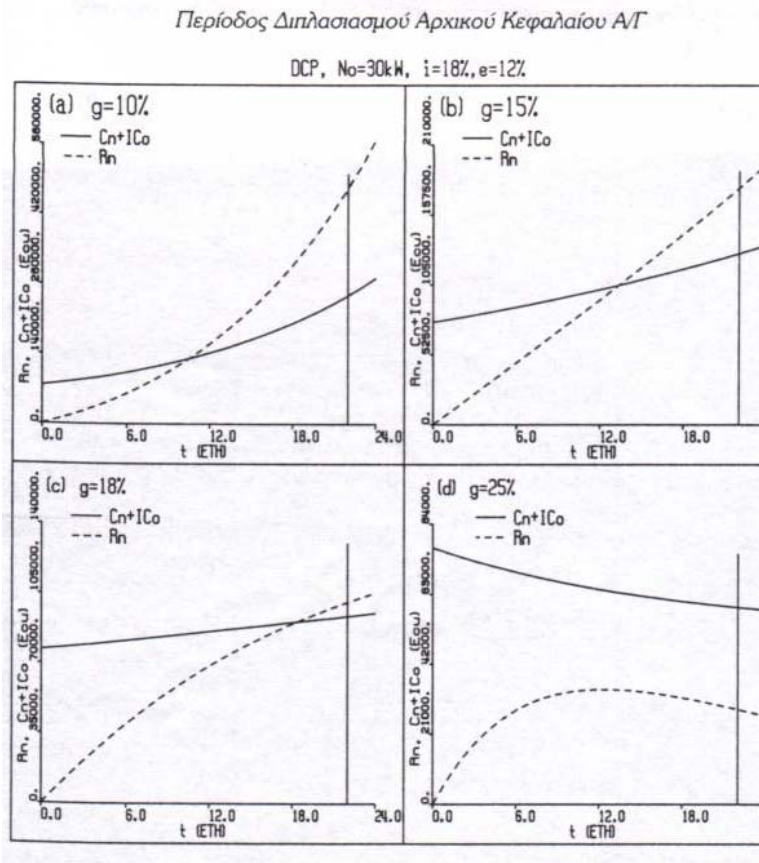
η οποία επιλύμενη μας προσδιορίζει το χρόνο απόσβεσης " \mathbf{n}^* " της ενεργειακής εγκατάστασης. Όπως παρατηρούμε από τις εξισώσεις (3.11), (3.18) και (3.19) ο χρόνος απόσβεσης μιας ανανεώσιμης ενεργειακής εγκατάστασης εξαρτάται από το αρχικό κόστος εγκατάστασης, την ονομαστική ισχύ της μονάδος παραγωγής ενέργειας, το μέσο συντελεστή ισχύος της εγκατάστασης, το κόστος συντήρησης και λειτουργίας, την τεχνική διαθεσιμότητα

της εγκατάστασης, το κόστος του χρήματος και τον πληθωρισμό, την τιμή διάθεσης της παραγόμενης ενέργειας, το συντελεστή ιδιόχρησης και το ρυθμό ετήσιας αναπροσαρμογής της τιμής διάθεσης της ανανεώσιμης ενέργειας.

Για την επίλυση της εξίσωσης (3.19) και τον αξιόπιστο προσδιορισμό του χρόνου απόσβεσης είναι απαραίτητος ο ακριβής καθορισμός όλων των συντελεστών κόστους και οφέλους της εγκατάστασης. Στην πραγματικότητα όμως είναι εντελώς αδύνατον να καθορισθούν εκ των προτέρων οι ακριβείς τιμές όλων αυτών των παραμέτρων, γεγονός που περιορίζει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων μας. Για τη σφαιρική αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, στο επόμενο τμήμα της παρούσας εργασίας παρουσιάζεται η μεταβολή του χρόνου απόσβεσης σαν συνάρτηση της μεταβολής των αριθμητικών τιμών των παραμέτρων, που υπεισέρχονται στην εξίσωση του νεκρού σημείου, εξ.(3.19).

§ 3.8 Βαθμός Οικονομικής Απόδοσης-Χρόνος Διπλασιασμού Κεφαλαίου

Μια επίσης ενδιαφέρουσα οικονομική παράμετρος μιας ενεργειακής επένδυσης, αποτελεί η χρονική περίοδος διπλασιασμού του αρχικού κεφαλαίου (Double Capital Period, "DCP"), η οποία ορίζεται σαν η χρονική περίοδος που απαιτείται για να διπλασιάσει ο επενδυτής το αρχικά επενδυμένο κεφάλαιό του, σε σταθερές τιμές.



Σχήμα 3.6

Εξετάζοντας το παράδειγμα του σχήματος 3.6, και το οποίο αφορά μια μικρή ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 30kW, με χρόνο απόσβεσης περίπου 9 χρόνια (θεωρώντας μέσο ετήσιο πληθωρισμό για όλη την διάρκεια λειτουργίας της επένδυσης ίσο με 15% και μέσο ετήσιο κόστος του χρήματος ίσο με 18%), για μεταβολή του μέσου ετήσιου πληθωρισμού από 10% έως και 25%, παρατηρούμε ότι η περίοδος διπλασιασμού του αρχικού κεφαλαίου είναι συνάρτηση του πληθωρισμού, δεδομένου ότι για πληθωρισμό 10% είναι μόλις 10.5 έτη, για

πληθωρισμό 18% είναι 18.3 έτη, ενώ για πληθωρισμό 25% δεν υπάρχει περίπτωση διπλασιασμού του αρχικού κεφαλαίου, μέσα στον ωφέλιμο χρόνο ζωής της ανεμογεννήτριας.

Όπως είναι ευκόλως κατανοητό, η περίοδος διπλασιασμού του αρχικού κεφαλαίου παρουσιάζει ένα ακόμα στοιχείο που θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν κατά την αξιολόγηση της

οικονομικής βιωσιμότητας ενεργειακών συστημάτων τα οποία αξιοποιούν τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η περίοδος διπλασιασμού αρχικού κεφαλαίου παρουσιάζει το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό ότι αναφέρεται σε σταθερές τιμές, γεγονός που εγγυάται στον επενδυτή την σε σταθερές τιμές απόδοση του επενδυμένου κεφαλαίου του, από τη λειτουργία των ανανεώσιμων σταθμών παραγωγής ενέργειας.

Ως εκ τούτου, μια ολοκληρωμένη διαδικασία αξιολόγησης οικονομικής βιωσιμότητας-ελκυστικότητας αντίστοιχων επενδύσεων, θα έπρεπε να ικανοποιεί και τα δύο κριτήρια "χρόνου απόσβεσης" και "χρόνου διπλασιασμού", βάσει της παρακάτω συλλογιστικής:

i. Μια ενεργειακή επένδυση είναι οικονομικά **βιώσιμη** όταν ο χρόνος απόσβεσης είναι μικρότερος από τον ωφέλιμο χρόνο ζωής της εγκατάστασης.

ii. Μια οικονομικά βιώσιμη ενεργειακή επένδυση είναι **οικονομικά** ελκυστική όταν ο χρόνος διπλασιασμού είναι μικρότερος από τον ωφέλιμο χρόνο ζωής της εγκατάστασης.

Προφανώς, όσο μικρότερος είναι ο χρόνος απόσβεσης και ο χρόνος διπλασιασμού, μιας επένδυσης, τόσο περισσότερο αυξάνεται η ελκυστικότητά της.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

§ 4.1 Εισαγωγή Στην Ανάλυση Αιολικών Μηχανών

Οι αιολικές μηχανές αποτελούν ανθρώπινες επινοήσεις, που έχουν σαν σκοπό την αξιοποίηση της κινητικής ενέργειας του ανέμου. Μέχρι σήμερα έχει προταθεί και δοκιμασθεί ένας πολύ μεγάλος αριθμός ανεμογεννητριών, χωρίς όμως να επιτευχθεί ο επιθυμητός βαθμός εκμετάλλευσης της ενέργειας του ανέμου. Οι μηχανές που προαναφέραμε κατατάσσονται σε οριζοντίου και κατακόρυφου άξονα, σε αργόστροφες και ταχύστροφες, σε πολυπτέρυγες, και ολιγοπτέρυγες, μικρές- μεσαίες-μεγάλες κ.λ.π. Βασικές παράμετροι των ανεμοκινητήρων, εκτός της αποδιδόμενης ισχύος, είναι η παράμετρος περιστροφής, η στιβαρότητα της περρωτής, η διάμετρος και η ταχύτητα περιστροφής της μηχανής, το ύψος τοποθέτησης κ.α.

Οι μηχανές τύπου έλικας είναι πλέον καθιερωμένος τύπος των μηχανών οριζοντίου άξονα, και αποτελούνται κατά κύριο λόγο από την περρωτή, τον άξονα κίνησης, το κιβώτιο μετάδοσης, το σύστημα πέδησης, το σύστημα προσανετισμού, την ηλεκτρική γεννήτρια και τον πύργο στήριξης. Οι υπόλοιπες γνωστές κατασκευές μηχανών οριζοντίου άξονα είναι ο παραδοσιακός αμερικανικός ανεμόμυλος. Ο ανεμόμυλος τύπου "Andreau-Enfield", οι ανεμογεννήτριες με χρήση διαφόρων τύπων επιταχυντών καθώς και οι παραδοσιακοί ανεμόμυλοι με περρύγια από πανί ή "nylon".

Οι μηχανές τύπου "Darrieus" και τύπου "Savonius" αποτελούν τους πλέον ανταγωνιστικούς ανεμοκινητήρες κατακόρυφου άξονα. Οι μηχανές της μορφής αυτής έχουν αυτόματο προσανατολισμό στη διεύθυνση του ανέμου, είναι φθηνότερες και έχουν το σύστημα μετάδοσης της κίνησης στο έδαφος, αλλά έχουν μικρότερο αεροδυναμικό βαθμό απόδοσης και προβλήματα κατά την εκκίνησή τους. Οι μηχανές τύπου "Tornado", τύπου "Lebost" τύπου "Musgrove", τύπου "Gyromill" και το σύστημα "Cyclonico" αποτελούν ενδιαφέρουσες εναλλακτικές προτάσεις για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας.

Στο σύνολο σχεδόν των χρησιμοποιημένων αιολικών μηχανών, η καμπύλη ισχύος συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου αποτελείται από την μεταβατική περιοχή και την περιοχή ονομαστικής λειτουργίας, με χαρακτηριστικές ταχύτητες ανέμου την ταχύτητα έναρξης και διακοπής λειτουργίας της μηχανής καθώς και την ταχύτητα ονομαστικής λειτουργίας της εγκατάστασης.

§ 4.2 Κατάταξη Αιολικών Μηχανών

Οι επικρατέστεροι τύποι ανεμογεννητριών ταξινομούνται κυρίως σύμφωνα με τον προσανατολισμό των αξόνων τους σε σχέση με τη ροή του ανέμου. Ως εκ τούτου οι πλέον διαδεδομένοι τύποι ανεμοκινητήρων είναι οι ανεμογεννήτριες "οριζοντίου" και οι ανεμογεννήτριες "κατακόρυφου" άξονα.

Οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα έχουν συνήθως τον άξονα τους παράλληλο προς την κατεύθυνση του ανέμου (head on), ενώ σε μερικές περιπτώσεις έχουμε ανεμογεννήτριες των οποίων ο άξονας είναι παράλληλος προς την επιφάνεια της γης και κάθετος προς την κατεύθυνση του ανέμου (cross-wind).

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα εμφανίζουν το σημαντικό πλεονέκτημα της αυτόματης προσαρμογής στη διεύθυνση του ανέμου, δεδομένου ότι ο άξονας των είναι κάθετος σε αυτή καθώς και στην επιφάνεια της γης.

Οι υφισταμένες αιολικές μηχανές κατατάσσονται επίσης σε ταχύστροφες και σε αργόστροφες, ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής των ή ακριβέστερα ανάλογα με την τιμή της παραμέτρου περιστροφής "λ". Η ταχύτητα περιστροφής μιας ανεμογεννήτριας εξαρτάται εκτός από τις αεροδυναμικές παραμέτρους και από το μέγεθος των πτερυγίων της μηχανής, δεδομένου ότι πρέπει να ληφθούν υπόψη λόγοι στατικής αντοχής, φαινόμενα δυναμικών καταπονήσεων και ταλαντώσεων, φυγόκεντρες δυνάμεις κ.λ.π. Επιπλέον, καθοριστικό ρόλο παίζει και η διασύνδεση ή μη της εγκατάστασης με το ηλεκτρικό δίκτυο, δεδομένου ότι σε περιπτώσεις σύγχρονων ηλεκτρογεννητριών διασυνδεδεμένων με το δίκτυο, το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα πρέπει να έχει τη συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου, δηλαδή 50Hz για τη χώρα μας και τις χώρες Ε.Ε και 60Hz για τις Η.Π.Α.

Ένα μέγεθος που συνδέεται άμεσα με τη γωνιακή ταχύτητα μιας πτερωτής είναι η παράμετρος περιστροφής (tip-speed ratio) της μηχανής "λ", η οποία σαν:

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{V} \quad (4.1)$$

όπου

- "R" είναι η ακτίνα της πτερωτής,
- "ω" η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα και
- "V" η ταχύτητα του ανέμου.

Ανάλογα με τη μηχανική ισχύ "N_o" που παρέχουν οι ανεμοκινητήρες στην έξοδό τους κατατάσσονται από πλευράς μεγέθους σαν:

α. "Μικροί", όταν για την ονομαστική ισχύ τους έχουμε ότι:

$$50\text{W} \leq N_o \leq 30\text{kW} \quad (4.2)$$

β. "Μεσαίοι", όταν για την ονομαστική ισχύ τους έχουμε ότι:

$$30\text{kW} \leq N_o \leq 500\text{kW} \quad (4.3)$$

γ. "Μεγάλοι", όταν για την ονομαστική ισχύ τους έχουμε ότι:

$$500\text{kW} \leq N_o \leq 4\text{MW} \quad (4.4)$$

Ο χαρακτηρισμός μιας ανεμογεννήτριας σε μια μικρή ή μεγάλη δεν ακολουθεί αυστηρά τις τιμές των εξισώσεων (4.2) έως (4.4), δεδομένου ότι οι εν λόγω τιμές είναι ενδεικτικές, οι οποίες αλλάζουν σε κάθε χρονική περίοδο, καθώς και από συγγραφέα σε συγγραφέα.

Τέλος, οι υφισταμένες μηχανές κατατάσσονται και βάσει του αριθμού των πτερυγίων που διαθέτει η πτερωτή τους. Ως εκ τούτου οι ανεμογεννήτριες διαχωρίζονται σε πολυπτερυγες, όπως οι παραδοσιακή ανεμόμυλοι χαμηλών ταχυτήτων περιστροφής, και οι ολιγοπτερυγοί που αποτελούν πλειοψηφία των σύγχρονων ανεμογεννητριών οριζοντίου και κάθετου άξονα, με αριθμό πτερυγίων που κυμαίνεται από ένα έως τρία (1÷3) πτερύγια σε κάθε πτερωτή.



Σχήμα 4.1
Οι επικρατέστεροι τύποι Α/Γ
Ο/Α Τύπου έλικας

Τέλος μια παράμετρος που χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό και την ταξινόμηση των ανεμογεννητήρων είναι η παράμετρος στιβαρότητας "σ" (solidity) της κατασκευής, η οποία για μηχανές "οριζοντίου" άξονα ορίζεται σαν:

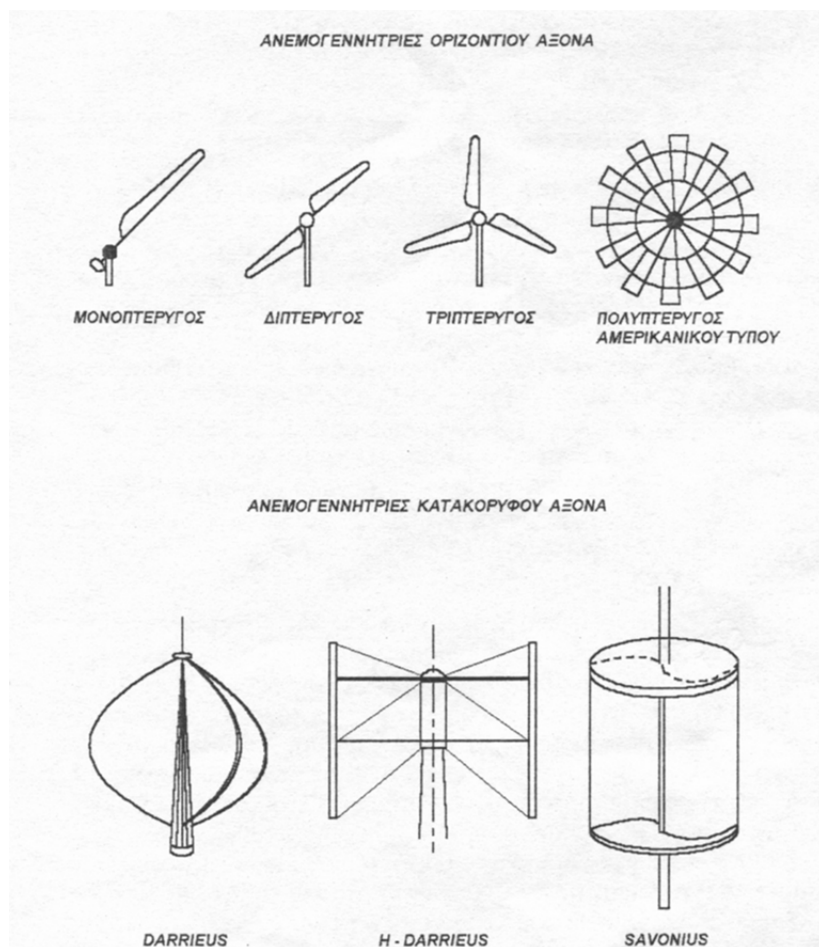
$$\sigma = \frac{z \cdot c \cdot R}{\pi R^2} \tag{4.5}$$

ενώ για μηχανές "κατακόρυφου" άξονα ορίζεται σαν:

$$\sigma = \frac{z \cdot c}{R} \tag{4.6}$$

όπου "z" ο αριθμός των πτερυγίων της πτερωτής, "R" η ακτίνα της πτερωτής και "c" η χορδή (πλάτος) των πτερυγίων της πτερωτής. Η παράμετρος στιβαρότητας δίνει το λόγο του εμβαδού όλων των πτερυγίων, προς το εμβαδόν της επιφάνειας που διαγράφουν τα πτερύγια κατά την περιστροφή τους.

Κατά κανόνα οι ανεμογεννήτριες μεγάλης στιβαρότητας είναι μηχανές "αργόστροφες", αποδίδοντας τη μέγιστη ισχύ τους σε χαμηλές τιμές της παραμέτρου περιστροφής "λ", έχουν σχετικά μικρό βαθμό απόδοσης, ενώ είναι ανθεκτικές με ελάχιστες ανάγκες συντήρησης, Επιπλέον χαρακτηρίζονται από σχετικά μεγάλες δυνάμεις στα πτερύγια και συνεπώς μεγάλη ροπή στον άξονα περιστροφής, ξεκινούν μόνες τους όταν αρχίζει να φυσάει ο άνεμος, είναι κατάλληλες για αγροτικές χρήσεις (π.χ. άντληση νερού) και στηρίζονται σε σχετικά απλή τεχνολογία.



Σχήμα 4.2 βασικότεροι τύποι ανεμογεννητριών

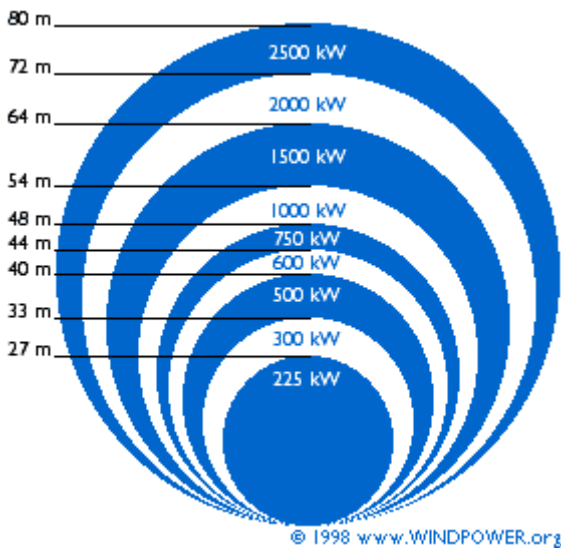
Αντίθετα, οι ανεμογεννήτριες μικρής στιβαρότητας είναι μηχανές "πολύστροφες", αποδίδοντας τη μέγιστη ισχύ τους σε μεγάλες τιμές παραμέτρου "λ", διαθέτουν σχετικά μεγάλο βαθμό απόδοσης, είναι πλέον ευπαθείς από τις μηχανές μεγάλης στιβαρότητας και χαρακτηρίζονται από σχετικά μικρές δυνάμεις στα πτερύγια και περιορισμένη ροπή στον άξονα τους. Επίσης, οι μηχανές αυτές απαιτούν κάποτε εξωτερική βοήθεια για να ξεκινήσουν, είναι κατάλληλες για ηλεκτροπαραγωγή και θεωρούνται προϊόντα αριετὰ υψηλής τεχνολογίας, ιδιαίτερα οι

μεγαλύτερες από αυτές.

Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζονται σχηματικά οι βασικότεροι τύποι αιολικών μηχανών, οπότε έχουμε μηχανές οριζοντίου και κατακόρυφου άξονα, μηχανές πολυπτερυγες και ολιγοπτερυγες, μηχανές μεγάλης και μικρής ταχύτητας περιστροφής, μηχανές μεγάλης και μικρής ισχύος καθώς και μηχανές μεγάλης και μικρής στιβαρότητας.

§ 4.3 Βασικά Χαρακτηριστικά Μεγέθη Αιολικών Μηχανών

Κατά το σχεδιασμό και την επιλογή μιας εγκατάστασης αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας, οι παράγοντες οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπόψιν και χαρακτηρίζουν μια ανεμογεννήτρια που πρόκειται να επιλεγεί είναι:

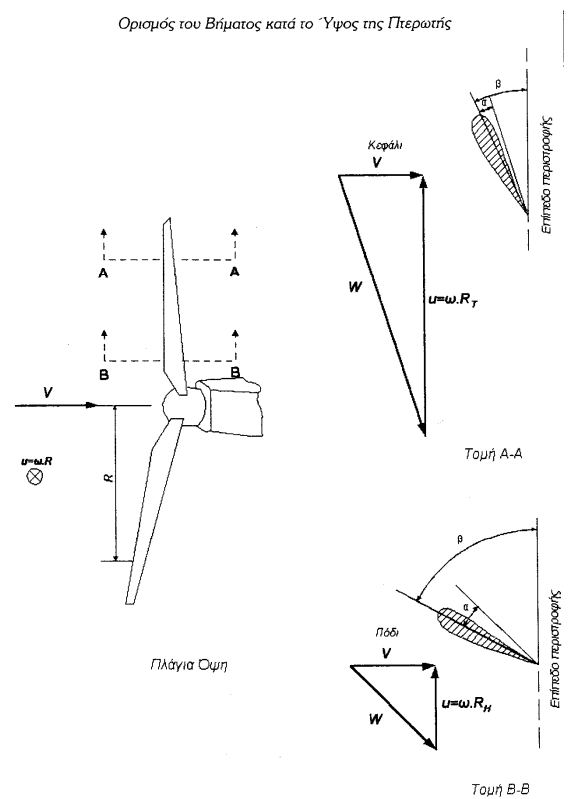


Σχήμα 4.3
Μεταβολή της ισχύος με τη διάμετρο των πτερυγίων.

β. Το ύψος τοποθέτησης "H" για μηχανές οριζοντίου άξονα. Γνωρίζουμε ότι αυξανόμενου

του ύψους αυξάνεται αφενός το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό (μέχρι το τέλος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος), αφετέρου το βάρος και το κόστος της εγκατάστασης. Επιπλέον, υπάρχουν και περιορισμοί ελαχίστου ύψους, που βασίζονται στο γεγονός ότι τα πτερώγια δεν πρέπει να βρίσκονται πολύ κοντά στο έδαφος για να αποφεύγονται φαινόμενα αλληλεπίδρασης εδάφους. Εν γένει το ύψος ενός ανεμοκινητήρα καθορίζεται με βάση τη διάμετρο της πτερωτής και οι χρησιμοποιούμενες αριθμητικές τιμές είναι

α. Η **διάμετρος πτερωτής** της ανεμογεννήτριας "D", η οποία καθορίζει το εμβαδόν το οποίο σαρώνει η πτερωτή και συνεπώς την ενεργό επιφάνεια δια μέσου της οποίας επιχειρούμε να αξιοποιήσουμε την αιολική ενέργεια. Έχοντας κάποιες εκτιμήσεις για τη μέση ροή ενέργειας μιας περιοχής καθώς και για το ποσοστό το οποίο μπορούμε να αξιοποιήσουμε, είναι δυνατός ο κατ' αρχήν καθορισμός της διαμέτρου της πτερωτής εφ' όσον είναι γνωστή η απαιτούμενη ισχύς.



Σχήμα 4.4
Βήμα πτερωγίων

μεταξύ τους $\frac{H}{D} = 1,0$ έως $\frac{H}{D} = 1,5$.

γ. **Το πλήθος των πτερυγίων "z"** της περρωτής. Είναι ο αριθμός ο οποίος μας δείχνει πόσα πτερύγια φέρει η περρωτή. Σημερινός επικρατέστερος τύπος περρωτής είναι οι διπτέρυγες και κατά κανόνα οι τριπτέρυγες.

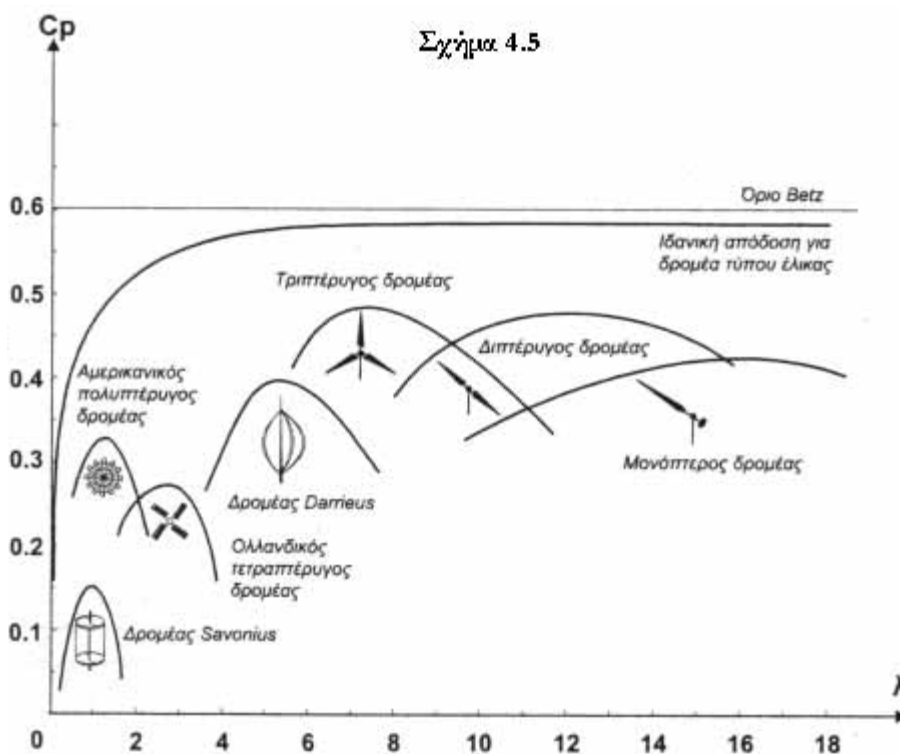
δ. **Το είδος των πτερυγίων** της περρωτής, που περιλαμβάνει αφενός τον τύπο των πτερυγίων, δηλαδή εάν αυτά ανήκουν σε κάποια τυποποιημένη κατηγορία ή όχι, το πάχος τους, τη συστροφή τους, αφετέρου τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους.

ε. **Η ονομαστική ταχύτητα περιστροφής "n"** της περρωτής, η οποία καθορίζεται από διάφορους παράγοντες, όπως η συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου σε περιπτώσεις διασυνδεδεμένων μηχανών και η αντοχή των πτερυγίων σε φυγοκεντρικές τάσεις.

στ. **Το βήμα της περρωτής**, το οποίο ορίζεται από τη γωνία "β" η οποία σχηματίζεται από τη χορδή της αεροτομής και από το επίπεδο περιστροφής της περρωτής(βλ. σχήμα). Το βήμα της περρωτής αποτελεί γεωμετρικό στοιχείο αυτής και συνήθως μεταβάλλεται από το πόδι (η πλευρά που στηρίζεται στην πλήμνη) έως το κεφάλι των πτερυγίων. Συνήθως ο ορισμός του βήματος μιας περρωτής αναφέρεται κατά σύμβαση στη θέση 2/3 του ύψους του πτερυγίου.

ζ. **ο συντελεστής ισχύος C_p** της αιολικής μηχανής, αποτελεί στην ουσία τον αεροδυναμικό βαθμό απόδοσης της περρωτής. Αξίζει να διευκρινίσουμε ότι ο συντελεστής αυτός περιγράφει το ποσοστό της ισχύος του ανέμου που εκμεταλλεύεται η περρωτή της μηχανής. Πρέπει δε να σημειωθεί ότι ακόμα και για μια ιδανική έλικα ο συντελεστής ισχύος δεν είναι δυνατόν να υπερβεί το όριο του Betz (παράρτημα Α), δηλαδή:

$$C_p \leq \frac{16}{27} = 0,593 \tag{4.7}$$



Στην πραγματικότητα ο συντελεστής Ισχύος είναι πάντοτε αρκετά μικρότερος του ορίου του Betz, λόγω της συνεκτικότητας του ανέμου, του πεπερασμένου αριθμού των πτερυγίων της περρωτής και της απώλειας κινητικής ενέργειας, που δεν μετατρέπεται σε στατική πίεση λόγω της μη βέλτιστης

σχεδίασης των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας.

η) η ονομαστική ισχύς "N_ο" της μηχανής, η οποία καθορίζει το μέγεθος μιας ανεμογεννήτριας και αποτελεί το μέτρο της στιγμιαίας ωφέλιμης παραγόμενης ενέργειας από την αξιοποίηση της αιολικής ισχύος σε μια επιφάνεια εμβαδού "Α", όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι "V" και η πυκνότητα του αέρα είναι "ρ". στην περίπτωση αυτή ισχύει η παρακάτω σχέση:

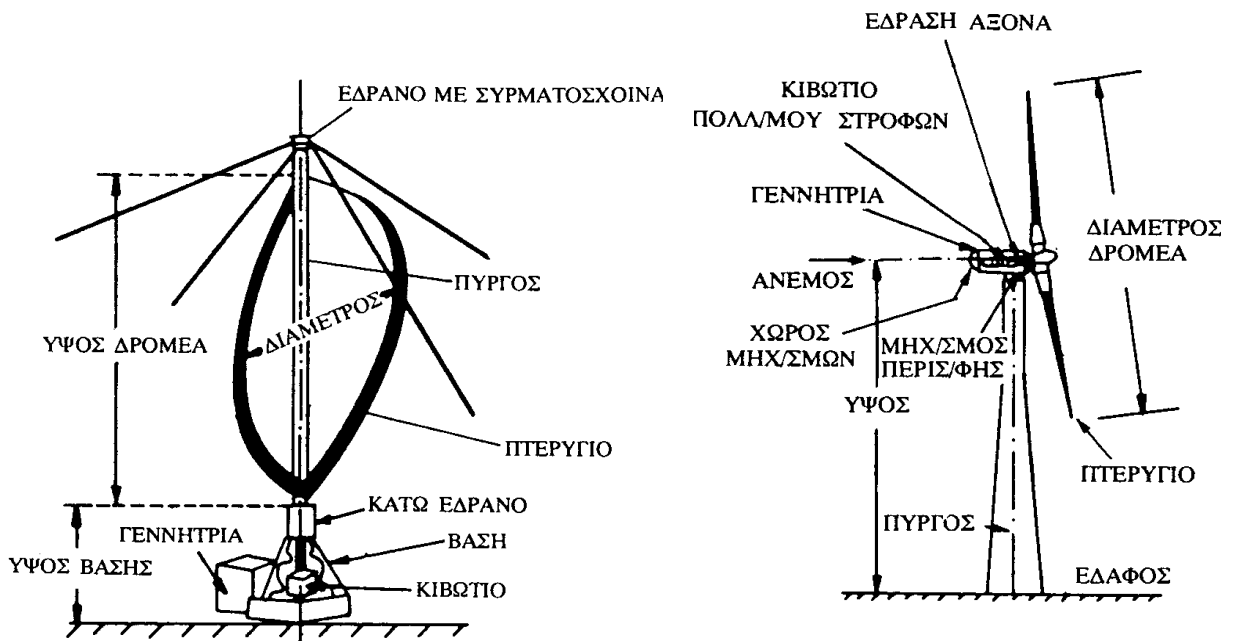
$$N = 0,5 \cdot C_p \cdot \eta \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (4.8)$$

Όπου α βαθμός απόδοσης "η" περιλαμβάνει τις απώλειες του μηχανικού συστήματος "η_Μ" (απώλειες τριβής, απώλειες εδράσεων, πολλαπλασιαστής στροφών κ.λ.π.) καθώς και τις απώλειες της ηλεκτρομηχανικής μετατροπής "η_Ε".

Εν γένει :

$$\eta = \eta_M \cdot \eta_E \quad (4.9)$$

§ 4.4 Τύποι Ανεμογεννητριών

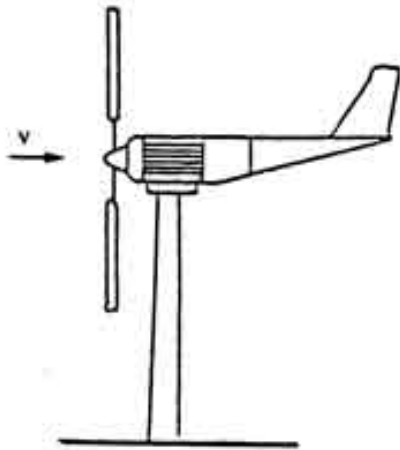


Σχήμα 4.6 Α/Γ κατακόρυφου άξονα

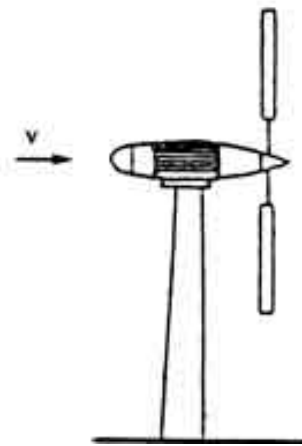
Α/Γ οριζοντίου άξονα

§ 4.4.1 Τυπικές μορφές ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα

Ο περιστρεφόμενος μηχανισμός τέτοιων μηχανών, που καλείται δρομέας, μπορεί να έχει από ένα πτερύγιο (μονόπτερος) μέχρι 30 ή και περισσότερα (πολύπτερος). Σε σχέση με τη θέση του δρομέα ως προς τον πύργο στήριξης και τη διεύθυνση του ανέμου, οι ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου μπορούν να έχουν το δρομέα μπροστά από τον πύργο (ανάντι) σχήμα 4.7 ή πίσω (κατάντι) σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.7 ανάντι δρομέας



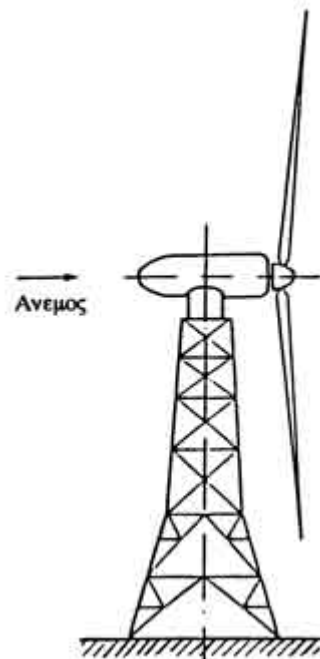
Σχήμα 4.8 κατάντι δρομέας

Για τη μεγιστοποίηση δέσμευσης της κινητικής ενέργειας του ανέμου απαιτείται όπως το επίπεδο του δρομέα της ανεμογεννήτριας να είναι κάθετο στην κατεύθυνση του ανέμου. Για το σκοπό αυτό στις μεν μικρής ισχύος ανεμογεννήτριες (και στον ανάντι τύπο) υπάρχει συνήθως περύγιο που ευθυγραμμίζει τον άξονα του δρομέα στον άνεμο (σχήμα 4.7), στις δε μεγάλες ανεμογεννήτριες εφαρμόζονται συστήματα αυτόματης ρύθμισης της σωστής θέσης του δρομέα ως προς τον άνεμο μέσω σερβομηχανισμού. Στις μικρές ανεμογεννήτριες με το δρομέα κατάντι δεν τοποθετείται περύγιο προσανατολισμού γιατί το κουβούκλιο που καλύπτει τα εξαρτήματα της διάταξης μετατροπής της ενέργειας του δρομέα έχει τέτοιο σχήμα ώστε το ίδιο να αποτελεί περύγιο προσανατολισμού, σχήμα 4.8.

Ο πύργος στήριξης της ανεμογεννήτριας μπορεί να είναι σωληνωτού τύπου, εικόνα 4.1, τύπου δικτυώματος, σχήμα 4.9. Οι δύο αυτοί τύποι είναι αυτοστηριζόμενοι, ενώ ο τρίτος τύπος λεπτής κολώνας, εικόνα 4.2, απαιτεί πρόσδεση με συρματοσχοίνα.



Εικόνα 4.1 σωληνωτός πύργος Α/Γ οριζοντίου άξονα



Σχήμα 4.9 δικτυωτός πύργος Α/Γ Με κατάντι δρομέα.

§ 4.4.2 Τυπική μορφή ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα



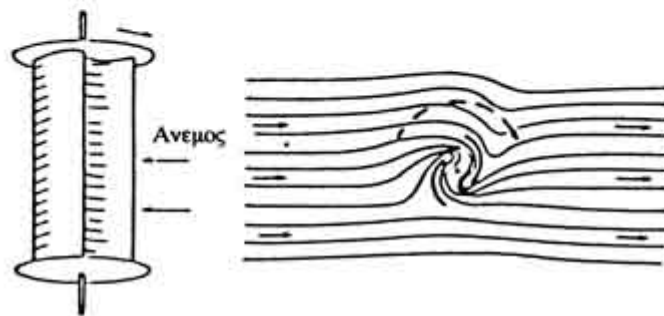
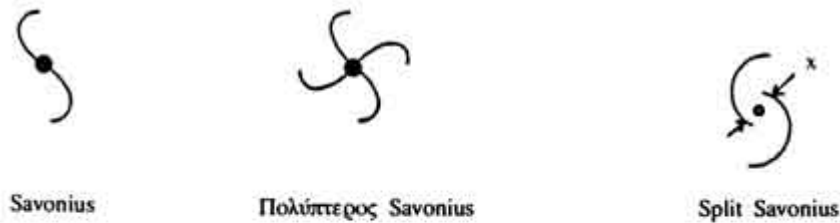
Εικόνα 4.2 Πύργος δικτυωτός στηριζόμενος με επίτονα

Οι ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου είναι κατασκευαστικά απλούστερες της ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα γιατί:

- Δεν απαιτούν περύγιο ή σύστημα αυτοματισμού για τον προσανατολισμό του δρομέα στη διεύθυνση πνοής του ανέμου.
- Το σύστημα μετατροπής της μηχανικής ενέργειας του δρομέα σε ηλεκτρική βρίσκεται στο έδαφος, στη βάση της ανεμογεννήτριας.

Συνεπώς τα έξοδα αυτοματισμού, συντήρησης ή επισκευών είναι σαφώς μικρότερα σε σύγκριση με την ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα.

4.4.2.1 Χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα τύπου Savonius



Σχήμα 4.10 Α/Γ κατακόρυφου άξονα τύπου Savonius

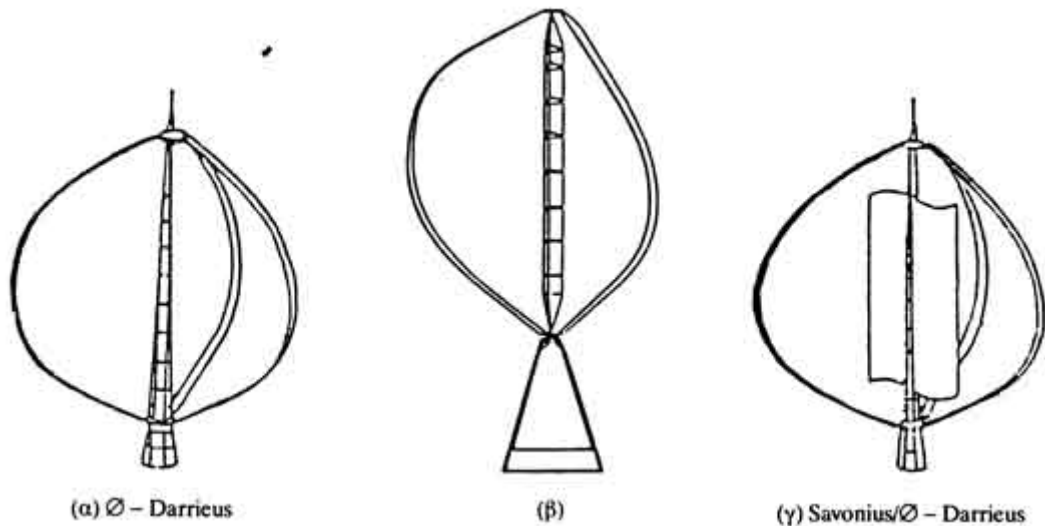
Οι ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου που πρωτοπαρουσιάστηκαν το 1931 από τον Savonius έχουν τη χαρακτηριστική μορφή το σχήματος 4.10.

Τα βασικά χαρακτηριστικά τους είναι ο χαμηλός συντελεστής ισχύος ο μικρός λόγος ταχύτητας ακροπερυγίου λ για βέλτιστο συντελεστή ισχύος (δηλ. μικρή ακραία περιφερειακή ταχύτητα), το περιορισμένο μέγεθος και η εξαιρετική απλότητα και οικονομικότητα της κατασκευής. Παρά τα μειονεκτήματα, το τελευταίο πλεονέκτημα, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι δεν χρειάζεται σύστημα προσανατολισμού προς τον άνεμο, έχει δώσει ώθηση σε μια σειρά από έρευνες πάνω στο δρομέα Savonius για την εύρεση του καλύτερου συνδυασμού των διαφόρων παραμέτρων. Τέτοιες παράμετροι είναι ο λόγος ύψους

προς διάμετρο, το άνοιγμα χ (βλέπε σχήμα 4.10), ο αριθμός των πτερυγίων (2,3 ή και περισσότερα), το σχήμα των πτερυγίων κλπ.

4.4.2.2 Χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας κατακόρυφου άξονα Darrieus

Η ανεμογεννήτρια τύπου Darrieus, σχήμα 4.11, επινοήθηκε από τον Γάλλο Darrieus γύρω στα 1920 και έτυχε εκτεταμένης ανάπτυξης και εφαρμογής στον Καναδά, κυρίως στη δεκαετία του '70 οπότε και έγινε ευρύτερα γνωστή. Η ανεμογεννήτρια Darrieus είναι μηχανή που χαρακτηρίζεται από καμπυλωτά πτερύγια (είναι το σχήμα που παίρνει ένα χαλαρό σχοινί αν το στρέψουμε με ταχύτητα κρατώντας το από τις δύο άκρες). Έχει σχετικά χαμηλή αρχική ροπή εκκίνησης και ως εκ τούτου έχει το μειονέκτημα να μην ξεκινάει μόνη της όταν φυσάει ο άνεμος. Συνδυασμός όμως ανεμογεννήτριας Darrieus και μιας μικρής Savonius επιλύει το τεχνολογικό αυτό πρόβλημα, (σχήμα 4.11γ).

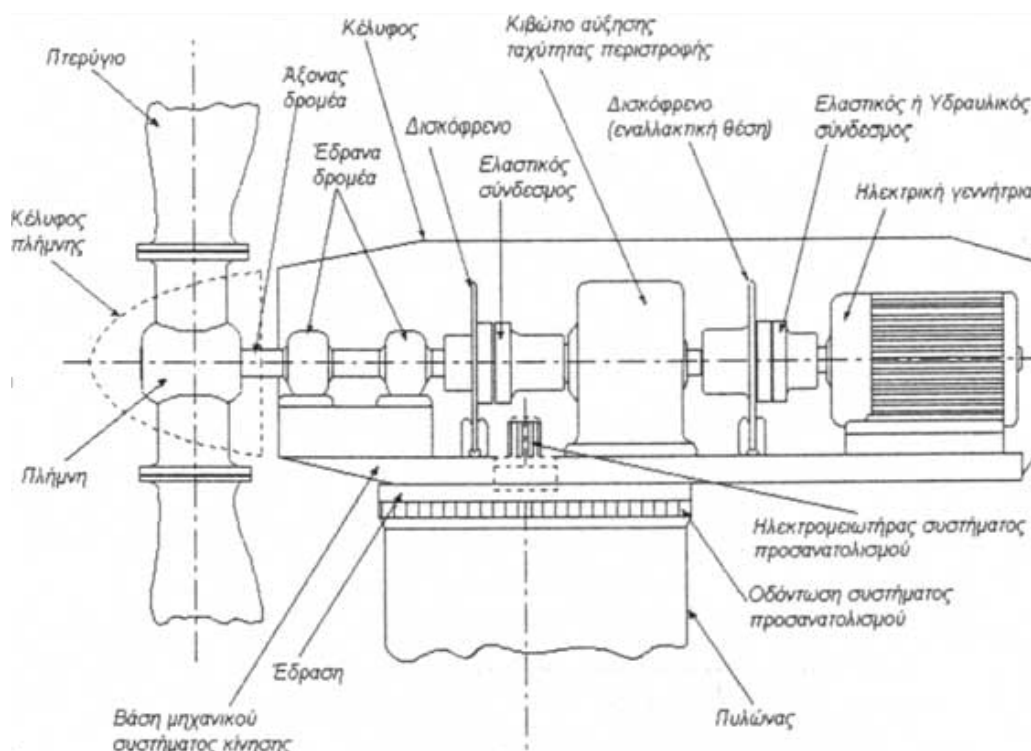


Σχήμα 4.11 Α/Γ τύπου Darrieus

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μορφές ανεμογεννητριών Darrieus, όπως:

- Με δύο ή τρία πτερύγια, σχήματα 4.11(α) και 4.11(β).
- Με ευθύγραμμα πτερύγια ή
- Με σπαστά πτερύγια, για ρύθμιση ισχύος

§ 4.5 Υποσυστήματα Α/Γ Οριζοντίου Άξονα



Σχήμα 4.12 υποσυστήματα Α/Γ

Δρομέας Ανεμογεννήτριας

Ο δρομέας Α/Γ ΟΑ αποτελείται από τον αριθμό των πτερυγίων και την πλήμνη μέσω της οποίας μεταφέρεται η ισχύς στον κύριο άξονα. Στην πλειοψηφία τους οι Α/Γ εμπορικού τύπου έχουν δύο ή τρία πτερύγια στρεφόμενα περί οριζόντιο άξονα ανάντι του πύργου (ανάντι δρομέας βλ. σχ. 4.7). Ο ανάντι δρομέας παρουσιάζει δυο πλεονεκτήματα έναντι του κατάντι δρομέα (που είναι περισσότερο κοινός στις Α/Γ μικρής ισχύος βλ σχ. 4.8):

- α) μικρότερη δυναμική καταπόνηση των πτερυγίων του
- β) χαμηλότερο επίπεδο θορύβου

Πτερύγια

Η Α/Γ εμπορικού τύπου έχουν δύο ή τρία πτερύγια. Το υλικό τους είναι κυρίως πολυεστέρας ενισχυμένος με υαλοϋφασμα (FGRP, fiber glass reinforced polyester) λόγω του μικρού ειδικού βάρους του και της αντοχής του έναντι κοπώσεως.

Οι δύο καμπύλες επιφάνειες του πτερυγίου (υψηλής και χαμηλής πίεσης) κατασκευάζονται από επάλληλα στρώματα υαλοϋφάσματος διαποτισμένα με πολυεστέρα, τοποθετούμενα μέσα σε ειδικά καλούπια.

Οι δυο αυτές επιφάνειες συγκολλούνται κατά μήκος του χείλους προσβολής και χείλους εκφυγής και συνήθως σε άξονα (spar) από FGRP που διατρέχει εσωτερικώς όλο το μήκος του πτερυγίου.

Η αντοχή των πτερυγίων ελέγχεται από τους κατασκευαστές τους σε στατική και δυναμική φόρτιση. Κατά τον στατικό έλεγχο της αντοχής τους επιβάλλονται φορτία τριγωνικής κατανομής κατά μήκος των πτερυγίων και κάθετα προς την μεγάλη επιφάνειά τους προσομοιάζοντας έτσι την πραγματική φόρτιση τους ως προς τον οριζόντιο άξονα. Ο δυναμικός έλεγχος των πτερυγίων διαρκεί αρκετούς μήνες κατά τη διάρκεια του οποίου επιβάλλονται σ' αυτά χρονικώς μεταβαλλόμενα φορτία για την προσομοίωση της πολύχρονης λειτουργίας τους.

Το τελικό στάδιο πριν από την παράδοση των πτερυγίων στον χρήστη περιλαμβάνει ζυγοστάθμιση κατά την οποία τοποθετείται μικρή ποσότητα μολύβδου σε ειδική εσοχή περι-

το άκρο τους.

Στον διπλανό πίνακα 4.1 περιλαμβάνονται χαρακτηριστικά στοιχεία στοιχείων πτερυγίου Α/Γ εμπορικού τύπου. Πλην του FGRP χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των πτερυγίων και άλλα υλικά όπως

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΥΛΙΚΩΝ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ			
ΥΛΙΚΟ	ΕΠΙΤΡ. ΤΑΣΗ (MPa) 1MPa≈10Kg/m ²	ΠΥΚΝΟΤΗΤ Α (Kg/m ³)	ΚΟΣΤΟΣ (€/Kg)* * τιμές 1995
ΧΑΛΥΒΑΣ	110	7800	5,5 – 8
ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ	100	1400	200
FGRP	45	2000	13
ΞΥΛΟ	12	550	13

Πίνακας 4.1

χάλυβας, αλουμίνιο, ίνες άνθρακα και ξύλο. Όπως θα παρατηρεί κανείς στον πίνακα 4.1 γίνεται σύγκριση μεταξύ των διαφόρων υλικών πτερυγίων, ως προς την επιτρεπόμενη τάση, πυκνότητα και το κόστος. Από τα παραπάνω υλικά ο χάλυβας είναι μεν σχετικά φθηνό υλικό αλλά λόγω της μεγάλης του πυκνότητας καθιστά το βάρος των πτερυγίων απαγορευτικό ιδιαίτερα στις Α/Γ μεγάλης ισχύος. Επίσης απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην αντιμετώπιση του προβλήματος της διάβρωσης όταν οι Α/Γ πρόκειται να λειτουργήσουν σε θαλασσινό περιβάλλον. Το υψηλό κόστος των ινών άνθρακα εξάλλου επιβάλλει την περιορισμένη χρήση τους και κατά προτίμηση στα τμήματα των πτερυγίων που καταπονούνται περισσότερο δεδομένου ότι οι ίνες διαθέτουν την ίδια αντοχή με εκείνη του χάλυβα. Τέλος το ξύλο έχει το πλεονέκτημα της μικρότερης πυκνότητας από τα προηγούμενα υλικά αλλά είναι ευπαθές στην υγρασία που αλλοιώνει τις ιδιότητες του.

Κύριος Άξονας

Ο κύριος άξονας μεταφέρει τη μηχανική ισχύ του δρομέα στο κιβώτιο πολλαπλασιασμού των στροφών. Είναι συμπαγής ή κοίλος και κατασκευάζεται από χάλυβα υψηλής αντοχής με κύριες προσμίξεις χρωμίου, νικελίου και μολυβδένιου. Στο ένα άκρο του καταλήγει σε σχήμα φλάντζας μέσω της οποίας συνδέεται με την πλήμνη ενώ στο άλλο εδράζεται το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών. Σε Α/Γ μικρής ισχύος η σύνδεση της πλήμνης με τον κύριο άξονα γίνεται αντί της φλάντζας μέσω σφήνας. Η λύση αυτή όμως γενικά αποφεύγεται λόγω της συγκέντρωσης τάσεων που εμφανίζεται στην περιοχή της σφήνας.

Στηρίζεται σε δυο έδρανα μέσω των οποίων μεταφέρονται οι ωστικές και ακτινικές δυνάμεις στην άτρακτο και από εκεί δια του πύργου στη θεμελίωση. Όπως είναι γνωστό από την αντοχή των υλικών, μεταξύ του χάλυβα και του σκυροδέματος δεν υπάρχει «ανταλλαγή»

εφελκυστικών τάσεων μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος, ενώ αντίθετα υπάρχει «ανταλλαγή» θλιπτικών τάσεων.

Για τον περιορισμό του όγκου και του βάρους της κατασκευής ο κύριος άξονας μπορεί να συνδεθεί απευθείας στο κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών χωρίς την παρεμβολή εδράνων. Στην περίπτωση αυτή το κιβώτιο πρέπει να είναι μεγαλύτερης ισχύος επειδή δέχεται απευθείας τα φορτία του δρομέα και συνεπώς είναι δαπανηρότερο.

Πλήμνη

Μεταφέρει την μηχανική ισχύ από τα περύγια στον κύριο άξονα της Α/Γ. κατασκευάζεται από χυτοσίδηρο ή χυτοχάλυβα αποφεύγοντας συγκολλήσεις οι οποίες μπορούν να αποτελέσουν σημεία αδυναμίας της κατασκευής.

Η πλήμνη των Α/Γ σταθερού βήματος φέρει στις φλάντζες έδρασης των περυγίων οπές ελλειψοειδούς σχήματος για τη ρύθμιση του βήματος των περυγίων.

Η πλήμνη των Α/Γ μεταβλητού βήματος φέρει στο εσωτερικό της διάταξη για την αλλαγή του βήματος των περυγίων. Στην περίπτωση αυτή τα περύγια εδράζονται επί ένσφαιρων τριβών (ρουλεμάν).

Κιβώτιο Πολλαπλασιασμού Στροφών

Αυτό μεταφέρει την ηλεκτρική ισχύ από τον κύριο άξονα της Α/Γ στην ηλεκτρική γεννήτρια μέσω συστήματος οδοντωτών τροχών. Επειδή η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας είναι συνήθως 1000rpm – 1500rpm και η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα μικρότερη από 50rpm η σχέση μετάδοσης του κιβωτίου είναι από 20 έως 50. περιλαμβάνει δύο με τρεις βαθμίδες οδοντωτών τροχών.

ΚΙΒΩΤΙΟ ΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑΣΜΟΥ ΣΤΡΟΦΩΝ		
	ΠΑΡΑΛΛΗΛΩΝ ΑΞΟΝΩΝ	ΠΛΑΝΗΤΙΚΟ
ΒΑΡΟΣ (Kg)	7000	5000
ΜΕΓΕΘΟΣ (m)	2,4 x 1,5	1,3 x 1,3
ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΛΑΔΙΟΥ ΛΙΠΑΝΣΗΣ (lit)	825	190

Πίνακας 4.2

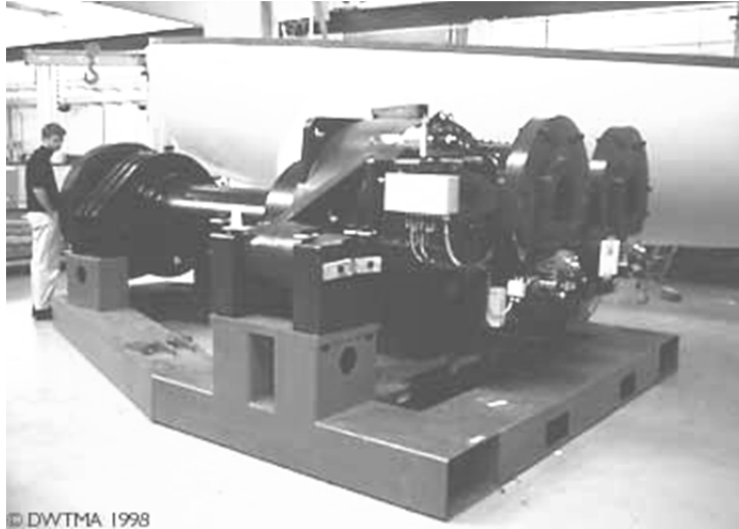
Υπάρχουν δυο τύποι κιβωτίων παράλληλων αξόνων και πλανητικού τύπου. Στις μικρής ισχύος ανεμογεννήτριες προτιμάται η τοποθέτηση κιβωτίου παράλληλων αξόνων σε αντίθεση με τις ανεμογεννήτριες μεγάλης ισχύος όπου προτιμάται η χρήση πλανητικού κιβωτίου λόγω του μικρότερου βάρους, μικρότερου όγκου

και του μεγαλύτερου βαθμού απόδοσης.

Η κατασκευή κιβωτίων με ελικοειδή οδόντωση αυξάνει το βαθμό απόδοσης ενώ παράλληλα μειώνεται η στάθμη του εκπεμπόμενου θορύβου. Βέβαια οι παραπάνω βελτιώσεις έχουν σαν αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους αγοράς.

Στον παραπάνω πίνακα 4.2 γίνεται σύγκριση μεταξύ των δυο τύπων κιβωτίου προοριζόμενα για Α/Γ ισχύος 750 kW.

Η σχεδίαση και κατασκευή του κιβωτίου πρέπει να είναι κατάλληλη για την αντιμετώπιση απότομων μεταβολών την ροπής του δρομέα που προέρχονται από τις ριπές του ανέμου. Έτσι για λόγους ασφαλείας η ονομαστική ισχύς του κιβωτίου λαμβάνεται συνήθως 1,5 έως 2



Εικόνα 4.3 σύγχρονο κιβώτιο ταχυτήτων για Α/Γ
Με δύο γεννήτριες συνολικής ισχύος 1,5 MW

φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική ισχύ της γεννήτριας της Α/Γ.

Για εξομάλυνση της μηχανικής ροπής την αύξηση της ζωής του κιβωτίου και κατ' επέκταση της παραγόμενης ισχύος, συνήθως η έδραση του κιβωτίου επιτρέπει την ταλάντωσή του. Όπως για παράδειγμα σε κάποιες περιπτώσεις το κιβώτιο εδράζεται στον κύριο άξονα της Α/Γ αλλά το κέλυφός του μπορεί να στραφεί γύρω από αυτόν κατά μία μικρή γωνία. Σε άλλες περιπτώσεις

που το κιβώτιο δεν εδράζεται στον κύριο άξονα η μεταξύ τους σύνδεση γίνεται με εύκαμπτο σύνδεσμο. Στην πρώτη περίπτωση ο άξονας συνδέεται με τον κοίλο άξονα της πρώτης βαθμίδας του κιβωτίου δια ειδικής διάταξης που ονομάζεται πτυσσόμενος δίσκος (shrink disk). Με τη βοήθεια της διάταξης αυτής επιτυγχάνεται τοπικά η μείωση της διαμέτρου του κοίλου άξονα με άσκηση ομοιόμορφης πίεσης και η ασφαλής σύνδεση των δυο αξόνων. Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής έναντι της χρήσης πολυσφηνου έγκειται στο γεγονός της μη εμφάνισης συγκέντρωσης τάσεων που αποτελεί μια από τις σημαντικότερες αιτίες μειώσεις της αντοχής των υλικών. Τέλος η λίπανση των οδόντων γίνεται είτε με τη βοήθεια αντλίας ή με εμβάπτισή τους στην ελαιολεκάνη του κιβωτίου, πρέπει να γίνεται αλλαγή και εξέταση του λαδιού λίπανσης. Από την εξέταση αυτή μπορούμε να αποκτήσουμε μια εικόνα της εύρυθμης ή μη λειτουργίας του κιβωτίου. Για παράδειγμα υψηλή περιεκτικότητα ρινισμάτων σιδήρου στο λάδι λίπανσης αποτελεί ένδειξη φθοράς των οδόντων.

Σύστημα Προσανατολισμού Α/Γ



Εικόνα 4.4 άποψη από σύστημα
Προσανατολισμού Α/Γ ΟΑ

Το σύστημα προσανατολισμού Α/Γ ΟΑ είναι απαραίτητο (σε αντίθεση με τις Α/Γ κατακόρυφου άξονα) για να διατηρείται το επίπεδο περιστροφής του δρομέα κάθετο στην κατεύθυνση του ανέμου.

Αποτελεί από ένα μεγάλο οδοντωτό τροχό (κορώνα) ακλόνητα στερεωμένο στην κορυφή του πύργου της Α/Γ και ένα οδοντωτό τροχό (πηνιόν) στερεωμένο στην άτρακτο (βλ. εικόνα 4.4). Το πηνιόν στρέφεται με τη βοήθεια μειωτήρα-κινητήρα κατά μήκος των οδόντων της κορώνας

συμπαράσφροντας την άτρακτο με τον δρομέα της Α/Γ σε μια περιστροφική κίνηση γύρω από κατακόρυφο άξονα. Η ταχύτητα περιστροφής της άτρακτου είναι μεταξύ 6 και 10 min ανά στροφή. Ο κινητήρας του πηνίου ενεργοποιείται από το σύστημα έλεγχου της Α/Γ το οποίο με τη σειρά του συλλέγει πληροφορίες από τον ανεμοδείκτη της άτρακτο για οποιαδήποτε αλλαγή στην κατεύθυνση του ανέμου.

Η άτρακτος εδράζεται σε ένσφαιρο τριβέα του οποίου η εσωτερική (ή εξωτερική) διάμετρος είναι διαμορφωμένη σε οδοντωτό τροχό που αποτελεί την κορώνα του συστήματος προσανατολισμού. Στις Α/Γ μικρής ισχύος ο προσανατολισμός γίνεται χωρίς ηλεκτρικό κινητήρα αλλά με τη βοήθεια μικρής πτερωτής της οποίας ο άξονας είναι κάθετος στον άξονα του δρομέα. Ο προσανατολισμός της Α/Γ είναι ουσιώδης παράγοντας όχι μόνον για την αύξηση της ενεργειακής παραγωγής της αλλά και της διάρκειας ζωής των πτερυγίων. Αν ο άνεμος συναντά τον δρομέα υπό γωνία τότε α) η κάθετη στον δρομέα συνιστώσα της ταχύτητας του είναι προφανώς μικρότερη από την ταχύτητα του ανέμου (άρα έχουμε μείωση της ισχύος, και β) τα πτερύγια υποβάλλονται σε κυκλική καταπόνηση λόγω της εφαπτομενικής συνιστώσας της ταχύτητας του ανέμου.

Σύνδεσμος Κιβωτίου Πολλαπλασιασμού Στροφών - Ηλεκτρικής Γεννήτριας

Η σύνδεση του άξονα υψηλών στροφών κιβωτίου πολλαπλασιασμού στροφών με τον άξονα της ηλεκτρικής γεννήτριας της Α/Γ γίνεται με εύκαμπτο σύνδεσμο για την απορρόφηση των στρεπτικών ταλαντώσεων. Έτσι επιτυγχάνεται αφενός η βελτίωση της ποιότητας της παραγόμενης ισχύος (μείωση διακυμάνσεων) και αφετέρου προστασία του κιβωτίου πολλαπλασιασμού στροφών έναντι διαταραχών προερχομένων από το ηλεκτρικό δίκτυο (π.χ βραχυκυκλώματα).

Μηχανική Πέδη

Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται για την ακινητοποίηση του δρομέα Α/Γ κυρίως για λόγους προστασίας έναντι υπερτάχυνσης ή οποτεδήποτε είναι επιθυμητή η πέδηση Α/Γ.

Συνήθως αποτελείται από δισκόφρενο (σπανίως απαντάται και ο τύπος τυμπάνου) τοποθετούμενο στην πλευρά των χαμηλών ή των υψηλών στροφών του συστήματος μετάδοσης. Η τοποθέτηση του φρένου στις χαμηλές στροφές παρουσιάζει το πλεονέκτημα της προστασίας αφενός του κιβωτίου πολλαπλασιασμού στροφών από τα μεταβατικά φορτία της πέδησης και αφετέρου του δρομέα από υπερτάχυνση σε περίπτωση σοβαρής βλάβης του κιβωτίου πολλαπλασιασμού στροφών. Έχει όμως το μειονέκτημα του μεγαλύτερου βάρους και των μεγαλύτερων διαστάσεων λόγω της μεγαλύτερης ροπής (μικρότερη γωνιακή ταχύτητα) που πρέπει να ασκήσει για την ακινητοποίηση του δρομέα. Οι επιφάνειες των σιαγώνων που έρχονται σε επαφή με το δίσκο κατά τη πέδηση αντικαθίσταται κατά διαστήματα αναλόγως της φθοράς που



© 1998 www.WINDPOWER.org
Εικόνα 4.5 Άποψη από μηχανική πέδη

έχουν υποστεί. Για περισσότερη ασφάλεια, όταν η φθορά των επιφανειών αυτών προχωρήσει σε ανεπίτρεπτο βαθμό, ειδικοί αισθητήρες ενημερώνουν το σύστημα έλεγχου της Α/Γ και ακινητοποιείται η Α/Γ έως ότου γίνει η αντικατάστασή τους. Το δισκόφρενο αποτελείται από ένα δίσκο ενσωματωμένο στον άξονα της Α/Γ (των χαμηλών ή υψηλών στροφών) και από

ένα αριθμό σιαγώνων τοποθετημένων στην περιφέρειά του μέσω των οποίων ασκείται πίεση στον δίσκο.

Η ενεργοποίηση της μηχανικής πέδης γίνεται με υδραυλικό σύστημα ή με ένταση ελατηρίων. Στη δεύτερη περίπτωση η απελευθέρωση του φρένου γίνεται με τη βοήθεια ηλεκτρομαγνήτου.

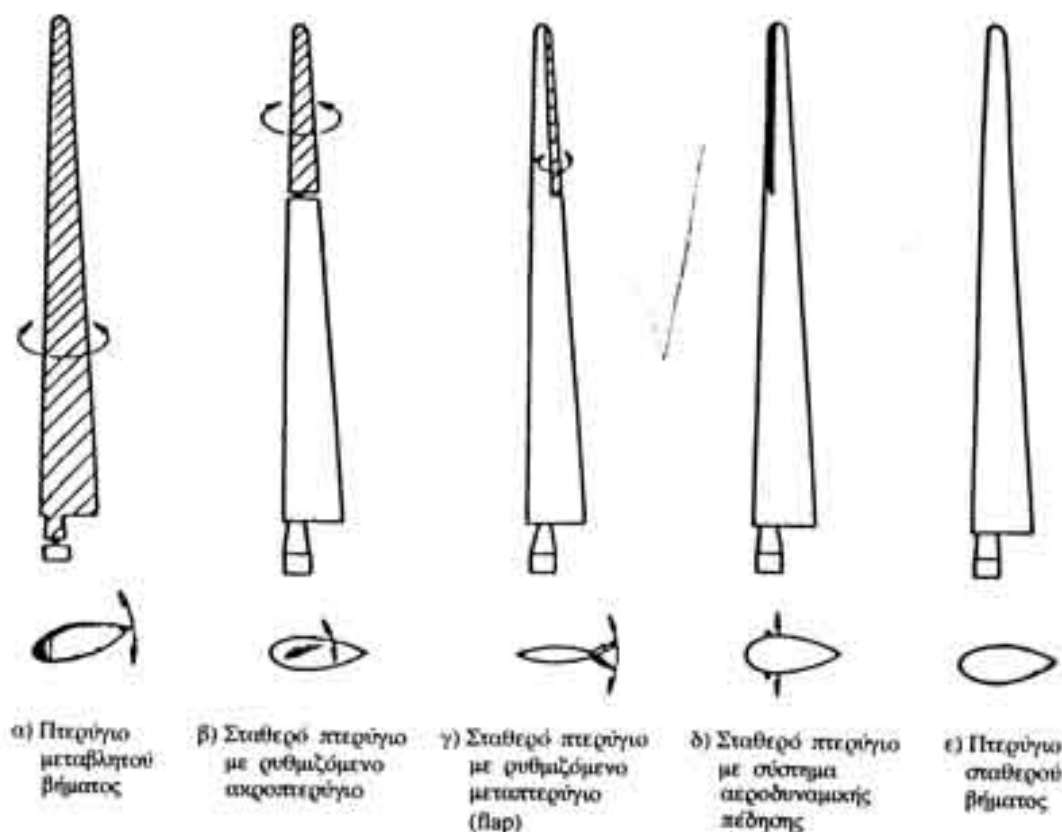
Αεροδυναμική Πέδη

Αυτή χρησιμοποιείται στις Α/Γ σταθερού βήματος ως προσθέτου μέτρου ασφάλειας έναντι υπερτάχυνσης του δρομέα τους σε περίπτωση που η μηχανική πέδη αποτύχει να λειτουργήσει. Τα αεροδυναμικά φρένα αποτελούν διατάξεις ενσωματωμένες στα πτερύγια της Α/Γ οι οποίες όταν ενεργοποιηθούν μεταβάλλουν το σχήμα των πτερυγίων κατά τρόπο που να προκαλεί αύξηση της αεροδυναμικής αντίστασης και συνεπώς μείωση της ταχύτητας περιστροφής τους. Συνήθως η ενεργοποίηση των αεροδυναμικών φρένων βασίζεται στην άσκηση φυγόκεντρων δυνάμεων επί ελατηρίων τα οποία υπό κανονικές συνθήκες εμποδίζουν την απελευθέρωση τους.

Οι συνηθέστερες διατάξεις αεροδυναμικών φρένων είναι:

α) αλεξίπτωτα εκτινασσόμενα από ειδική θυρίδα στο άκρο των πτερυγίων

β) τμήμα του άκρου του πτερυγίου περιστρεφόμενο περί τον διαμήκη άξονά του (blade tip spoiler)



Σχήμα 4.13 πτερύγια με αεροδυναμική πέδη. Η χρήση τους είναι και για τη ρύθμιση του βήματος πτερυγίου και κατ' επέκταση της ισχύος

γ) το χείλος προσβολής του άκρου του πτερυγίου το οποίο στρέφεται κατά μια μικρή γωνία γύρω από άξονα παράλληλο προς τον διαμήκη άξονά του (blade tip spoiler)

δ) επιφάνειες που προεξέχουν στην πλευρά χαμηλής πίεσης του πτερυγίου (suction side spoiler).

Πύργος Α/Γ

Κατασκευάζεται συνήθως σε δυο τύπους:

- α) σωληνωτός κωνικού σχήματος με κυκλική ή πολυγωνική διατομή, και
- β) δικτυωτός.

Ο σωληνωτός πύργος έχει εσωτερική σκάλα για την επίσκεψη της ατράκτου από το προσωπικό συντήρησης καθώς και θυρίδα στο ύψος του ακροπτερυγίου για τον έλεγχο της Α/Γ και ο πίνακας διακοπών. Επίσης στη βάση του υπάρχει φλάντζα η οποία συνδέεται με τους πακτωμένους κοχλίες της θεμελίωσης.



Εικόνα 4.6 εσωτερική φωτογραφία από τη βάση κομμάτιών σωληνωτού πύργου Α/Γ

Επειδή τα φορτία του δρομέα (ώση, στρεπτική ροπή) μεταφέρονται μέσω του πύργου στη θεμελίωση η σχεδίαση και κατασκευή του πύργου πρέπει να είναι κατάλληλη για να αντέχει σε αντίζοες συνθήκες. (π.χ αντιμετώπιση θυελλωδών

ανεμών) αποφεύγοντας παράλληλα το φαινόμενο του συντονισμού. Επειδή ο πύργος κατασκευάζεται από χάλυβα επιβάλλεται η προστασία του έναντι διάβρωσης. Αυτή πραγματοποιείται είτε με εν θερμώ επιψευδαργύρωση ή με ειδική βαφή.

Ηλεκτρολογικό Σύστημα Α/Γ

Το ηλεκτρολογικό σύστημα Α/Γ περιλαμβάνει:

- α) την ηλεκτρική γεννήτρια
- β) μικρούς κινητήρες
- γ) αυτόματους διακοπές και ασφαλείς (π.χ τον κινητήρα υδραυλικού συστήματος)

Ηλεκτρική Γεννήτρια

Ο συνηθέστερος τύπος ηλεκτρικής γεννήτριας των Α/Γ είναι η επαγωγική (ή ασύγχρονη) γεννήτρια βραχυκυκλωμένου δρομέα λόγω των πλεονεκτημάτων που διαθέτει έναντι της σύγχρονης γεννήτριας δηλ. μικρότερο κόστος, στιβαρότητα και απλότητα κατασκευής, δυνατότητα απόσβεσης στρεπτικών ταλαντώσεων, εύκολη σύνδεση σε ηλεκτρικό δίκτυο. Για να λειτουργήσει όμως είναι απαραίτητη η παροχή άεργου ισχύος την οποία δεν απαιτεί η ασύγχρονη.

Οι γεννήτριες επαγωγικού τύπου έχουν τα εξής κύρια χαρακτηριστικά

- α) η ταχύτητα περιστροφής της είναι σχεδόν σταθερή, μεταβαλλόμενη μόνον κατά ένα μικρό ποσοστό σύμφωνα με τη σχέση $f(1+s)P$, όπου

f: η συχνότητα του δικτύου (50Hz για την Ευρώπη και 60Hz για την Αμερική).

P: ο αριθμός των μαγνητικών πόλων της γεννήτριας
 s: ο συντελεστής ολίσθησης της γεννήτριας.

Συνήθως ο συντελεστής ολίσθησης παίρνει τιμές 1% με 2% για Α/Γ ισχύος μεγαλύτερης της 50kW ενώ στις μικρής ισχύος φθάνει μέχρι και 8%. Η μέγιστη μεταβολή ταχύτητας περιστροφής της γεννήτριας είναι επομένως 1-2% της σύγχρονης ταχύτητας περιστροφής της δηλ. του λόγου 120f/P. Κατά την εν κενό (δηλ. χωρίς φορτίο) λειτουργία της γεννήτριας ο συντελεστής ολίσθησης μηδενίζεται και συνεπώς η γεννήτρια στρέφεται με ταχύτητα ίση με 120 f/P. Αυξανόμενης όμως της παραγόμενης ισχύος η ολίσθηση s αυξάνει με συνέπεια η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας και του δρομέα να αυξάνουν με το ίδιο ποσοστό.

Για παράδειγμα γεννήτρια 6 πόλων έχει σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής
 $120f/P = 120 \times 50 = 1000 \text{ rpm}$.

β) είναι απαραίτητη η παροχή έργου ισχύος στη γεννήτρια για τη διατήρηση της τάσης σε επιθυμητά επίπεδα.

Η άεργος ισχύς Q δίδεται από τη σχέση

$$Q = VI\eta\mu\varphi, \text{ όπου}$$

V: η τάση

I: η ένταση του ρεύματος

φ : η διάφορα φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος.

Δεδομένο ότι οι ανάγκες σε έργο ισχύ αυξάνουν με αύξηση της παραγόμενης (ενεργού) ισχύος, χρησιμοποιούνται μεταβλητοί πυκνωτές ή σύγχρονες γεννήτρια για την κάλυψη τους. Εάν η Α/Γ είναι συνδεδεμένη σε ηλεκτρικό δίκτυο τότε η άεργος ισχύς προσφέρεται από το δίκτυο. Συνήθως όμως εγκαθίστανται επιπλέον στον πίνακα της Α/Γ πυκνωτές για κάλυψη μέρους της άεργου ισχύος συμβάλλοντας έτσι στη βελτίωση του λεγόμενου συντελεστή ισχύος της εγκατάστασης.

Αν η Α/Γ λειτουργεί αυτόνομα (μη συνδεδεμένη σε ηλεκτρικό δίκτυο) αλλά τροφοδοτεί μια χρονικά μεταβαλλόμενη κατανάλωση η λειτουργία της ασύγχρονης γεννήτριας είναι προβληματική λόγω της δυσκολίας ρύθμισης της άεργου ισχύος μέσω συστήματος πυκνωτών. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται σύγχρονες γεννήτριες συνεχούς ρεύματος.

Ορισμένοι κατασκευαστές Α/Γ χρησιμοποιούν γεννήτριες δυο τυλιγμάτων δηλ. δυο ταχυτήτων περιστροφής και ονομαστικής ισχύος.

Με τη διάταξη αυτή επιτυγχάνεται στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου (κάτω των 8m/s) υψηλότερη απόδοση του συστήματος και χαμηλότερου επιπέδου αεροδυναμικού θορύβου (λόγω μικρότερης περιφερειακής ταχύτητας ακροπερυγίου). Η υψηλότερη απόδοση οφείλεται στην καλύτερη απόδοση της χαμηλόστροφης γεννήτριας στις μικρές ισχύεις (λόγω μικρότερης ονομαστικής ισχύος, και στην έναρξη παραγωγής της Α/Γ σε χαμηλότερη ταχύτητα ανέμου.

Οι σύγχρονες γεννήτριες δεν απαιτούν έργο ισχύ αλλά για να συνδεθούν σε ηλεκτρικό δίκτυο πρέπει να διαθέτουν διάταξη συγχρονισμού της ηλεκτρικής τάσης και του ρεύματος. Χαρακτηριστικό των σύγχρονων γεννητριών είναι επίσης η σταθερότητα της ταχύτητας περιστροφής τους, ανεξαρτήτως της ροπής. Επειδή αυτό προσδίδει ακαμψία στο σύστημα της Α/Γ, επιβάλλεται η χρήση υδραυλικού συνδέσμου μεταξύ κιβωτίου πολλαπλασιασμού στροφών και γεννήτριας για την μείωση των φορτίων προερχόμενων από ριπές ανέμου.

Πλην των ανώτερων, χρησιμοποιούνται (αλλά σπανιότερα) διατάξεις μετατροπής της εναλλασσόμενης τάσης του δικτύου σε συνεχή και αυτής σε εναλλασσόμενη τάση ρυθμιζόμενης συχνότητας. Η τάση ρυθμιζόμενης συχνότητας εφαρμόζεται στους ακροδέκτες της γεννήτριας προκαλώντας μεταβλητή ταχύτητα περιστροφής. Με τη μέθοδο αυτή

επιτυγχάνεται η διατήρηση του αεροδυναμικού συντελεστού C_p σε υψηλά επίπεδα ανεξαρτήτως της ταχύτητας του ανέμου και επιπλέον η ελάττωση των φορτίων που επιβάλλονται στην Α/Γ.

Κατά συνέπεια προκαλείται αύξηση της παραγωγής σε βάρος όμως του υψηλότερου κόστους.

Σχετικά με τον κινητήρα προσανατολισμού, αυτός είναι ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας, ισχύος περίπου ενός kW, στρεφόμενος και κατά τις δυο φορές περιστροφής, δια εναλλαγής των φάσεων.

Στον ηλεκτρικό πίνακα της Α/Γ είναι τοποθετημένοι αυτόματοι διακόπτες για το άνοιγμα ή κλείσιμο των κυκλωμάτων κατόπιν εντολών που προέρχονται από το σύστημα ελέγχου της Α/Γ, ασφάλειες για την προστασία του ηλεκτρικού συστήματός της έναντι υπερέντασης ή βραχυκυκλώματος και το σύστημα ελέγχου της.

Σύστημα Έλεγχου Α/Γ

Αυτό αποτελείται κυρίως από:

- α) ένα ηλεκτρονικό υπολογιστή
 - β) μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό
 - γ) μετατροπής ψηφιακού σήματος σε αναλογικό
- Οι βασικές λειτουργίες του αφορούν την:

α) παρακολούθηση της λειτουργικής κατάστασης της Α/Γ (π.χ ταχύτητας περιστροφής του δρομέα, της θερμοκρασίας των τυλιγμάτων τις ηλεκτρικής γεννήτριας, της φθοράς των επιφανειών τριβής του συστήματος πέδησης, της παραγόμενης ισχύος, του επιπέδου δονήσεων του θαλάμου κ.τ.λ)

β) θέση σε λειτουργία ή εκτός λειτουργίας της Α/Γ βάσει προκαθορισμένων κριτηρίων

γ) καταγραφή σφαλμάτων (υπερθέρμανσης, υπερέντασης, δονήσεων κ.τ.λ)

δ) καταγραφή στατιστικών στοιχείων (π.χ αριθμός ωρών κατά τις οποίες η γεννήτρια ήταν συνδεδεμένη στο δίκτυο, αριθμός εκκινήσεων γεννήτριας-κινητήρα προσανατολισμού κ.τ.λ)

Η αυτόματη σύνδεση και αποσύνδεση των γεννητριών είναι αδύνατη χωρίς το σύστημα ελέγχου. Το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί όλες τις κύριες λειτουργίες της Α/Γ για την εξασφάλιση της βέλτιστης λειτουργίας της υπό οποιαδήποτε ταχύτητα ανέμου. Βέλτιστη λειτουργία σημαίνει ότι το σύστημα μεταβολής του βήματος πτερυγίων καθορίζει εάν θα πρέπει να συνδεθεί η γεννήτρια στο δίκτυο ή όχι. Ελέγχει επίσης τη μετάβαση μεταξύ ελέγχου ταχύτητας και ελέγχου ισχύος και επιλέγει το βέλτιστο βήμα των πτερυγίων. Επίσης θέτει την Α/Γ εκτός λειτουργίας όταν διαπιστωθεί ότι κάτι δεν λειτουργεί τέλεια και παρουσιάζει δεδομένα σχετικά με την παρούσα λειτουργική κατάσταση της μηχανής. Το σύστημα ελέγχου είναι σχεδιασμένο έτσι που να επιτρέπει τον τηλεχειρισμό της Α/Γ εάν αυτό είναι απαραίτητο.

Αντικεραυνική Προστασία Α/Γ

Πτώση κεραυνού μπορεί να προκαλέσει καταστροφές τόσο στο μέρος που πλήττεται όσο και σε γειτονικές ανεμογεννήτριες ή συσκευές. Το ρεύμα του κεραυνού επιβάλλεται και δεν μπορούμε σε καμία περίπτωση να το μειώσουμε. Το μόνο που ενδεχομένως είναι στον έλεγχό μας είναι η αντίσταση που θα συναντήσει το ρεύμα στη διέλευση του από το σημείο πρόσπτωσης προς τη γη. Αυτή η αντίσταση πρέπει να είναι κατά το δυνατόν μικρή.

Στη δίοδο του το ρεύμα επάγει τάσεις στα γειτονικά κυκλώματα είτε λόγω επαγωγικής είτε λόγω γαλβανικής σύμπλεξης π.χ. όταν το ρεύμα του κεραυνού διοχετευθεί σε ένα σύστημα

κοινής γείωσης τότε θα επηρεασθούν όλες οι Α/Γ που θα έχουν κοινή γείωση. Έστω και ξεχωριστές να είναι οι γειώσεις δεν είναι δυνατή η απόζευξη τους. Μέσω του εδάφους υπάρχουν γαλβανικές συμπλέξεις των διαφόρων γειώσεων που εμείς δεν τις έχουμε ενώσει με αγωγούς.

Οι καταστροφές που διαπιστώθηκαν είναι στα ακόλουθα στοιχεία:

- στα πτερύγια από κατευθείαν πλήγμα του κεραινού (πτερύγια έχουν ανοίξει)
- στα ηλεκτρονικά από υπερτάσεις
- στους κινητήρες, μετασχηματιστές
- στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές των αιολικών πάρκων

Οι Α/Γ 100 -500 kW έχουν μαζί με τα πτερύγια τους ένα ύψος περίπου 35-70 m και ανήκουν στην περιοχή των "υψηλών αντικειμένων", κατά τα αντικεραινικά πρότυπα. Έτσι το πλήγμα του κεραινού μπορεί να επέλθει τόσο στο υψηλότερο σημείο στην άκρη ενός πτερυγίου όσο και σε ένα ενδιάμεσο σημείο, στον πύργο, πράγμα που απέδειξε και η εμπειρία.

Θεωρείται πρακτικά ανέφικτο να αποφύγει κανείς το κατευθείαν πλήγμα του κεραινού σε μια Α/Γ.

Τα πρότυπα που διέπουν την αντικεραινική προστασία IEC 1024-1, IEC 1024-1-1, IEC 71, VDE 185 και τα ελληνικά ΕΛΟΤ 1197 εφαρμοζόμενα δεν κατόρθωσαν να εξασφαλίσουν 100% επιτυχία. Λόγω ιδιομορφίας των κατασκευών των Α/Γ γίνεται τώρα ιδιαίτερη έρευνα πάνω στο αντικείμενο, με σκοπό να μειωθούν οι κίνδυνοι στο ελάχιστο.

Προστασία των πτερυγίων και του συστήματος καθόδου

Το σύστημα που οδηγεί το ρεύμα από το σημείο πρόσπτωσης στο σύστημα της γείωσης ονομάζουμε σύστημα καθόδου. Εάν ο κεραινός πλήξει πτερύγιο, τότε το ρεύμα οδηγείται στον άξονα όπου είναι στερεωμένα η πλήμνη με τα πτερύγια. Από εκεί, όπως δείχνει το σχήμα 5, μπορεί να διακλαδισθεί, ένα μέρος να προχωρήσει μέσω των οδοντωτών τροχών και του κιβωτίου της μηχανικής μετάδοσης στον πύργο και ένα άλλο μέρος μέσω ενός δακτυλίου γείωσης στην υπεριατασκευή (nacelle) και μέσω της αγωγίμης έδρασης της υπεριατασκευής στον πύργο.

Ο δακτύλιος γείωσης είναι σύστημα κινούμενης επαφής, στρεφόμενου δακτυλίου -σταθερής ψήκτρας. Η ψήκτρα γειώνεται στην υπεριατασκευή. Έτσι ένα μεγάλο μέρος του ρεύματος θα περάσει από το δακτύλιο και όχι από τους οδοντωτούς τροχούς της μετάδοσης προς την υπεριατασκευή.

Το ρεύμα αφού ρεύσει κατά μήκος του πύργου οδηγείται στη γείωση και ακολούθως στο έδαφος. Η γείωση είναι θεμελιακή γείωση, ένας δακτύλιος περιμετρικά στο άκρο του θεμελίου της Α/Γ.

Προφανώς η αντίσταση γείωσης, έστω μερικά Ω, με το ρεύμα του κεραινού θα ανυψώσουν το δυναμικό της βάσης του πύργου ως προς την άπειρη γη κατά δεκάδες kV. Ο ουδέτερος αγωγός που είναι συνδεδεμένος με τον πύργο στη μια του άκρη, και στον ουδέτερο του μετασχηματιστή στην άλλη του άκρη, θα φέρει ένα ρεύμα αντιστρόφως ανάλογο προς την αντίδρασή του.

Η ανύψωση του δυναμικού του ουδέτερου επιβάλλει μια τάση μεταξύ φάσεων και ουδέτερου ίση με την τάση του πύργου διαμορφωμένη κατά την επαγόμενη τάση στο βρόχο των αγωγών ουδέτερου-φάσης. Επειδή συνήθως τα καλώδια ισχύος είναι συνεστραμμένα, μπορεί

κάνεις να δεχθεί ότι η τάση των φάσεων ως προς τον ουδέτερο είναι ίση με την τάση μεταξύ βάσης του πύργου και άπειρης γης.

Εάν ο μετασχηματιστής συνδέεται και με άλλες Α/Γ ή φορτία τότε προφανώς και εκεί θα υπάρξει τάση μεταξύ των κυκλωμάτων τροφοδοσίας και άπειρης γης.

Με αυτές τις παρατηρήσεις θα γίνουν κατανοητοί οι παρακάτω τρόποι προστασίας.

Προστασία περυσγίων

Για την προστασία των περυσγίων προβλέπονται μεταλλικά σημεία πρόσπτωσης κεραυνού επί του περυσγίου, που συνδέονται με αγωγό με την πλήμνη και τον άξονα. Αν δεν γίνουν αυτά, πρόσπτωση κεραυνού σε πλαστικά περυσγία οδηγεί συνήθως σε καταστροφή τους, ακόμα και αν αυτά είναι ενισχυμένα με ανθρακοϊνες.

Προστασία της υπερκατασκευής (Nnacelle)

Προβλέπεται δακτύλιος στον άξονα με σταθερές ψήιτρες. Αυτές συνδέονται με την υπερκατασκευή με καλώδιο διατομής 50 mm².

Προστασία του πίνακα Α/Γ

Μεταξύ κάθε φάσης και ουδέτερου συνδέονται απαγωγείς τάσεων (ZnO₂). Αυτοί έχουν τάση αφής 2,5 kV και αντοχή σε κρουστικό ρεύμα 40 kA για μερικές κρούσεις. Συνήθως έχουν δείκτη που δείχνει αν πέρασε μεγάλο ρεύμα, οπότε τους αντικαθιστούμε προληπτικά.

Προστασία ηλεκτρονικών διατάξεων και θυρών επικοινωνίας (π.χ. RS232)

Η προστασία είναι εξασφαλισμένη όταν σε κάθε εξάρτημα που συνδέεται με καλώδιο, που οδεύει υπαίθρια ή εκτός του πίνακα της Α/Γ, γίνει εξίσωση δυναμικών. Προσφέρονται στο εμπόριο πλήθος συσκευών προστασίας που οδηγούν στην εξίσωση των δυναμικών. Π.χ. ένας Η/Υ χρειάζεται τόσο στη τροφοδοσία ισχύος όσο και στις σειριακές του θύρες μια προστασία. Γίνεται χρήση διόδων αερίων, αντιστάσεων οξειδίου του ψευδαργύρου και διόδων προστασίας (Zener δίοδοι).

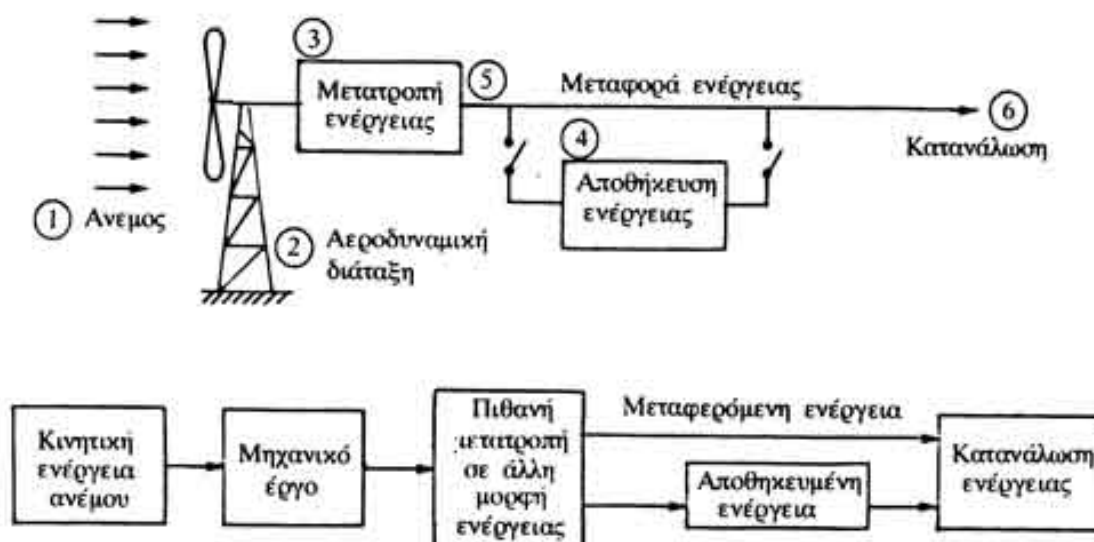
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

**ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗ
ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗΝ
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΚΑΙ ΤΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΤΗΣ ΣΤΟ
ΤΟΠΙΚΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ.**

§5.1 Εισαγωγή

Ο ανεμοκινητήρας από την εποχή της εμφάνισης του μέχρι σήμερα έχει περάσει από πολλά στάδια εξέλιξης, τόσο ως προς τον τύπο του (οριζοντίου ή κατακόρυφου άξονα) όσο και ως προς τα υποσυστήματα του (περυστρίνα, κιβώτιο ταχυτήτων, πύργος, αυτοματισμοί, γεννήτρια κ.λ.π.).εξελίξεις έχουν επίσης σημειωθεί και στον τρόπο δέσμευσης, αξιοποίησης, αποθήκευσης ή μεταφοράς της ενέργειας του ανέμου που μετατρέπεται από τον ανεμοκινητήρα σε άλλη «αναβαθμισμένη» μορφή ενέργειας.

Μια εικόνα των βασικών μερών που αποτελούν μια διάταξη εκμετάλλευσης της



Σχήμα 5.1 διάταξη εκμεταλλεύσεις της αιολικής ενέργειας

αιολικής ενέργειας καθώς και της ροής ενέργειας παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.1.

Η διάταξη αυτή είναι μια γενική περίπτωση όπου η κινητική ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται σε μηχανικό έργο με τη βοήθεια μιας αεροδυναμικής διάταξης (π.χ. μιας έλικας). Αυτό το μηχανικό έργο μπορεί να είναι εκμεταλλεύσιμο επί τόπου (π.χ. άντληση νερού). Στη γενικότερη όμως περίπτωση απαιτείται η μετατροπή του σε κάποια άλλη μορφή ενέργειας, είτε γιατί δεν χρειαζόμαστε μόνο μηχανικό έργο, είτε γιατί ο τόπος της κατανάλωσης δεν συμπίπτει με τον τόπο που είναι εγκαταστημένος ο ανεμοκινητήρας, δηλαδή απαιτείται η μεταφορά της δεσμευμένης αιολικής ενέργειας. Σ' αυτήν την περίπτωση η πιο πρόσφορη διάταξη είναι εκείνη που μετατρέπει το μηχανικό έργο σε άλλη μορφή ενέργειας, που μπορεί να μεταφερθεί εύκολα και αποδοτικά στο τόπο της κατανάλωσης. Εδώ και πολύ καιρό μάλιστα οι περισσότερες έρευνες στρέφονται προς τη κατεύθυνση της μετατροπής του μηχανικού έργου του δρομέα του ανεμοκινητήρα σε ηλεκτρική ενέργεια, λόγω της εύκολης μεταφοράς της ή της παραγωγής επί τόπου υδρογόνου (με ηλεκτρόλυση) που μπορεί να αποθηκευθεί ή να μεταφερθεί και να καεί ως αέριο καύσιμο. Η τελευταία περίπτωση αποτελεί ίσως και την βέλτιστη από πολλές απόψεις πρόταση αξιοποίησης γενικότερα των Ανανεώσιμων μορφών ενέργειας, δεδομένου ότι είναι οικολογικά αποδεκτή διότι με την καύση του υδρογόνου παράγεται μόνο νερό.

Είναι γνωστές οι μεγάλες διακυμάνσεις της ενέργειας του ανέμου με το χρόνο. Είναι επίσης γεγονός ότι πολλές φορές δεν πνέει καθόλου άνεμος για ορισμένα χρονικά διαστήματα. Αυτά έχουν ως συνέπεια χρονική ασυμφωνία μεταξύ ζήτησης και παραγωγής ενέργειας. Η λύση στο πρόβλημα βρίσκεται βασικά στην αποθήκευση της ενέργειας. Η

αποθήκευση ενέργειας καλύπτει το ενεργειακό έλλειμμα που παρουσιάζει, όταν η ισχύς του ανέμου πέφτει κάτω από ορισμένο επίπεδο. Το επίπεδο αυτό εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά ενεργειακής ζήτησης και τα χαρακτηριστικά των άλλων πηγών ενέργειας που υπάρχουν για την ικανοποίηση της ζήτησης αυτής π.χ. «στιβαρότητα του ηλεκτρικού δικτύου», είδος σταθμών παραγωγής κ.λ.π.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, ο βέλτιστος σχεδιασμός ενός πλήρους συστήματος εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας περιλαμβάνει:

1. Μελέτη των χαρακτηριστικών του ανέμου με σκοπό την εκλογή της βέλτιστης τοποθεσίας για την εγκατάσταση του ανεμοκινητήρα και την πρόβλεψη της παραγωγής ενέργειας.
2. Σχεδιασμός της αεροδυναμικής διάταξης, που να μετατρέπει κατά τον αποδοτικότερο τρόπο την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανικό έργο.
3. Μελέτη της περίπτωσης μετατροπής του μηχανικού έργου του δρομέα.
4. Εύρεση του καλύτερου τρόπου αντιμετώπισης των διακυμάνσεων της ενέργειας του ανέμου.
5. Μελέτη του βέλτιστου τρόπου μεταφοράς ενέργειας, αν απαιτείται.
6. Διερεύνηση της καλύτερης προσαρμογής της μεταβαλλόμενης παραγωγής ενέργειας του συστήματος προς την κατανάλωση.

Οι λέξεις «καλύτερος», «βέλτιστος», υποδηλώνουν βελτιστοποίηση τόσο από τεχνικής όσο και (κυρίως) οικονομικής σκοπιάς. Μία οποιαδήποτε επιστημονική ερευνα ή και βέλτιστη διάταξη αιολικής εγκατάστασης θα έχανε το μεγαλύτερο μέρος της αξίας της, αν στους στόχους της δεν έχει να κατάρθσει την αιολική ενέργεια οικονομικά ανταγωνιστική με τις άλλες συμβάσεις πηγές ενέργειας.

§5.2 Άνεμος

Στο κεφάλαιο αυτό επιχειρείται μια πρώτη προσέγγιση στο πρόβλημα του υπολογισμού των αιολικών χαρακτηριστικών μιας περιοχής ή θέσης. Με τον όρο αιολικά χαρακτηριστικά ονομάζουμε τα στοιχεία εκείνα που είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής ή θέσης. Συνεπώς ο όρος αυτός περιλαμβάνει την ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου, για κάποιο συγκεκριμένο ύψος πάνω από το έδαφος (συνήθως 10 m a.g.l., Above ground level, πάνω από το έδαφος) και κατά ένα προκαθορισμένο χρονικό βήμα, διάρκειας συνήθως 10 min.

Η ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου είναι μετρήσιμα μεγέθη. Όμως ο σωστός και αξιόπιστος καθορισμός τους απαιτεί μακροχρόνιες μετρήσεις, συνήθως 5 – 10 ετών, ή και μεγαλύτερης διάρκειας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο άνεμος είναι στοχαστικό φυσικό φαινόμενο, με μεγάλες μεταβολές στην εποχικότητα, με ετήσιους και ημερήσιους κύκλους καθώς και συχνά απότομες αλλαγές στην ταχύτητα και διεύθυνσή του.

Συμπερασματικά, για την επιλογή θέσης εγκατάστασης ανεμογεννήτριας είναι απαραίτητη η γνώση των εξής χαρακτηριστικών του ανέμου:

- κατανομή συχνοτήτων των ταχυτήτων
- κατανομή συχνοτήτων των διευθύνσεων
- ένταση στροβιλισμού

- συχνότητα εμφάνισης ακραίων μετεωρολογικών φαινομένων (κεραυνοί, χιονοπτώσεις κλπ)
- μεταβολή της ταχύτητας με το ύψος πάνω από το έδαφος

Στην συνέχεια παρουσιάζεται η μέθοδος μέτρησης της ταχύτητας και διεύθυνσης του ανέμου μιας θέσης καθώς και ο μετασχηματισμός των μετρήσεων σε δεδομένα γεωστρωφικού ανέμου, ο οποίος πνέει ανεμπόδιστα πάνω από την συγκεκριμένη περιοχή.

§5.2.1 Μέτρηση ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου

Η μέτρηση και καταγραφή ταχυτήτων ανέμου είναι απαραίτητη όχι μόνο για τη σχεδίαση των Α/Γ αλλά και για την επιλογή της κατάλληλης θέσης εγκατάστασης γνώμονα τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας και τον περιορισμό της κόπωσης (π.χ περιοχές υψηλής πρέπει να αποφεύγονται).

Η εκτίμηση του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής γίνεται συνήθως με έναν από τους ακόλουθους τρόπους:

- Εκτέλεση επιτόπιων μακροχρόνιων μετρήσεων σε προεπιλεγμένες θέσεις.
- Χρήση μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης της ροής του ανέμου πάνω από το έδαφος.
- Μελέτη φυσικών μοντέλων υπό κλίμακα μέσα σε κατάλληλη σχεδιασμένη αεροδυναμική σήραγγα.
- Μελέτη τοπογραφικών και βιολογικών δεικτών, όπως τα δέντρα και οι θάμνοι, των οποίων η μορφή δίνει συχνά χρήσιμες πληροφορίες για τον άνεμο της περιοχής.
- Ανάλυση της υπάρχουσας εμπειρίας και γνώσης των κατοίκων της περιοχής, όπως αυτή αποτυπώνεται στις κατοικίες κλπ.

Η διαδικασία μέτρησης που ακολουθείται στην πράξη διέπεται από διεθνείς κανονισμούς, ώστε να υπάρχει συμβατότητα στα αποτελέσματα, ανεξάρτητα από την περιοχή μέτρησης.

Η συνήθης διαδικασία περιλαμβάνει την τοποθέτηση μετεωρολογικού ιστού με συσκευή ανεμογράφου σε κατάλληλο ύψος πάνω από το έδαφος (συνήθως στα 10 m a.g.l.) και την καταγραφή της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου με συγκεκριμένη χρονική περίοδο δειγματοληψίας (συνήθως 10 min) και για μακροχρόνια διάρκεια, συνήθως 5-10 έτη ή και μεγαλύτερη.

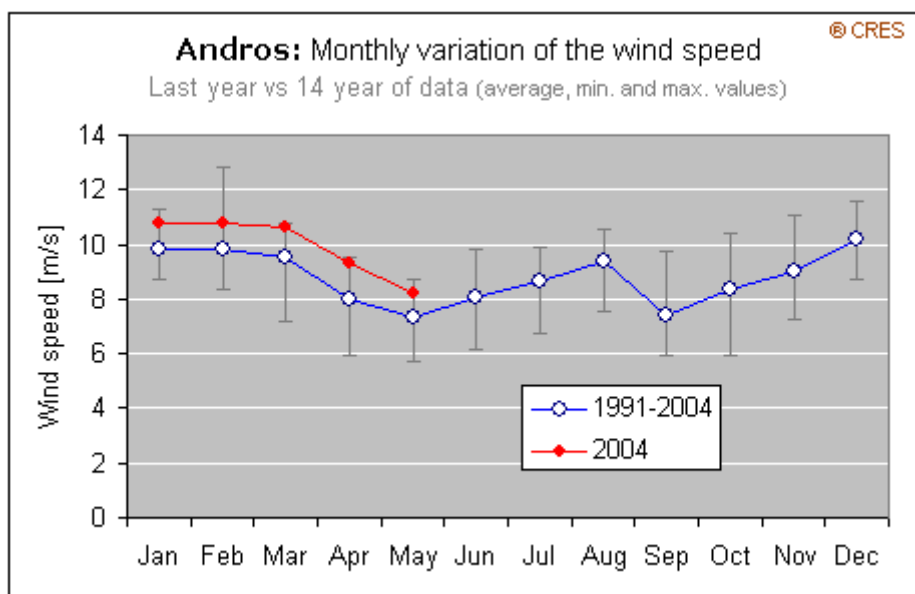
Κλίμακα BEAUFORT (B)

AP (B)	Περιγραφή	V σε H = 10m Ταχύτητα		Περιγραφή συνθηκών στην στεριά
		m.p.h.	m/s	
0	Νηνεμία	<1	<0,2	Ο καπνός αναδύεται κάθετα
1	Υποπνέων	1 – 3	0,3 – 1,5	Η διεύθυνση εντοπίζεται από την κίνηση του καπνού αλλά όχι από τους ανεμοδείκτες
2	Ελαφρός άνεμος (ασθενής)	4 – 7	1,6 – 3,3	Αισθανόμαστε τον άνεμο στο πρόσωπο. Ακούγεται το θρόισμα των φύλλων. Οι ανεμοδείκτες κινούνται.
3	Λεπτός άνεμος (ήπιος)	8 – 12	3,4 – 5,4	Τα φύλλα και τα μικρά κλαδιά βρίσκονται σε διαρκή κίνηση. Μικρές σημαίες κυματίζουν.

4	Μέσος άνεμος (Μέτριος)	13 – 18	5,5 – 7,9	Σηκώνεται σκόνη και χαρτιά από το έδαφος. Κλαδιά μετακινούνται.
5	Φρέσκος άνεμος (λαμπρός)	19 – 24	8,0 – 10,7	Δένδρα χάνουν φύλλωμα, παρουσιάζονται κυματισμοί στις λίμνες.
6	Δυνατός άνεμος (ισχυρός)	25 – 31	10,8 – 13,8	Κίνηση μεγάλων κλαδιών. Τα καλώδια «σφυρίζουν», δυσκολία στο να χρησιμοποιήσουμε ομπρέλες.
7	Σφοδρός	32 – 38	13,9 – 17,1	Ολόκληρα δένδρα μετακινούνται. Το περπάτημα γίνεται με δυσκολία.
8	Θυελλώδης	39 - 46	17,2 – 20,7	Μικρά κλαδιά σπάζουν. Μικρές ζημιές σε
9	Θύελλα	47 – 54	20,8 – 24,4	Μικρές ζημιές σε κτήρια π.χ σε καμινάδες, κεραμίδια.
10	Ισχυρή θύελλα	55 – 63	24,5 – 28,4	Σπανίως εμφανίζεται στη στεριά. Δένδρα ξεριζώνονται, μεγάλες ζημιές σε κτήρια.
11	Σφοδρή θύελλα	64 – 72	28,5 – 32,6	Πολύ σπάνιο φαινόμενο. Μεγάλες καταστροφές παντού.
12	Τυφώνας	>72	>32,6	Χωρίς συγκεκριμένη περιγραφή

Πίνακας 5.1 με την κλίμακα μποφόρ και τις αντίστοιχες ταχύτητες.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η παραπάνω χρονική περίοδος δειγματοληψίας δεν επιτρέπει την καταγραφή φαινομένων μικρής διάρκειας ($\leq 20\text{sec}$), αλλά μεγάλης ταχύτητας ανέμου, γνωστά ως ριπές ανέμου. Οι ριπές ανέμου αν και έχουν μικρή χρονική διάρκεια και είναι ανεπαίσθητες τόσο από τον ανεμογράφο όσο και από το σύστημα ελέγχου της ανεμογεννήτριας, επιφέρουν συχνά κόπωση των μηχανικών τμημάτων της ανεμογεννήτριας



Διάγραμμα 5.1 μηνιαία μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου
Το παραπάνω διάγραμμα έχει μετρήσεις από περιοχή της νήσου Άνδρου

και κυρίως στα περύγια του δρομέα. Ως εκ τούτου, είναι συχνά απαραίτητη η χρήση μικρότερης περιόδου δειγματοληψίας του ανέμου (π.χ. 1 min) σε περιοχές ιδιαίτερου

ενδιαφέροντος, ώστε να αποφεύγεται η εγκατάσταση μηχανών σε περιοχές με συχνές ριπές ανέμου.

Ένα ακόμη σημαντικό στοιχείο που έχει επίπτωση στην μηχανική αντοχή της ανεμογεννήτριας, είναι η μέγιστη ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή καθώς και η συχνότητα εμφάνισής του.

Η διεύθυνση του ανέμου σε μια θέση δείχνει το σημείο του ορίζοντα από το οποίο πνέει ο άνεμος σε σχέση με τη διάταξη μέτρησης. Σε ορισμένες περιοχές ο άνεμος παρουσιάζει μεγάλη σταθερότητα ως προς την διεύθυνση από την οποία πνέει κατά το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα της συνολικής περιόδου μέτρησης. Η διεύθυνση του ανέμου με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης ονομάζεται επικρατούσα. Στην πράξη όμως η διεύθυνση του ανέμου είναι μεταβλητό μέγεθος με πολλές αλλαγές κατά διάφορες χρονικές περιόδους (εποχικότητα).

Σήμερα οι μετρήσεις ανέμου γίνονται διεθνώς με κυπελλοφόρα ή ελικοφόρα ανεμόμετρα, τοποθετούμενα επί ιστών συνήθως σε ύψος 10m από το έδαφος.

Τα κυπελλοφόρα ανεμόμετρα μετρούν τις δυο οριζόντιες συνιστώσες της ταχύτητας με σφάλμα της 6-8%, οφειλόμενο στην κατακόρυφο ενώ τα ελικοφόρα μετρούν μόνο την παράλληλη προς τον άξονα τους συνιστώσα. Βασικό χαρακτηριστικό των κυπελλοφόρων ανεμόμετρων είναι ότι παρουσιάζουν μικρότερη αδράνεια κατά την επιτάχυνση του ανέμου παρά κατά την επιβράδυνσή του με αποτέλεσμα να καταγράφουν κατά μέσο όρο μεγαλύτερες ταχύτητες από τις πραγματικές. Η μέτρηση επομένως απότομων μεταβολών ταχυτήτων ανέμου απαιτεί ακριβέστερες μεθόδους. Μια από αυτές στηρίζεται στην μεταβολή της ταχύτητας του ήχου με την ταχύτητα του ανέμου που αποτελεί το λεγόμενο ηχητικό ανεμόμετρο, το οποίο όμως είναι υψηλότερου λοστούς από τα προηγούμενα. Μια άλλη μέθοδος, η μέθοδος του θερμού νήματος (hot wire), είναι πολύ ακριβής αλλά ακατάλληλη για μετρήσεις στο ύπαιθρο επειδή το όργανο είναι εύθραυστο και η επικάλυψη σιόνης επηρεάζει τη λειτουργία του. Το θερμό νήμα χρησιμοποιείται ευρέως σε πειραματικές μετρήσεις μέσα σε αεροδυναμικές σήραγγες όπου οι συνθήκες είναι ελεγχόμενες.

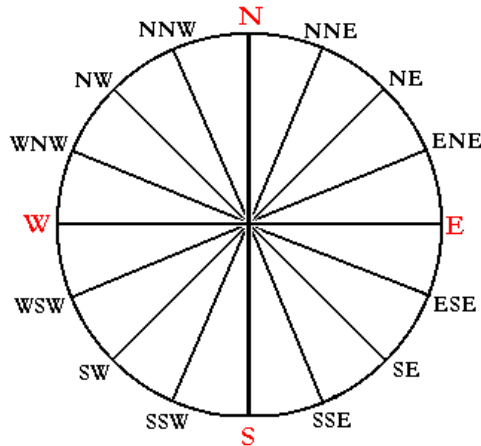
Η συχνότητα με την οποία γίνεται η συλλογή των μετρήσεων του ανέμου εξαρτάται από τον βαθμό της επιθυμητής ακρίβειας καθώς και από το είδος της ανάλυσης τους. Υπολογισμός π.χ της μέσης τιμής δεκαλέπτου δεν απαιτεί υψηλές συχνότητες, ενώ ο υπολογισμός του ενεργειακού φάσματος του ανέμου επιβάλλει τη λήψη δεδομένων τουλάχιστον με συχνότητα 1Hz. Κατά τη μέτρηση της καμπύλης ισχύος ορισμένοι χρησιμοποιούν συχνότητα συλλογής 4Hz δηλ. τέσσερις μετρήσεις ανά 1sec ενώ οι κανονισμοί της AWEA (Αμερικανικής Ένωσης Αιολικής Ενέργειας) συνιστούν λήψη μιας μέτρησης ανά 30sec. Με βάση τις στιγμιαίες ταχύτητες του ανέμου γίνεται υπολογισμός διαφόρων στατιστικών μεγεθών όπως των μέσων τιμών της ταχύτητας 10λεπτου ή μιας ώρας, των αντίστοιχων μέγιστων και ελάχιστων, της τυπικής απόκλισης καθώς και η καταγραφή τους σε μαγνητικές ταινίες, εύκαμπτους ή σκληρούς δίσκους κτλ. Μαζί με την ένταση του ανέμου καταγράφεται ταυτόχρονα και η διεύθυνση του, ο συνδυασμός των οποίων επιτρέπει τον καθορισμό της επικρατέστερης διεύθυνσης του ανέμου σε μια περιοχή. Η πληροφορία αυτή αποτελεί σημαντικό στοιχείο για τη βέλτιστη διάταξη των Α/Γ ενός αιολικού πάρκου.

Χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις για την διεύθυνση του ανέμου με την ίδια περίοδο δειγματοληψίας για την ταχύτητα του ανέμου (10 min), υπολογίζεται η συχνότητα εμφάνισης για κάθε μία από τις κύριες κατευθύνσεις και κατασκευάζεται με αυτόν τον τρόπο το πολικό διάγραμμα συχνότητων ανέμου, που ονομάζεται ανεμολόγιο διευθύνσεων (wind rose).

Το ανεμολόγιο διευθύνσεων χωρίζεται σε τομείς (sectors), οι οποίοι στον αριθμό είναι από 8-16, ανάλογα με τον αριθμό των κυρίων διευθύνσεων του ανέμου που μετρούνται. Το κέντρο κάθε τομέα σε μοίρες αντιστοιχεί σε μια από τις κύριες διευθύνσεις του ανέμου (γωνία

αζιμουθίου). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται 16 τομείς, με εύρος 22,5°. ο τομέας με κέντρο τις 0° αντιστοιχεί στον γεωγραφικό Βορρά, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα 5.2.

Ανεμολόγιο διευθύνσεων



Η γωνία μεταξύ δυο κύριων διευθύνσεων είναι : $\pi/8$ rad ή 22,5°

Σχήμα 5.2 Ανεμολογική ροζέτα

Υπάρχουν 16 κύριες διευθύνσεις που χρησιμοποιούμε για την ανάλυση των στοιχείων:

- | | | |
|-----|-----------|------------------------------|
| 1. | N: | Βόρεια |
| 2. | NNE: | Βόρεια – Βόρειο Ανατολικά |
| 3. | NE: | Βόρειο Ανατολικά |
| 4. | ENE: | Ανατολικά – Βόρειο Ανατολικά |
| 5. | E: | Ανατολικά |
| 6. | ESE: | Ανατολικά – Νότιο Ανατολικά |
| 7. | SE: | Νότιο Ανατολικά |
| 8. | SSE: | Νότια – Νότιο Ανατολικά |
| 9. | S: | Νότια |
| 10. | SSW: | Νότια – Νότιο Δυτικά |
| 11. | SW: | Νότιο Δυτικά |
| 12. | WSW: | Δυτικά – Νότιο Δυτικά |
| 13. | W: | Δυτικά |
| 14. | WNW: | Δυτικά – Βόρειο Δυτικά |
| 15. | NW: | Βόρειο Δυτικά |
| 16. | NNW: | Βόρεια - Βόρειο Δυτικά |

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι διευθύνσεις του ανέμου στο προηγούμενο σχήμα 5.2 έχουν αποδοθεί με τους αντίστοιχους αγγλικούς όρους, όπως άλλωστε συμβαίνει συνήθως στην πράξη.

§5.2.2 Στατιστική ανάλυση της ταχύτητας του ανέμου – Κατανομή Weibull

Ο υπολογισμός της μέσης τιμής της ταχύτητας του ανέμου γίνεται από τη σχέση:

$$u_{\text{μεσ}} = \int_0^T u(t) dt \tag{5.1}$$

ή

$$u_{\text{μεσ}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i \tag{5.2}$$

όπου

$u_{\text{μεσ}}$ η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου σε m/sec

T η περίοδος δειγματοληψίας σε sec ή min

N ο αριθμός των διαθέσιμων δειγμάτων ταχύτητας ανέμου

$u(t)$, u_i η στιγμιαία τιμή ταχύτητας του ανέμου για συνεχή ή διακριτό χρόνο αντίστοιχα.

Η διακύμανση σ_v^2 της ταχύτητας του ανέμου περί την μέση τιμή της δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_v^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (v_i - v_{\text{μεσ}})^2 \tag{5.3}$$

όπου για τα χρησιμοποιούμενα μεγέθη ισχύουν οι παρατηρήσεις των προηγούμενων σχέσεων.

Ένα ακόμα σημαντικό μέγεθος στην μελέτη του ανέμου είναι ο στροβιλισμός, του οποίου η ένταση I υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I = \frac{\sigma_v}{u_{\text{μεσ}}} \quad (5.4)$$

Ο στροβιλισμός του ανέμου οφείλεται στην ύπαρξη διαφόρων χαρακτηριστικών του εδάφους τα οποία δημιουργούν εμπόδια στην ροή του ανέμου. Περιοχές με μεγάλη ένταση στροβιλισμού πρέπει να αποφεύγονται γιατί προκαλούνται προβλήματα στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ανεμογεννήτρια και κυρίως στην μηχανική αντοχή των πτερυγίων.

Η στατική ανάλυση για τις διευθύνσεις του ανέμου επικεντρώνεται στον υπολογισμό των συχνοτήτων εμφάνισης ετησίως κάθε μίας από τις κύριες διευθύνσεις καθώς και στον καθορισμό της καμπύλης διάρκειας του ανέμου σε κάθε έναν από τους 16 τομείς του ανεμολογίου. Οι παραπάνω πληροφορίες είναι σημαντικές για τον υπολογισμό της πυκνότητας ισχύος του ανέμου σε μία περιοχή και της ηλεκτρικής ενέργειας που αναμένεται να παράγει μια ανεμογεννήτρια στην συγκεκριμένη θέση.

Το πρόβλημα της προσαρμογής των πραγματικών δεδομένων για τη συχνότητα εμφάνισης της ταχύτητας του ανέμου μιας περιοχής σε μια από τις γνωστές κατανομές της στατιστικής ανάλυσης, επιλύεται ικανοποιητικά με την χρήση της κατανομής Weibull, που διατυπώνεται από τη σχέση:

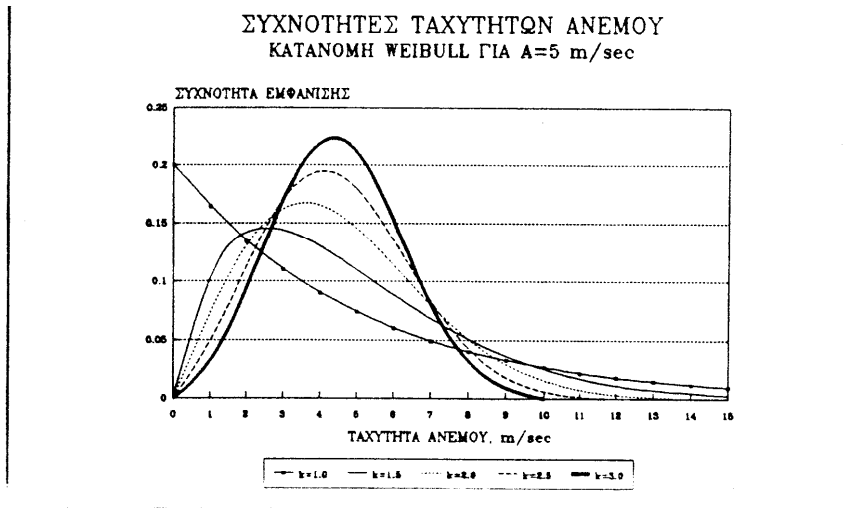
$$f(u) = \frac{k}{A} \left(\frac{u}{A}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{u}{A}\right)^k} \quad (5.5)$$

όπου

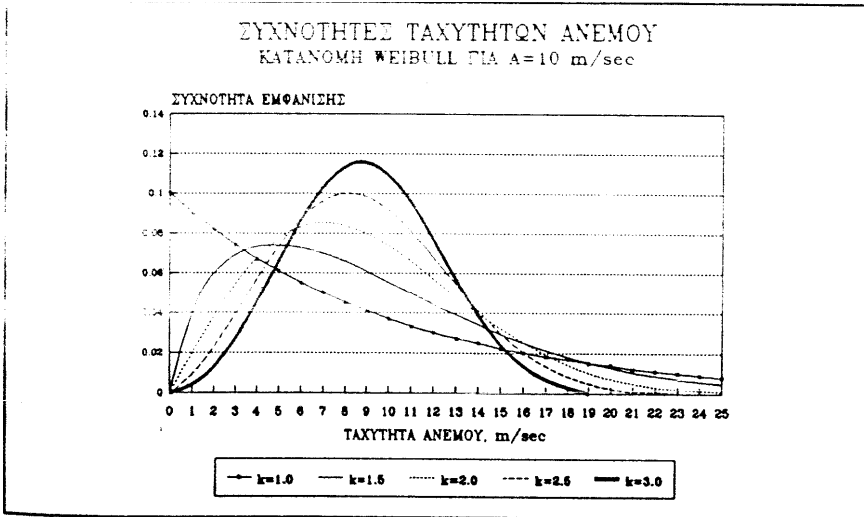
$f(u)$ η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, δηλαδή η πιθανότητα η ταχύτητα του ανέμου να πάρει τιμή στο διάστημα $[u-du/2, u+du/2]$

A η παράμετρος γενικευμένης ταχύτητας ή σταθερά σχήματος (shape factor) σε m/sec
 k η παράμετρος μορφής της κατανομής, η οποία είναι μια αδιάστατη σταθερά (form factor)

Στα παρακάτω σχήματα δίνεται η γραφική παράσταση της κατανομής Weibull για τιμές της παραμέτρου A 5m/sec και 10m/sec



Σχήμα 5.3 κατανομή Weibull των ταχυτήτων του ανέμου για A = 5 m/sec και μεταβλητό



Σχήμα 5.4 κατανομή Weibull των ταχυτήτων του ανέμου για A = 10 m/sec και μεταβλητό

Η συνάρτηση ολικής πιθανότητας της κατανομής Weibull δίνεται από την επόμενη σχέση:

$$F(u) = F(u \leq u_x) = 1 - e^{-\left(\frac{u}{A}\right)^k} \tag{5.6}$$

και εκφράζει την πιθανότητα η ταχύτητα του ανέμου να είναι μικρότερη ή ίση της τιμής u_x σε m/sec.

Η χρονική διάρκεια $H(u_1, u_2)$ σε ώρες ετησίως κατά την οποία ο άνεμος έχει τιμές ταχύτητας στο διάστημα $[u_1, u_2]$, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$H(u_1, u_2) = 8760 \left(e^{-\left(\frac{u_1}{A}\right)^k} - e^{-\left(\frac{u_2}{A}\right)^k} \right) \tag{5.7}$$

Η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου υπολογίζεται σαν συνάρτηση των παραμέτρων A και k της κατανομής Weibull

$$u_{\text{μεσ}} = A\Gamma\left(1 + \frac{1}{K}\right) \tag{5.8}$$

Συνάρτηση «Γάμμα», Τυπικές Τιμές για διάφορα n

n	Γ(n)
1,00	1,0000
1,10	0,9514
1,20	0,9182
1,30	0,8975
1,40	0,8873
1,50	0,8862
1,60	0,8935
1,70	0,9086
1,80	0,9314
1,90	0,9618
2,00	1,0000

Πίνακας 5.2

όπου η τιμή της κατανομής Γάμμα δίνεται από το ολοκλήρωμα:

$$\Gamma(n) = \int_0^{\infty} x^{n-1} e^{-x} dx \tag{5.9}$$

Οι τιμές της κατανομής Γάμα υπολογίζονται από πίνακες και διάφορες τιμές της παραμέτρου k και της κατανομής Weibull.

Τέλος ο υπολογισμός των παραμέτρων A και k της κατανομής Weibull, η οποία προσαρμόζεται στις μετρούμενες τιμές της ταχύτητας του ανέμου σε μια από τις μετρούμενες τιμές της ταχύτητας του ανέμου σε μια περιοχή, γίνεται μέσω της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων και της ευθείας παλινδρόμησης:

$$\ln(-\ln(1 - F(u \leq u_x))) = -k \ln A + k \ln u \tag{5.10}$$

όπου u είναι οι τιμές της ταχύτητας του ανέμου, που προέκυψαν από τις μετρήσεις, σε m/sec.

§5.2.3 Θεωρητική ενέργεια από τον άνεμο

Η θεωρητική ενέργεια που λαμβάνεται από τον άνεμο δίνεται από τη σχέση:

$$E = \frac{1}{2} m u^2 \tag{5.11}$$

όπου

E η κινητική ενέργεια που μεταφέρει ο άνεμος σε Joules
 m η μάζα του ανέμου που βρίσκεται σε κίνηση, σε kg

u η ταχύτητα της μάζας αυτής του ανέμου σε m/sec

Χρησιμοποιώντας την πυκνότητα του αέρα, ρ, και το εμβαδόν A, που εκφράζει την επιφάνεια μέσα από την οποία διέρχεται ο άνεμος, προκύπτει η ακόλουθη έκφραση:

$$E = \frac{1}{2} \rho A u^3 \quad (5.12)$$

και η πυκνότητα ενέργειας P_A ανά μονάδα εμβαδού είναι:

$$P_A = \frac{1}{2} \rho u^3 \quad (5.13)$$

Η πυκνότητα του αέρα μεταβάλλεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\rho = 0,4644 \frac{P_o - P_u}{\theta} \quad (5.14)$$

όπου

- ρ η πυκνότητα του αέρα σε kg/m³
- P_o η ατμοσφαιρική πίεση σε mm Hg
- P_u η πίεση των υδρατμών σε mm Hg
- θ η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας σε °C

πρακτικά λαμβάνεται η τιμή:

$$P = 1,225 \text{ kg/m}^3$$

Αν για μια συγκεκριμένη περιοχή είναι γνωστή η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου και η κατανομή Weibull, δηλαδή οι τιμές των παραμέτρων A, k, η θεωρητική ενέργεια που λαμβάνεται από τον άνεμο είναι:

$$E_A = \frac{1}{2} \rho u_{\text{μεσ}}^3 = \frac{1}{2} \rho A^3 \left(\Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \right)^3 \quad (5.15)$$

και από τις ιδιότητες της κατανομής Γάμα ισχύει:

$$E_A = A^3 F_E(k) \quad (5.16)$$

όπου

- E_A η πυκνότητα ενέργειας του ανέμου σε kWh/m² ανά έτος
- F_E ο ενεργειακός συντελεστής της κατανομής Weibull, του οποίου οι τιμές υπολογίζονται από πίνακες.

Για τον ενεργειακό συντελεστή της κατανομής Weibull ισχύει η σχέση:

$$F_E(k) = \frac{1}{2} \rho \Gamma \sqrt{1 + \frac{1}{k}} \quad (5.17)$$

Τέλος η πυκνότητα ισχύος του ανέμου σε kW/m², υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$P_A = \frac{E_A}{8760} = \frac{A^3 F_E(k)}{8760} \quad (5.18)$$

Ο υπολογισμός της πυκνότητας ισχύος με την παραπάνω μέθοδο γίνεται για τα δεδομένα καθενός από τους 16 τομείς του ανεμολογίου, οι οποίοι διαφέρουν κατά 22,5°. Η συνολική

πυκνότητα ισχύος του ανέμου στην συγκεκριμένη περιοχή βρίσκεται από το μέσο όρο των τιμών πυκνότητας ισχύος των 16 τομέων:

$$P_A = \sum_{i=1}^{16} f_i P_{A_i} \quad (5.19)$$

όπου

P_A η πυκνότητα ισχύος του ανέμου στην περιοχή σε kW/m²

P_{A_i} η πυκνότητα ισχύος του ανέμου στον i τομέα σε kW/m²

f_i η συχνότητα εμφάνισης της i κύριας διεύθυνσης του ανέμου

Η σχέση της θεωρητικής ισχύος του ανέμου της προηγούμενης σχέσεως με αυτή που δύναται να παράγει μια ανεμογεννήτρια εγκατεστημένη στη συγκεκριμένη θέση, υπολογίστηκε το 1927 από τον Γερμανό μηχανικό Betz ότι είναι:

$$P_{\max} = \frac{16}{27} P_A \quad (5.20)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην πράξη η ενεργειακή απόδοση των ανεμογεννητριών δεν υπερβαίνει το 40% της θεωρητικής ενέργειας που μεταφέρει ο άνεμος. Το γεγονός αυτό δικαιολογεί και τον συμβολισμό P_{\max} ορίου του Betz και δείχνει ότι ανεξάρτητα από τις πιθανές τεχνολογικές βελτιώσεις και αλλαγές στις ανεμογεννήτριες, μόνο ένα μικρό τμήμα της διαθέσιμης αιολικής ενέργειας είναι εκμεταλλεύσιμο, με μέγιστη τιμή το όριο του Betz.

5.2.4 Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος πάνω από το έδαφος

Το θέμα της μεταβολής του ανέμου με το ύψος πάνω από το έδαφος απασχολεί σημαντικά τους ερευνητές καθώς είναι αποφασιστικός παράγοντας στον υπολογισμό της πυκνότητας ισχύος μιας περιοχής και της παραγόμενης από μια ανεμογεννήτρια ηλεκτρικής ενέργειας.

Η αναγωγή των μετρήσεων του ανέμου σε κάποιο ύψος πάνω από το έδαφος γίνεται μέσω του μετασχηματισμού:

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{\ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right)} \quad (5.21)$$

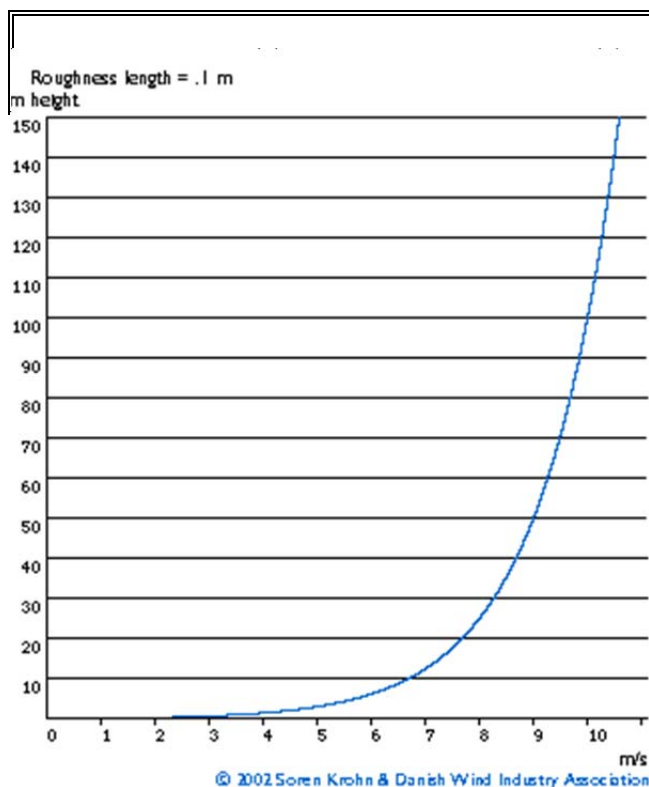
όπου

u_1, u_2 είναι οι ταχύτητες του ανέμου (m/sec) σε ύψος h_1 και h_2 σε (m) αντίστοιχα

z_0 είναι το μήκος τραχύτητας του εδάφους σε m

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το ύψος των μετρήσεων του ανέμου είναι συνήθως τα 10m a.g.l. Συνεπώς, η προηγούμενη σχέση, όταν υπολογίζεται η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος H πάνω από το έδαφος, γράφεται:

$$\frac{u_H}{u_{10}} = \frac{\ln\left(\frac{H}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{10}{z_0}\right)} \quad (5.22)$$



ΩΝ ΜΗΚΟΥΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ

Μήκος τραχύτητας του εδάφους ονομάζεται το ύψος πάνω από το έδαφος στο οποίο η ταχύτητα του ανέμου παύει να είναι μηδέν και ακολουθεί τον λογαριθμικό νόμο στην μεταβολή της με το ύψος. Γενικά, η τραχύτητα είναι άμεσα συνδεδεμένη με τις πιθανές ανωμαλίες του εδάφους, την χλωρίδα και τα διάφορα εμπόδια, όπως φράκτες και κτίρια, τα οποία επηρεάζουν την ροή του ανέμου πάνω από το έδαφος. Επίσης, η τραχύτητα μεταβάλλεται με την εποχή, λόγω των αλλαγών στη βλάστηση, και με την πυκνότητα των διαφόρων χαρακτηριστικών στην περιοχή.

Διάγραμμα 5.2 Ταχύτητα του ανέμου για μήκος τραχύτητας 0,1 m σε σχέση με το ύψος από το έδαφος

Το έδαφος ανάλογα με την τραχύτητα που παρουσιάζει

κατατάσσεται σε τάξεις μήκους τραχύτητας (terrain roughness class). Μια τυπική μορφή των τιμών που έχει το μήκος τραχύτητας για διάφορες κατηγορίες εδάφους δίνεται στον επόμενο πίνακα 5.3.

Η παράμετρος A της κατανομής μεταβάλλεται με το ύψος σύμφωνα με το λογαριθμικό νόμο της σχέσεως 5.21, δηλαδή ισχύει:

$$\frac{A_H}{A_{10}} = \frac{\ln\left(\frac{H}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{10}{z_0}\right)} \quad (5.23)$$

για την παράμετρο k της κατανομής Weibull θα πρέπει να τονιστεί ότι η μεταβολή με το ύψος είναι μικρή κυρίως για ύψος 10-100m a.g.l. Πρακτικά, στους υπολογισμούς της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από ανεμογεννήτρια, π.χ. σε ύψος 30m πάνω από το έδαφος, η σταθερά k λαμβάνεται σταθερή και ίση με την τιμή που έχει στο ύψος μετρήσεων, δηλ. στα 10m a.g.l.

Τάξη εδάφους	Τιμή μήκους τραχύτητας σε m	Περιγραφή τραχύτητας εδάφους
0	0.0002	Πολύ χαμηλή(ανοιχτή θάλασσα χωρίς υψηλό κυματισμό)
0.5	0.0024	Τελείως ανοιχτό ανάγλυφο με λεία επιφάνεια, π.χ διάδρομοι αεροδρομίων, γρασίδι κ.τ.λ
1	0.03	Ανοιχτή αγροτική περιοχή χωρίς εμπόδια θάμνων και δένδρων με πολύ αραιά κτήρια. Μόνο μικροί λόφοι
1.5	0.055	Αγροτική περιοχή με μερικά σπίτια και μέχρι 8 μέτρων ύψους δένδρα με μια απόσταση περίπου 1250 m.
2	0.1	Αγροτική περιοχή με μερικά σπίτια με 8 μέτρων ύψους δένδρα με μια απόσταση περίπου 500 m.
2.5	0.2	Αγροτική περιοχή με πολλά σπίτια, θάμνοι και φυτά, ή 8 m δένδρα με μια απόσταση περίπου 250m.
3	0.4	Χωριά, μικρές πόλεις, αγροτικές περιοχές με πολλά ψηλά δένδρα και θάμνους δάση και πολύ τραχύ και ανομοιογενές ανάγλυφο εδάφους
3.5	0.8	Μεγάλες πόλεις με ψηλά κτήρια
4	1.6	Πολύ μεγάλες πόλεις με ψηλά κτήρια και ουρανοξύστες

Πίνακα 5.3 τιμές του μήκους τραχύτητας για διάφορες μορφές εδάφους

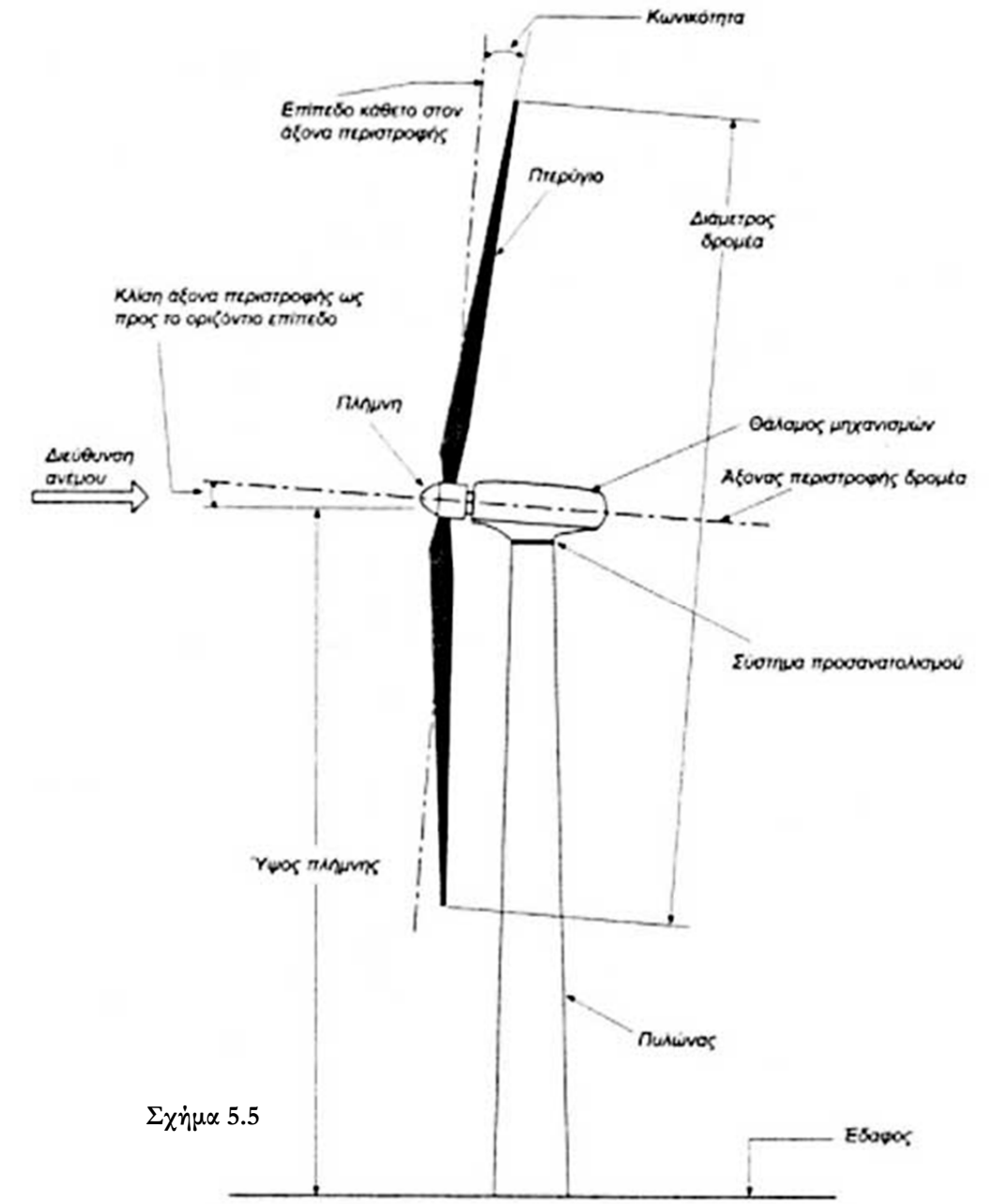
§5.3 Γενική Μελέτη Υποσυστημάτων Α/Γ Για Τη Βέλτιστη Εκμετάλλευση Της Ισχύος Του Αέρα

Γενικά ο αεροδυναμικός θόρυβος των Α/Γ αποτελείται από τα εξής δύο μέρη:

Θόρυβος Περιστροφής Θόρυβος Περιστροφής: Περιλαμβάνει όλους τους θορύβους οι οποίοι έχουν διακριτές συχνότητες που παράγονται σε πολλαπλάσιες αρμονικές της συχνότητας διελεύσεως των πτερυγίων. Οι διακριτές αυτές συχνότητες βρίσκονται από το γινόμενο του αριθμού πτερυγίων επί την τιμή της γωνιακής ταχύτητας. Ο θόρυβος αυτός παράγεται λόγω του πεδίου διακυμάνσεως πίεσεως το οποίο επιδρά επί του αέρος σε συγκεκριμένη περιοχή κοντά στ δίσκο ενέργειας της Α/Γ. η μέγιστη στάθμη θορύβου παρατηρείται στο επίπεδο περιστροφής και αυξάνει κατ' αναλογία προς την απορροφόμενη ισχύ, την μεγαλύτερη διάμετρο, τον μικρότερο αριθμό πτερυγίων και την μεγαλύτερη ταχύτητα ακροπτερυγίων.

Θόρυβος Τύρβης (ή θόρυβος ευρέως φάσματος): Περιλαμβάνει τον θόρυβο που παράγεται από το ασταθές πεδίο πίεσεως το οποίο συνδέεται με τους στροβίλους που προέρχονται από το χείλος εκφυγής και τα ακροπτερύγια, καθώς και εκείνων που συνδέεται με τα φαινόμενα τύρβης στον ροϊκό σωλήνα.

Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο προσδίδουμε καμπυλότητα στο χείλος εκφυγής, αντί να το σχεδιάσουμε τελείως αιχμηρό (π.χ. αεροτομές τύπου Clark-Y που περιορίζουν τους παραγόμενους στροβίλους). Η συχνότητα διαδόσεως της τύρβης είναι συνάρτηση της ταχύτητας ροής. Σε ένα περιστρεφόμενο πτερόγιο η γραμμική του ταχύτητα είναι συνάρτηση της αδιάστατης ακτινικής θέσης: όσο μεγαλώνει η ακτίνα τόσο μεγαλώνει και η γραμμική ταχύτητα. Συνεπώς παράγεται ευρύ φάσμα διαχεομένων συχνοτήτων. Δεδομένου ότι η στάθμη θορύβου είναι ανάλογη προς την έκτη δύναμη της γραμμικής ταχύτητας, συνάγεται ότι οι συχνότητες που συνδέονται με το ακροπτερόγιο τείνουν να έχουν τη μέγιστη δυνατή ένταση.



Σχήμα 5.5

Επομένως, προκειμένου να μειώσουμε τον θόρυβο τύρβης πρέπει να ελαττώσουμε την ταχύτητα των ακροπτερυγίων. Για να αναπληρώσουμε την απώλεια της εξαγόμενης ισχύος, μπορούμε να αυξήσουμε την επιφάνεια της πτέρυγας. Όμως η αύξηση αυτή επιφέρει μείωση

του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος και επίσης επιβαρύνει τη δομική της ακεραιότητα. Είναι και πάλι προφανές ότι επιβάλλεται συγχερασμός των δύο προσεγγίσεων.

Πτερύγια

Η βέλτιστη σχεδίαση πτερυγίων Α/Γ προϋποθέτει τη δυνατότητα πρόβλεψης των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτά για δεδομένες ανεμολογικές συνθήκες καθώς και γνώση των ιδιοτήτων του υλικού κατασκευής των. Οι δυνάμεις αυτές στις Α/Γ οριζοντίου άξονα οφείλονται κυρίως στον άνεμο (αεροδυναμικά φορτία) και στο πεδίο βαρύτητας.

α) γωνία μεταξύ της διεύθυνσης του ανέμου και του επιπέδου του δρομέα (γωνία yaw)

Υπό κανονικές συνθήκες ο άνεμος πρέπει να συναντά καθέτως το επίπεδο του δρομέα. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ενός ανεμοδείκτη και ενός μηχανικού συστήματος προσανατολισμού. Εν τούτοις, η γωνία yaw εμφανίζεται για δύο κυρίως λόγους:

1) ο ανεμοδείκτης είναι αδύνατο να μετρήσει μια αντιπροσωπευτική για όλη την επιφάνεια του δρομέα διεύθυνση του ανέμου, και

2) το μηχανικό σύστημα προσανατολισμού δεν έχει τη δυνατότητα αντίδρασης στις γρήγορες μεταβολές της διεύθυνσης του ανέμου λόγω της αδράνειάς του αλλά και της αναγκαιότητας περιορισμού των αναπτυσσόμενων επί του δρομέα γυροσκοπικών δυνάμεων.

Αρχικά ο έλεγχος της ισχύος των Α/Γ στηριζόταν στην αύξηση της γωνίας αυτής, η οποία όμως επειδή προκαλούσε μεγάλα δυναμικά φορτία εγκαταλείφθηκε.

β) κλίση του άξονα του δρομέα ως προς το οριζόντιο επίπεδο (γωνία tilt)

για να αυξηθεί η απόσταση των πτερυγίων από τον πύργο των Α/Γ, ο άξονας του δρομέα συνήθως τοποθετείται υπό κάποια κλίση (6° το πολύ) ως προς το οριζόντιο επίπεδο.

γ) κωνικότητα

Ενίοτε η τοποθέτηση των πτερυγίων επί της πλήμνης γίνεται έτσι ώστε να προσδίδεται μια κωνικότητα στον δρομέα (βλ. σχ.5.5). Η διάταξη αυτή έχει αποδειχθεί ότι ελαττώνει τις καμπτικές ροπές των πτερυγίων και συνεπώς συντελεί στην αύξηση της διάρκειας ζωής τους.

Η κωνικότητα του δρομέα εξυπηρετεί στην μείωση των καμπτικών ροπών (flapwise) λόγω ανάπτυξης φυγόκεντρων δυνάμεων που τείνουν να κάμψουν τα πτερύγια κατά την αντίθετη φορά. Πρέπει βέβαια να έχουμε υπόψη ότι σε περίπτωση υπερτάχυνσης του δρομέα οι φυγόκεντρες δυνάμεις παίρνουν πολύ υψηλές τιμές (είναι ανάλογες του ω^2) με αποτέλεσμα να σημειώνεται αλλαγή του προσήμου των τάσεων και επομένως πρόωρη κόπωση των πτερυγίων.

Η συμπεριφορά του ξύλου έναντι κοπώσεως εξαρτάται από την υγρασία και τον τρόπο φόρτισής του δηλ. υψηλή υγρασία όπως και θλιπτικά φορτία μειώνουν την αντοχή του. Πρόσφατες έρευνες κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα ξύλινα πτερύγια υπό μορφή λεπτών στρωμάτων παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή, ενώ το πρόβλημα της υγρασίας μπορεί να αντιμετωπισθεί επιτυχώς με κάλυψη του ξύλου από συνθετικά υλικά.

Οι ίνες άνθρακα χρησιμοποιούνται από μερικούς κατασκευαστές για την ελάττωση του βάρους των πτερυγίων (ως ελαφρότερες από το FGRP) και ιδίως στα σημεία που οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι υψηλές.

Ποιότητα Ισχύος

Η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος μετάδοσης των Α/Γ επιτρέπει την μείωση του πλάτους της παραγόμενης ισχύος της οποίας οι διακυμάνσεις οφείλονται στις ριπές του ανέμου. Μερικές από τις μεθόδους βελτίωσης της ποιότητας ισχύος είναι η ανάρτηση του πολλαπλασιαστή στροφών από ελατήρια, ή η χρήση υδραυλικού ή ελαστικού συνδέσμου μεταξύ πολλαπλασιαστή στροφών και γεννήτριας και η χρήση γεννητριών μεταβλητών στροφών.

Έλεγχος Ισχύος Α/Γ

Η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου προκαλεί εν γένει μεταβολή των στροφών και της ροπής της ηλεκτρικής γεννήτριας και κατ' επέκταση της ισχύος εξόδου. Αυτό φαίνεται καλύτερα από τη δυναμική εξίσωση της Α/Γ:

$$I d\omega/dt = Q_{\delta} - Q_I$$

όπου

I: ροπή αδράνειας του δρομέα

ω : γωνιακή ταχύτητα του δρομέα

Q_{δ} : ροπή του δρομέα

Q_I : ροπή του φορτίου

από την οποία προκύπτει ότι αν η ροπή του δρομέα γίνει μεγαλύτερη ή μικρότερη από τη ροπή του φορτίου ο δρομέας επιταχύνεται ή επιβραδύνεται αντίστοιχα. Για να λειτουργεί ο δρομέας με μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή ($C_{p_{max}}$) πρέπει η ροπή του φορτίου να μεταβάλλεται ανάλογα με το ω^2 και η ισχύς με το ω^3 . επομένως η βέλτιστη λειτουργία μιας Α/Γ μπορεί να επιτευχθεί ή με ρύθμιση της ισχύος της (P) ώστε αν ισχύει η σχέση $P \sim \omega^3$, ή με ρύθμιση των στροφών της ώστε ο συντελεστής $\lambda (= \omega R/V)$ να αντιστοιχεί στο $C_{p_{max}}$ για κάθε ταχύτητα ανέμου.

Στις Α/Γ μεταβλητού βήματος η διατήρηση της ισχύος του σε ορισμένα επιθυμητά όρια επιτυγχάνεται με την στρόφιξη των πτερυγίων περί τον μεγάλο τους άξονα. Η διαδικασία αυτή στηρίζεται στη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου και της ισχύος εξόδου της Α/Γ.

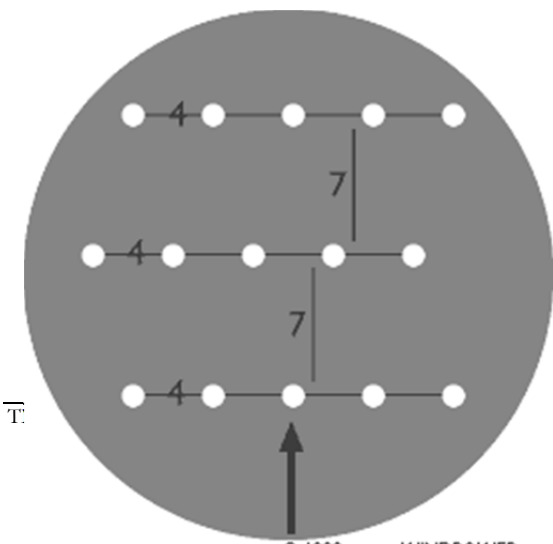
Με βάση τα δεδομένα αυτά και την επιθυμητή ισχύ, το σύστημα ελέγχου της Α/Γ (controller system) αλλάζει το βήμα των πτερυγίων λαμβάνοντας υπόψη τη δυναμική συμπεριφορά της Α/Γ. αν αγνοηθεί ο τελευταίος παράγοντας η λειτουργία του controller μπορεί να οδηγήσει την Α/Γ σε σταθερή λειτουργία με απρόβλεπτες συνέπειες.

Για παράδειγμα Α/Γ με επαγωγική γεννήτρια περιορίζει τις τυχόν επιβαλλόμενες διαταραχές (μεταβολές Q_{δ}) ενώ με σύγχρονη γεννήτρια, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της Α/Γ (π.χ. ροπή αδράνειας του δρομέα), τις αυξάνει.

Τέλος οι Α/Γ σταθερής πτερυγώσης διατηρούν την ισχύ τους σε κάποια όρια λόγω του φαινομένου stall, το οποίο δεν επιτρέπει την αύξησή της ακόμη και αν η ταχύτητα του ανέμου αυξάνει.

9 Σχεδίαση Αιολικού Πάρκου (Α/Π)

Λόγοι περιορισμού του κόστους εγκατάστασης, ελέγχου και συντήρησης των Α/Γ επέβαλαν τη δημιουργία ΑΠ, δηλ. ομάδων Α/Γ εγκατεστημένων σε μικρές σχετικά μεταξύ τους αποστάσεις. Σήμερα

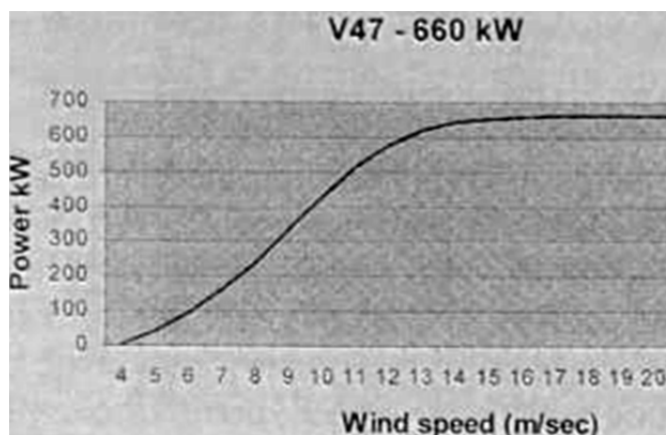
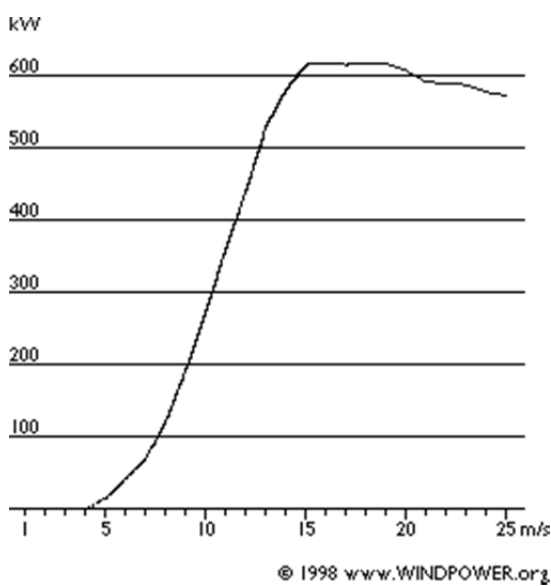


είναι εγκατεστημένα διεθνώς περί τα 400 ΑΠ από τα οποία 50 στον Ευρωπαϊκό χώρο και η πλειονότητα των υπολοίπων στις Η.Π.Α. Το πλήθος των Α/Γ ανά ΑΠ ποικίλει και κυμαίνεται μεταξύ 20-30 Α/Γ στην Ευρώπη και 100-200 Α/Γ στις Η.Π.Α. Ένα σοβαρό πρόβλημα που έχει να αντιμετωπίσει ο σχεδιαστής ΑΠ είναι η εύρεση της βέλτιστης διάταξης των Α/Γ για μεγιστοποίηση της ενεργειακής παραγωγής και περιορισμό της καταπόνησης των πτερυγίων τους. Έχει παρατηρηθεί ότι η παραγωγή μιας Α/Γ ελαττώνεται όταν λειτουργεί στον ομόρρου μιας άλλης ενώ ταυτόχρονα τα αεροδυναμικά φορτία της αυξάνουν σημαντικά. Το πρώτο οφείλεται στην πτώση της ταχύτητας του ανέμου κατάντι μιας Α/Γ ενώ το δεύτερο στο υψηλό επίπεδο τριβής του ομόρρου.

Μετρήσεις της ενέργειας των Α/Γ NIBE Α και Β (στη Δανία) έδειξαν μια μείωση 1,5% για την Α/Γ που βρισκόταν σε απόσταση 5 διαμέτρων (D) κατάντι της άλλης. Στην τοποθεσία ORKNEY της Μ. Βρετανίας διαπιστώθηκε μια αύξηση κατά 40% στο πλάτος των αεροδυναμικών φορτίων μιας Α/Γ ευρισκόμενης σε απόσταση 7D κατάντι μιας άλλης. Σύμφωνα με θεωρητικές και πειραματικές μελέτες η επίδραση του ομόρρου μιας Α/Γ παύει να υφίσταται πρακτικά μετά από απόσταση 10D. Περιορισμοί όμως ως προς την διαθέσιμη έκταση οδηγούν συχνά στην εγκατάσταση Α/Γ με μικρότερες των 10D αποστάσεις. Στα ΑΠ των ΗΠΑ η απόσταση αυτή είναι 2-3D κατά την κάθετη προς τον άνεμο διεύθυνση.

Καμπύλη

Η καμπύλη ισχύος Α/Γ δηλ. η συνάρτηση παραγόμενης ισχύος-ταχύτητας ανέμου αποτελεί μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους αξιολόγησης της απόδοσης Α/Γ διότι βάσει αυτής μπορεί να γίνει με μεγάλη ακρίβεια η πρόβλεψη της ενεργειακής της παραγωγής (εάν είναι γνωστά



Σχήμα 5.6 καμπύλες ισχύος Α/Γ stall και pitch

τα ανεμολογικά δεδομένα της περιοχής εγκατάστασής της) και κατ' επέκταση η αποτίμηση της οικονομικής βιωσιμότητάς της.

§ 5.4 Συστήματα Αποθήκευσης Της Αιολικής Ενέργειας

Όπως γνωρίζουμε, το βασικότερο ίσως μειονέκτημα της αιολικής ενέργειας είναι η ασυνέχεια παραγωγής της, καθώς και η αδυναμία παραγωγής ενέργειας καταβούληση με σκοπό την κάλυψη της στιγμιαίας ζήτησης. Το γεγονός αυτό δημιουργεί την ανάγκη αποθήκευσης της

παραγόμενης ενέργειας, ώστε να καλυφθούν οι ενεργειακές μας ανάγκες σε περιόδους άπνοιας ή σε μια προσπάθεια καλύτερης προσαρμογής της ενεργειακής ζήτησης και προσφοράς. Βέβαια η χρήση συστημάτων αποθήκευσης αυξάνει σημαντικά το κόστος αρχικής εγκατάστασης, ενώ προσθέτει και επιπλέον απώλειες μετατροπής, όπως θα δούμε και σε επόμενο κεφάλαιο. Τα κυριότερα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας είναι:

Συστοιχίες συσσωρευτών

Αποτελούν την πλέον κατάλληλη μέθοδο για αποθήκευση σχετικά μικρών ποσοτήτων ενέργειας, για μικρούς οικισμούς και μεμονωμένες αγροικίες. Το μέγεθος και η συνδεσμολογία των συσσωρευτών εξαρτάται από την απαιτούμενη επάρκεια ενέργειας και το είδος καταναλώσεων. Το σκότος των συσσωρευτών είναι αρκετά σημαντικό ιδιαίτερα για συσσωρευτές μεγάλου επιτρεπόμενου αριθμού φορτίσεων –αποφορτίσεων, και απαιτείται προσεχτική συντήρηση της εγκατάστασης. Σε κατανάλωσης εναλλασσόμενου ρεύματος είναι απαραίτητη η ύπαρξη ανορθωτών, μετασχηματιστών και σταθεροποιητών τάσεως και συχνότητας.

Συστήματα υδροδυναμικής αποθηκείσεως της ενέργειας

Η εφαρμογή αυτή ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη χώρα μας στο άμεσο μέλλον, κύρια νησιά του Αιγαίου. Στην περίπτωση αυτή η περίσσεια της αιολικής ενέργειας, κατά τις ώρες μικρής ενεργειακής ζήτησης, χρησιμοποιείται για την άντληση νερού στην πάνω λίμνη ενός υδροηλεκτρικού φράγματος, βλέπε σχήμα 2.8. Στην περίπτωση τώρα χαμηλής αιολικής παραγωγής ή άπνοιας λειτουργεί ο υδροηλεκτρικός σταθμός με την πτώση του αποθηκευμένου ύδατος στον υδροστρόβιλο και παραγωγή του επιθυμητού ποσού ενέργειας. Για την λειτουργία του υδροηλεκτρικού έργου μπορεί να χρησιμοποιηθεί γλυκό (π.χ. βρόχινο) νερό αλλά και νερό θάλασσας (προεπεξεργασμένο), πράγμα που ευνοεί αντίστοιχες εγκαταστάσεις σε νησιά. Ο συντελεστής απόδοσης του αποθηκευτικού αυτού συστημάτων είναι περίπου 70%, εφόσον οι αιολικές και οι υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις βρίσκονται στην ίδια περιοχή, ώστε να αποφεύγονται οι απώλειες μεταφοράς ενέργειας. Βέβαια οι δαπάνες επένδυσης είναι αρκετά υψηλές με αποτέλεσμα να απαιτείτε οικονομικοτεχνική ανάλυση για την αναζήτηση της βελτίωσης λύσεως. Δεν πρέπει τέλος να ξεχνάμε ότι τα συνδυασμένα αιολικά-υδροηλεκτρικά έργα εμφανίζουν τέλεια ρύθμιση του φορτίου, ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν γενικότερα σαν αποθήκες ενέργειας συνεργαζόμενα και με άλλες συμβατικές ή ανανεώσιμες μονάδες παραγωγής ενέργειας. Τέτοια πρόβλεψη υπάρχει για παράδειγμα στο αντλητικό έργο της Σφηκίας, όπου προβλέπεται ετησίως πρόσθετη παραγωγή ενέργειας αυξημένη κατά 394GWh, σε σύγκριση με τις 550GWh απαιτούνται για την άντληση νερού, δίνοντας έτσι ένα συντελεστή απόδοσης ίσο με 0.72.

Συστήματα παραγωγής υδρογόνου

Παράγεται κύρια με ηλεκτρόλυση θαλασσινού νερού, που αποτελεί και πρακτικά ανεξάντλητη πρώτη ύλη. Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε απευθείας σαν καύσιμο αποδίδοντας τριπλάσια ενέργεια (θερμογόνος ικανότητα 27000Kcal/kg) από ίση ποσότητα πετρελαίου, χωρίς μάλιστα να ρυπαίνει το περιβάλλον, είτε για άμεση απόληψη ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ειδικών κυψέλων (fuel cells).

Τα κυριότερα μειονεκτήματα του εν λόγω τρόπου αποθήκευσης είναι η παραγωγή τεράστιων όγκων υδρογόνου, καθώς και οι κίνδυνοι διατήρησης φιαλών πεπιεσμένου υδρογόνου. Από την άλλη πλευρά το υδρογόνο θεωρείται από μερικούς σαν το μελλοντικό καύσιμο του πλανήτη μας, δεδομένης της καθαρότητάς του και της υψηλής θερμογόνου δύναμής του. Με τον τρόπο αυτό μάλιστα αυτό οι ήπιες μορφές ενέργειας θα προμηθεύουν καύσιμα για την προώθηση οχημάτων (αυτοκίνητα, αεροπλάνα κ.λ.π.). Μερικές από τις λύσεις που έχουν προταθεί για την αποθήκευση του υδρογόνου είναι:

α. η υγραποίησή του (με κατανάλωση του 20% περίπου της θερμογόνου ικανότητας της υγραποιημένης ποσότητας),

β. ο σχηματισμός υδρογονούχων ενώσεων (π.χ. αμμωνίας, υδραζίνης) που υγραποιούνται εύκολα, αποθηκεύονται σαν υγρά και ξαναδιασπώνονται όταν χρειάζεται για την παραγωγή υδρογόνου και,

γ. προσρόφηση του υδρογόνου σε διάφορα μέταλλα (σχηματισμός υδριδίων) το οποίο επανεκλύεται με θέρμανση των υβριδίων.

Υδραυλιοπνευματική αποθήκευση ενέργειας μέσω συμπίεσης αερίων

Οι κατασκευές αυτές περιέχουν συμπιεσμένο αέριο, άζωτο ή αέρα και η αποθήκευση ενέργειας γίνεται σε έναν ή περισσότερους υδραυλο-πνευματικούς συσσωρευτές. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατόν να έχουμε αποθήκευση ενέργειας για σχετικά περιορισμένα χρονικά διαστήματα (της τάξεως των 20min) με αποδεκτό κόστος. Βέβαια οι μονάδες αποθήκευσης τύπου αυτού είναι περιορισμένου μεγέθους, πράγμα που απαιτεί την τοποθέτηση αρκετών τέτοιων συσκευών "εν παραλλήλω" για να ικανοποιήσουμε τις ανάγκες μεγαλύτερων συστημάτων. Αρκετά συχνά οι εν λόγω μονάδες αποταμίευσης ενέργειας χρησιμοποιούνται και σε συστήματα συνεργασίας ανεμογεννήτριας και εμβολοφόρων κινητήριων (συστήματα Wind-Diesel).

Αποθήκευση ενέργειας σε σφόνδυλο

Στην περίπτωση αυτή η αποθήκευση της αιολικής ενέργειας γίνεται με τη βοήθεια ενός ή περισσότερων σφονδύλων. Βέβαια μόνο περιορισμένα ποσά ενέργειας μπορούν να αποθηκευτούν με τον τρόπο αυτό, τα οποία μας παρέχουν αυτονομία μερικών μόνο λεπτών, δεδομένου ότι οι σφόνδυλοι με δυνατότητα αποθήκευσης πολλών kWh θα χρειασθούν μεγάλη προσοχή στη σχεδίαση και στην κατασκευή, ώστε να καταστούν αξιόπιστοι για πολλά χρόνια λειτουργίας. Στην περίπτωση αυτή δεν πρέπει να αγνοήσουμε τις απώλειες του ίδιου του σφονδύλου (π.χ. λόγω τριβών με τον περιβάλλοντα αέρα), τις απώλειες των εδράνων και του κιβωτίου ταχυτήτων. Οι πρακτικές εφαρμογές τέτοιων συστημάτων αναφέρονται σε συστήματα Wind-Diesel, όπου η παρουσία του σφονδύλου μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση καύσιμου της τάξεως του 50%, ενώ παράλληλα μειώνεται σημαντικά ο αριθμός εκκινήσεων του κινητήρα Diesel.

Υβριδικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας

Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται συνδυασμοί των παραπάνω αποθηκευτικών μέσων, όπως για παράδειγμα συστήματα συσσωρευτών και σφονδύλου, συσσωρευτών και

συστήματος wind-diesel, σφονδύλου και συστήματος wind-diesel, καθώς και συνδυασμός συσσωρευτών ανεμογεννήτριας και φωτοβολταϊκών στοιχείων. Οι περισσότερες από τις παραπάνω περιπτώσεις λειτουργούν πειραματικά την στιγμή, οι πρώτες όμως εκτιμήσεις δείχνουν ότι είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν για πρακτικέ εφαρμογές αποθηκεύσεις της αιολικής ενέργειας με αρκετά καλά αποτελέσματα.

Συνοψίζοντας, πρέπει να αναφέρουμε ότι η παραγόμενη αιολική ενέργεια στη χώρα μας μπορεί κατά κύριο λόγο να χρησιμοποιηθεί από τη Δ.Ε.Η, καθώς και από ιδιοπαραγωγούς, σύμφωνα με τους πρόσφατους ενεργειακούς νόμους, για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για τη φόρτιση συσσωρευτών και τροφοδοσία πομπών και αναμεταδοτών (π.χ. Ο.Τ.Ε.), είτε για την παροχή ηλεκτρισμού σε απομονωμένους οικισμούς καθώς και για το φωτισμό φάρων. Παράλληλα μπορεί να χρησιμοποιηθεί από ξενοδοχεία ή από ενεργοβόρες – βιομηχανίες - βιοτεχνίες για τη μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικού ρεύματος, καθώς και τη θέρμανση θερμοκηπίων. Τέλος, τυχόν περίσσεια ενέργειας μπορεί να διοχετευτεί σε άντληση νερού ή σε αφαλάτωση θαλασσινού νερού για την κάλυψη των αναγκών των ελληνικών νησιών.

§ 5.5 Παράλληλη Λειτουργία Των Α/Γ Με Το ΣΗΕ

Σύνδεση Α/Γ Στο Δίκτυο

Η γεννήτρια συνδέεται μέσω εύκαμπτων ηλεκτρικών καλωδίων υψηλής αντοχής σε συστροφή με τη βάση του πύργου της Α/Γ όπου βρίσκεται ο πίνακας διακοπών και ασφαλειών. Όταν τα καλώδια συστραφούν πάνω από ένα προκαθορισμένο αριθμό στροφών (π.χ. τρεις στρόφες) το σύστημα ελέγχου της Α/Γ δίνει εντολή στο σύστημα προσανατολισμού για το ξετύλιγμά τους αφού προηγουμένως ακινητοποιηθεί ο δρομέας. Από τον πίνακα αυτό εν συνεχεία αναχωρούν καλώδια προς την κατανάλωση. Στην περίπτωση σύνδεση της Α/Γ σε υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο, μεταξύ της Α/Γ και του δικτύου παρεμβάλλεται μετασχηματιστής ανύψωσης της τάσης. Στα νησιά του Αιγαίου η σύνδεση των Α/Γ γίνεται σε γραμμές Μέσης Τάσης δηλ. με 15 ή 20kV.

Εφόσον η ταχύτητα του άνεμου είναι μεγαλύτερη από 4m/s (συνήθως), ο δρομέας (μετά την απελευθέρωση της πέδης) επιταχύνεται και όταν φτάσει στη ταχύτητα που αντιστοιχεί στη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας, συνδέεται στο δίκτυο.

Επειδή κατά τη σύνδεση ασύγχρονης γεννήτριας στο δίκτυο εμφανίζονται υψηλές εντάσεις ρεύματος (6 φορές μεγαλύτερες από την ονομαστική) με συνεπή την πτώση τάσης στο δίκτυο, γίνεται χρήση ειδικής διατάξεις ημιαγωγικών διακοπών(θυρίστορ), που περιορίζει το ρεύμα σε επίπεδα κάτω από 20% τις ονομαστικής του τιμής.

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή του κεφαλαίου η σύνδεση και παράλληλη λειτουργία των Α/Γ στα δίκτυα των Συστημάτων Ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ), μπορεί να έχει δυσμενείς επιπτώσεις στους καταναλωτές τους, δηλαδή στην σταθερότητα και συνέχεια της τάσεως τροφοδοτήσεως. Επίσης μπορεί να έχει επιπτώσεις στην ασφάλεια των καταναλωτών και του προσωπικού εκμεταλλεύσεως που εργάζεται στα δίκτυα.

Για το λόγο αυτό διεθνώς το θέμα αποτελεί αντικείμενο μελέτης με στόχο την έκδοση κανονισμών που θα καθορίζουν τις προϋποθέσεις υπό τις οποίες είναι επιτρεπτή η σύνδεση των μονάδων αυτών. Παράλληλα επιδιώκεται η ομαλή λειτουργία τους οι κατασκευαστές των Α/Γ ώστε να επιτυγχάνεται η ομαλή λειτουργία τους σε παράλληλη σύνδεση με το δίκτυο. Η ανάλυση των προβλημάτων αυτών αποτελεί την απαραίτητη προϋπόθεση για τη διάδοση των Α/Γ.

Στην παράγραφο αυτή τα προβλήματα που δημιουργεί η σύνδεση των Α/Γ στα δίκτυα Διανομής και η μεθοδολογία με την οποία μπορεί να γίνει η εξέτασή τους. Τονίζεται ότι τα αναφερόμενα αφορούν τα προβλήματα που δημιουργεί η σύνδεση των Α/Γ στα τοπικά δίκτυα Διανομής, ΧΤ (Χαμηλής Τάσεως) ή ΜΤ (Μέσης Τάσεως). Εάν η συνολική ισχύς των εγκατεστημένων Α/Γ μπορεί να επηρεάσει την λειτουργία των Σταθμών Παραγωγής από τους οποίους τροφοδοτούνται τα δίκτυα Διανομής, είναι αναγκαία μια πρόσθετη ανάλυση του θέματος, η οποία και γίνεται στην επόμενη παράγραφο 4.

Οι διαταραχές που προκαλεί η παράλληλη λειτουργία των Α/Γ στο δίκτυο, μπορούν να διακριθούν σε δυο κατηγορίες:

1. Σ' εκείνες που συμβαίνουν κατά την κανονική λειτουργία και οποίες συνίσταται βασικά σε διαταραχές της τάσεως του δικτύου. Οι διαταραχές αυτές, μπορεί να προέρχονται:

α) Από την μεταβολή που προκαλείται στην ροή των φορτίων του δικτύου, όταν οι Α/Γ τίθεται σε λειτουργία. (Αργές μεταβολές των τάσεων).

β) Από την ζεύξη-απόζευξη των Α/Γ (Απότομες μεταβολές-«βυθίσεις»-της τάσεως) καθώς και λόγω των συνεχών μεταβολών της παραγόμενης ισχύος, που οφείλεται στην αστάθεια του άνεμου. (Συνεχείς διακυμάνσεις της τάσεως).

γ) Από την παραμόρφωση της τάσεως λόγω αρμονικών.

2. Σ' εκείνες που συμβαίνουν κατά την διάρκεια ανωμαλιών (βραχυκυκλωμάτων) του δικτύου, οπότε μπορεί να προκαλούνται:

α) Ανωμαλίες στην ορθή λειτουργία των προστασιών του δικτύου Διανομής, οι οποίες γενικά έχουν επιλέγει με την προϋπόθεση της "ακτινικής" λειτουργίας του δικτύου θα τροφοδοτούνται και από τις Α/Γ.

β) Την προσθετή καταπόνηση στοιχείων του δικτύου, δεδομένου ότι τα βραχυκυκλώματα του δικτύου θα τροφοδοτούνται και από τις Α/Γ.

γ) Την πρόκληση ανωμαλιών σε περίπτωση «απομονωμένης λειτουργίας». Η κατάσταση αυτή προκύπτει στην περίπτωση κατά την οποία ένα τμήμα του δικτύου Διανομής απομονώνεται από την κύρια τροφοδότηση του και παραμένει τροφοδοτούμενο από τις Α/Γ με τάση και συχνότητα που μπορεί να απέχουν σημαντικά από τις ονομαστικές τους τιμές. Αυτό μπορεί να έχει ως συνέπεια το να προκληθούν ανωμαλίες σε καταναλωτές του δικτύου ή ακόμη και ατυχήματα στο προσωπικό της Ηλ. Επιχείρησης που επέμβει για την αποκατάσταση της ανωμαλίας.

§5.6 Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ηλεκτρικό δίκτυο

Η σύνδεση και παράλληλη λειτουργία των Α\Γ στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ), μπορεί να έχει δυσμενείς επιπτώσεις στους καταναλωτές τους, δηλαδή στην σταθερότητα και τη συνέχεια της τάσεως τροφοδότησης. Επίσης μπορεί να έχει επιπτώσεις στην ασφάλεια των καταναλωτών και του προσωπικού που εργάζεται στο δίκτυο.

Για το λόγο αυτό διεθνώς το θέμα αποτελεί αντικείμενο μελέτης με στόχο την έκδοση κανονισμών που θα καθορίζουν τις προϋποθέσεις υπό τις οποίες είναι επιτρεπτή η σύνδεση των μονάδων αυτών. Παράλληλα επιδιώκεται και από τους κατασκευαστές των Α\Γ να επιτυγχάνεται η ομαλή λειτουργία τους σε παράλληλη σύνδεση με το δίκτυο.

Η λειτουργία ενός ηλεκτρικού δικτύου ελέγχεται από συσκευές προστασίας και ρύθμισης της τάσης, που έχουν σκοπό την παροχή προς τους καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας αποδεκτής ποιότητας, ελαχιστοποιώντας τον αριθμό των σφαλμάτων και προσφέροντας υψηλό επίπεδο ασφάλειας.

Η σύνδεση στο δίκτυο μονάδων παραγωγής πρέπει να συμβαδίζει με αυτές τις γενικές αρχές, ώστε αφενός μεν να μην προκαλούνται ενοχλήσεις στους λοιπούς καταναλωτές και αφετέρου να υπάρχει συμβατότητα μεταξύ του δικτύου διανομής και των εγκαταστάσεων των παραγωγών.

Η επιλογή του τρόπου σύνδεσης ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με Α/Γ στο δίκτυο αποτελεί αντικείμενο τεχνικοοικονομικής εξέτασης, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος κεφαλαίου των έργων ενίσχυσης και επέκτασης του δικτύου και αφετέρου τις απώλειες ενέργειας κάθε τρόπου διασύνδεσης καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης, αλλά και άλλους παράγοντες (χρόνος και δυνατότητα κατασκευής των έργων, χρηματοδότησή τους κλπ.). Στον ακόλουθο πίνακα δίνεται, ενδεικτικά και μόνο, ο πιθανός (ή προτιμητέος) τρόπος διασύνδεσης, ανάλογα με την ισχύ του σταθμού.

Ενδεικτική συμφωνημένη ισχύς (MW)	Πιθανός τρόπος σύνδεσης στο δίκτυο
Έως 0.1	Δίκτυο ΧΤ
Έως 4	Δίκτυο ΜΤ, σε υφιστάμενη γραμμή (με πιθανή ενίσχυσή της)
Έως 6	Δίκτυο ΜΤ, μέσω αποκλειστικής γραμμής απλού κυκλώματος
Έως 20	Δίκτυο ΜΤ, μέσω αποκλειστικής γραμμής διπλού κυκλώματος
Άνω των 20	Δίκτυο ΥΤ, με κατασκευη ιδιαίτερου Υ/Σ ανύψωσης ΥΤ/ΜΤ

Πίν. 5.4 Τρόπος σύνδεσης Α/Π στο δίκτυο ανάλογα με την ισχύ του

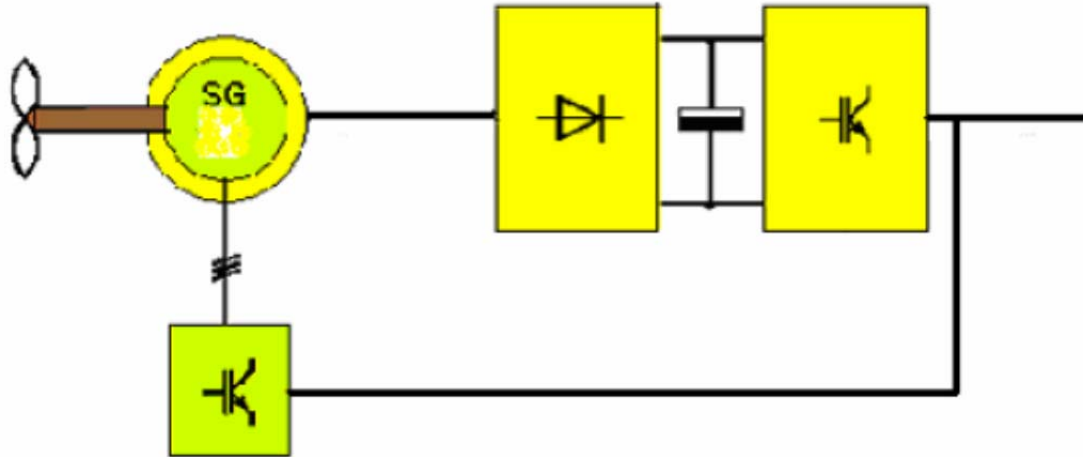
Η σύνδεση των παραγωγών στο δίκτυο μέσης τάσης (ΜΤ) ή χαμηλής τάσης (ΧΤ) έχει ως κοινό στόχο την διασφάλιση της ομαλής συνεργασίας των εγκαταστάσεων με το δίκτυο, την ασφάλεια προσώπων και εγκαταστάσεων και την εξασφάλιση αποδεκτής ποιότητας ισχύος. Βασικά κριτήρια και προϋποθέσεις που εξετάζονται προκειμένου να επιτραπεί η σύνδεση νέων εγκαταστάσεων παραγωγής είναι τα ακόλουθα:

- Επάρκεια δικτύου (γραμμών, μετασχηματιστών κλπ.)
- Συμβολή στη στάθμη βραχυκύκλωσης
- Αργές μεταβολές της τάσης (μόνιμης κατάστασης)
- Ταχείες μεταβολές της τάσης
- Εκπομπές flicker
- Εκπομπές αρμονικών
- Διαμόρφωση των προστασιών της διασύνδεσης εγκαταστάσεων-δικτύου
- Επίπτωση στη λειτουργία συστημάτων Τηλεχειρισμού Ακουστικής Συχνότητας (ΤΑΣ)

Οι διαταραχές που προκαλεί η παράλληλη λειτουργία των Α\Γ στο δίκτυο , μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες :

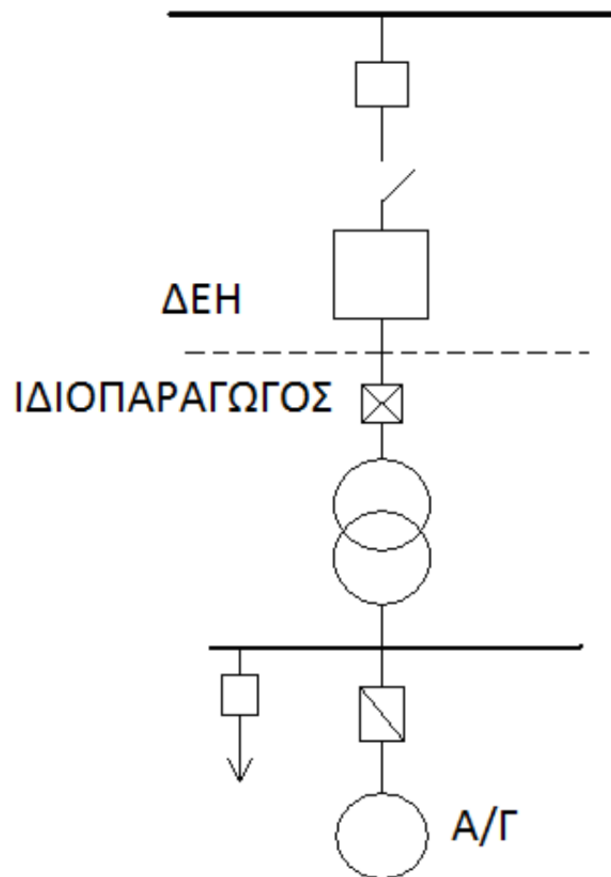
- Σ' εκείνες που συμβαίνουν στην κανονική λειτουργία και οι οποίες συνίστανται βασικά σε διαταραχές της τάσεως του δικτύου. Οι διαταραχές αυτές, μπορεί να προέρχονται:
 - από τη μεταβολή που προκαλείται στη ροή των φορτίων του δικτύου, όταν οι Α\Γ τίθενται σε λειτουργία. (αργές μεταβολές τάσεως),
 - από τη ζεύξη - απόζευξη των Α\Γ (απότομες μεταβολές - 'βυθίσεις' της τάσεως) καθώς και από τις συνεχείς μεταβολές της παραγόμενης ισχύος , που οφείλονται στην αστάθεια του ανέμου (συνεχείς διακυμάνσεις τάσεως),
 - από την παραμόρφωση της τάσεως λόγω αρμονικών.
- Σ' εκείνες που συμβαίνουν κατά την διάρκεια ανωμαλιών (βραχυκυκλωμάτων) του δικτύου, οπότε μπορεί να προκαλούνται :
 - ανωμαλίες στην ορθή λειτουργία των προστασιών του δικτύου διανομής, οι οποίες γενικά έχουν επιλεγεί με την προϋπόθεση της ακτινικής λειτουργίας του δικτύου.
 - πρόσθετη καταπόνηση στοιχείων του δικτύου, δεδομένου ότι τα βραχυκυκλώματα του δικτύου θα τροφοδοτούνται και από τις Α\Γ.

Δύο από τους τρόπους διασύνδεσης αιολικών πάρκων με το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι είτε μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος είτε κατευθείαν. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η πρώτη περίπτωση. Οι ανεμογεννήτριες έχουν το χαρακτηριστικό ότι είναι απευθείας οδηγούμενες από τον ανεμοκινητήρα. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές της Α/Γ, η τάση στην οποία λειτουργεί η μηχανή είναι η ονομαστική (400V) εφόσον ο δρομέας (Α/Κ) περιστρέφεται μέσα στην περιοχή επιτρεπτών ταχυτήτων του και το μόνο μέγεθος που μεταβάλλεται είναι η συχνότητα της γεννήτριας, η οποία είναι διαφορετική από 50Hz. Η ταχύτητα περιστροφής του ανεμοκινητήρα εξαρτάται από την ταχύτητα του αέρα. Συνεπώς για να υπάρχει σύνδεση με το δίκτυο είναι απαραίτητη η ύπαρξη διπλής γέφυρας με ηλεκτρονικά ισχύος, ο λεγόμενος ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος. Ο τελευταίος αναλαμβάνει το ρόλο του συγχρονισμού της σύγχρονης μηχανής με το ισχυρό δίκτυο αφού φροντίζει να οδηγεί στην έξοδο την τάση της σύγχρονης γεννήτριας και να μετατρέπει τη συχνότητά της σε 50Hz που είναι η ονομαστική τιμή. Όσον αφορά την εκκίνηση της σύγχρονης μηχανής, αυτή γίνεται με τη βοήθεια του ανέμου ο οποίος έχει το ρόλο της κινητήριας δύναμης. Εφόσον η ταχύτητα του ανέμου είναι κατάλληλη, δηλαδή ίση με την ταχύτητα σύζευξης, τότε ο ανεμοκινητήρας αρχίζει να περιστρέφεται.



Σχ. 5.7 Σύνδεση Α/Π με το δίκτυο μεταφοράς ΗΕ μέσω ηλεκτρονικών ισχύος

Όσον αφορά την σύνδεση του αιολικού πάρκου στο δίκτυο μπορούν οι Α/Γ να συνδέονται προς το δίκτυο ΜΤ μέσω Μ/Σ ανύψωσης ανά μία ή ανά ομάδες Α\Γ. Στην περίπτωση μας επειδή έχουμε Α/Γ μεγάλης ισχύος, το αιολικό πάρκο συνδέεται στο δίκτυο ΜΤ μέσω Μ/Σ ανυψώσεως κατά ομάδες, ιδιοκτησίας του ιδιοπαραγωγού.



Σχ. 5.8 Σύνδεση Α/Π στο δίκτυο μέσω Μ/Σ ανύψωσης



Σχ. 5.9 Διαδρομή ενέργειας από τα Α/Π στο δίκτυο της Δ.Ε.Η.

Οι ενέργειες που αντιστοιχούν στους αριθμούς του παραπάνω σχήματος είναι οι εξής:

1. Ο άνεμος φυσάει προς τα πτερύγια και κάνει το στροφείο να κινείται.
2. Η κίνηση μεταφέρει την ενέργεια στο κιβώτιο
3. Το κιβώτιο είναι εφοδιασμένο με σύστημα μετάδοσης που προσαρμόζει την ταχύτητα δρομέα σύμφωνα με τις απαιτήσεις του.
4. Η γεννήτρια μετατρέπει την περιστροφική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια με τη βοήθεια των μαγνητικών πεδίων
5. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από την γεννήτρια περνά σε ένα μετασχηματιστή που μετατρέπει τη χαμηλή τάση που παράγεται σε υψηλότερη κατάλληλα για το δίκτυο.

§5.7 Προσομοίωση συστήματος σύνδεσης με το δίκτυο

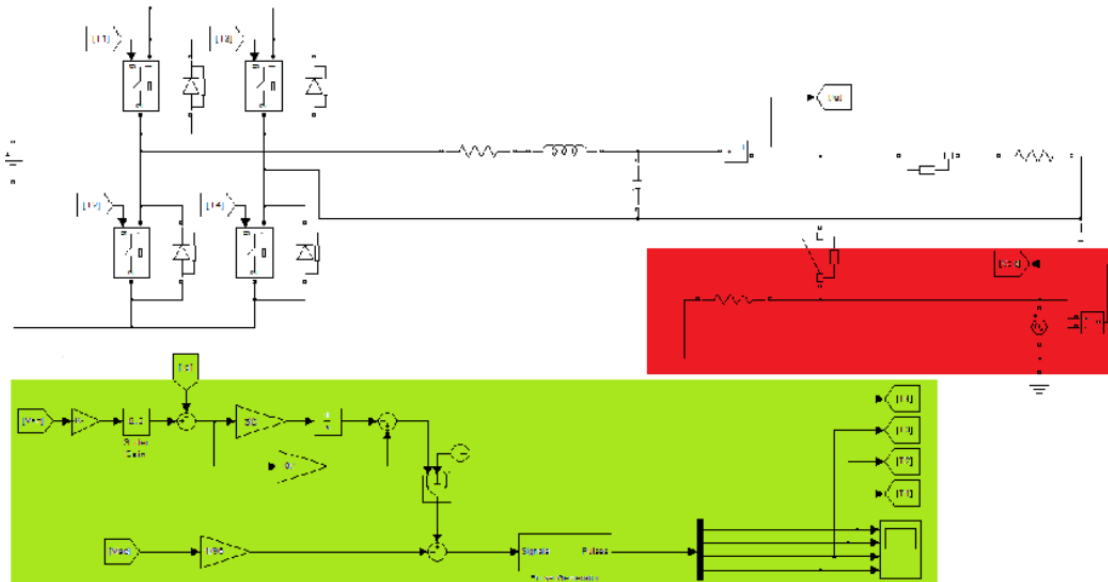
§5.7.1. Προσομοίωση σύνδεσης μονοφασικού αντιστροφέα με το δίκτυο (χωρίς Μ/Σ)

Αφού διαπιστώνεται η ορθή προσομοίωση και λειτουργία του μονοφασικού αντιστροφέα (με διαμόρφωση SPWM με μονοπολική τάση εξόδου), μπορούμε να προχωρήσουμε στην υλοποίηση της σύνδεσης με το δίκτυο. Αρχικά για λόγους απλότητας δεν θα τοποθετήσουμε τον Μ/Σ 1:4. Έτσι θα θεωρήσουμε ότι το δίκτυο χαμηλής τάσης προσομοιώνεται με μία μονοφασική πηγή τάσης με ενεργό τιμή 68V, συχνότητας 50Hz και τυχαίας αρχικής φάσης, στην οποία είναι συνδεδεμένο ένα μονοφασικό ωμικό φορτίο 1, το οποίο απορροφά μόνιμως ενεργό ισχύ 700W. Το αντίστοιχο block διάγραμμα φαίνεται στο σχήμα 5.10, όπου διακρίνονται εκτός από το μετατροπέα, το δίκτυο χαμηλής τάσης (κόκκινο τμήμα) και η διαδικασία παραγωγής των παλμών (πράσινο τμήμα).

Αρχικά, πριν τη σύνδεση με το δίκτυο, ο αντιστροφέας λειτουργεί έχοντας συνδεδεμένο το μονοφασικό φορτίο στην έξοδό του. Οι παλμοί έναυσης κάθε ημιαγωγικού στοιχείου χρησιμοποιούν την τάση του δικτύου κατάλληλα υποβιβασμένη ως τάση αναφοράς. Με αυτόν τον τρόπο πετυχαίνουμε την τάση εξόδου του αντιστροφέα να είναι συμφασική με αυτή του δικτύου. Επίσης, επιλέγεται και ο κατάλληλος συντελεστής διαμόρφωσης ($m_a=0.8$), έτσι ώστε η τάση εξόδου να έχει και το ίδιο μέτρο με την τάση του δικτύου.

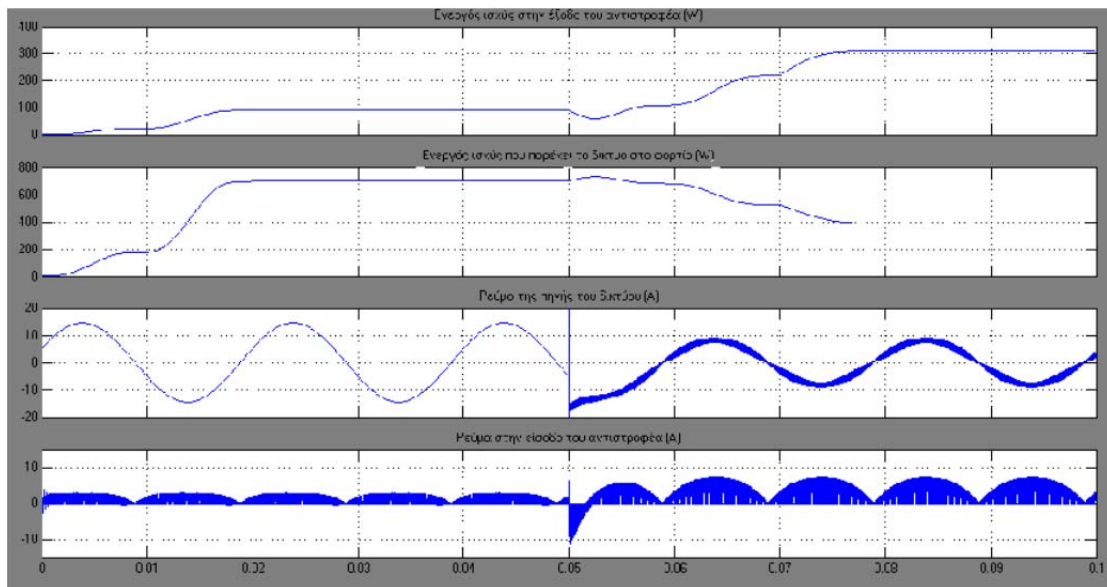
Για τον έλεγχο της σύνδεσης με το δίκτυο θα χρησιμοποιηθεί ένας βρόχος ελέγχου του ρεύματος που συνοπτικά λειτουργεί ως εξής: το ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα συγκρίνεται με ένα ρεύμα αναφοράς που προκύπτει από τον κατάλληλο υποβιβασμό της τάσης του δικτύου, ώστε να είναι συμφασικό με αυτή και έτσι να δίνουμε μόνο ενεργό ισχύ στο δίκτυο. Το αποτέλεσμα της σύγκρισης περνάει μέσα από έναν PI ελεγκτή, η έξοδος του οποίου προστίθεται στο προϋπάρχον σήμα (Αντί για απλό ωμικό θα μπορούσε να είχε χρησιμοποιηθεί και ωμικό-επαγωγικό φορτίο. Εξάλλου, ο αντιστροφέας θα σχεδιασθεί, ώστε να παρέχει μόνο ενεργό ισχύ στο δίκτυο, ενώ όλη η άεργος ισχύς που χρειάζεται το φορτίο θα παρέχεται από τη μονοφασική πηγή.) ελέγχου του ανοιχτού βρόχου (που συγκρίνεται με το υψίσυχο τρίγωνο για την παραγωγή των παλμών). Τα κέρδη K_P και K_I του βρόχου u949 ελέγχου του ρεύματος καθορίζονται ύστερα από ανάλυση του συστήματος ελέγχου ρεύματος στο πεδίο του Laplace (ακολουθεί σχετική ανάλυση σε επόμενη ενότητα).

Στο σχήμα 5.10 απεικονίζεται επίσης, ο κλειστός βρόχος ελέγχου του ρεύματος (πράσινο τμήμα). Η επιθυμητή τιμή του ρεύματος διασύνδεσης καθορίζεται μέσω της αναφοράς ρεύματος του PI βρόχου ελέγχου (slider gain).



Σχήμα 5.10 Block διάγραμμα του αντιστροφέα μαζί με το βρόχο ελέγχου του (χωρίς Μ/Σ).

Στη συνέχεια, στο σχήμα 5.11 παρατίθενται οι κυματομορφές που προκύπτουν από την προσομοίωση του παραπάνω συστήματος. Στις πρώτες τρεις κυματομορφές φαίνονται η τάση του δικτύου, η τάση εξόδου του αντιστροφέα πριν το φίλτρο και η τάση εξόδου του αντιστροφέα μετά το φίλτρο αντίστοιχα. Η αντίσταση στην έξοδο του αντιστροφέα πριν τη σύνδεση με το δίκτυο είναι 50Ω , ενώ το ρεύμα σύνδεσης καθορίζεται να έχει μέγιστη τιμή $6.5A$. Η σύνδεση, όπως άλλωστε φαίνεται και στα διαγράμματα του σχήματος 5.11, πραγματοποιείται τη χρονική στιγμή $t=0.05sec$, οπότε και ανοίγει ο διακόπτης του μονοφασικού φορτίου με ταυτόχρονο κλείσιμο του διακόπτη που διασυνδέει τον αντιστροφέα με το δίκτυο.

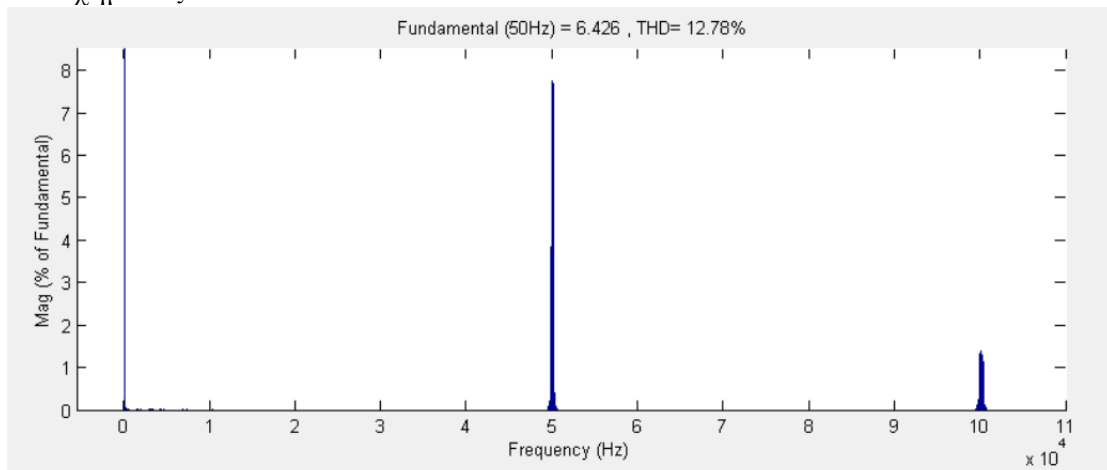


Σχήμα 5.11 Κυματομορφές προσομοίωσης του αντιστροφέα με το βρόχο ελέγχου του (χωρίς M/Σ).

Πριν το ανοιγοκλείσιμο των διακοπών, το ρεύμα στην έξοδο του αντιστροφέα έχει μέγιστη τιμή (τέταρτη κυματομορφή σχ. 5.11), ενώ μετά τη σύνδεση έχει την αναμενόμενη μέγιστη τιμή των 6.5A. Παρατηρούμε βέβαια και κάποιες ανώτερες αρμονικές στο ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα, τις οποίες δεν κατάφερε να απορροφήσει το LC φίλτρο. Αυτό φαίνεται και από το φάσμα του ρεύματος εξόδου που φαίνεται στο σχήμα 5.12. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν και τα διαγράμματα της ενεργού ισχύος που προσφέρεται στο φορτίο αφενός από τον αντιστροφέα και αφετέρου από την μονοφασική πηγή (πέμπτη και έκτη κυματομορφή σχ. 5.11 αντίστοιχα).

Στα ίδια διαγράμματα φαίνεται επίσης και η διάρκεια του μεταβατικού φαινομένου η οποία είναι 0.025 sec. Πριν από τη σύνδεση, όλη η ισχύς του φορτίου (700W) παρέχεται από την πηγή, ενώ ο αντιστροφέας τροφοδοτεί αποκλειστικά το προσωρινό φορτίο που είναι συνδεδεμένο στα άκρα του, με ενεργό ισχύ $682/50=92.48W$. Μετά τη σύνδεση του αντιστροφέα με το δίκτυο, η ενεργός ισχύς που παρέχεται από αυτόν είναι μικρότερη.

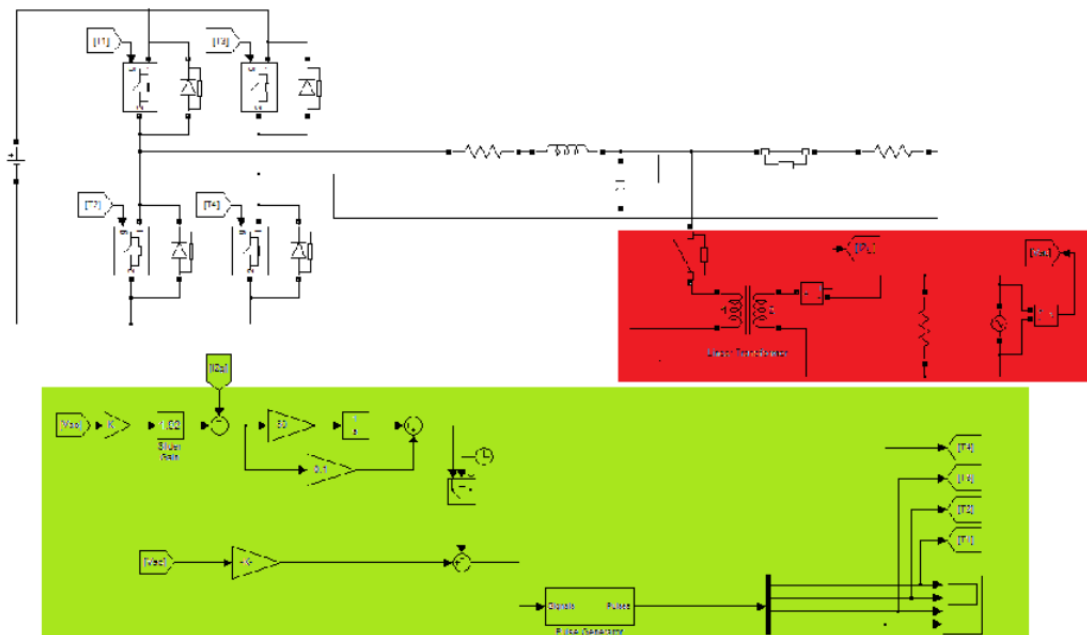
Στο προτελευταίο από τα διαγράμματα του σχήματος 5.11 δίνεται το ρεύμα που παρέχει η πηγή, το οποίο μετά τη σύνδεση με το δίκτυο αφενός μειώνεται, αφετέρου όμως, αποκτά κάποιες ανεπιθύμητες ανώτερες αρμονικές. Τέλος, το ρεύμα στην είσοδο του αντιστροφέα έχει την αναμενόμενη τιμή και κυματομορφή, όπως φαίνεται και στο τελευταίο διάγραμμα του σχήματος 5.11.



Σχήμα 5.12 Φάσμα ρεύματος στην έξοδο του αντιστροφέα μετά τη σύνδεση.

§5.7.2 Προσομοίωση σύνδεσης μονοφασικού αντιστροφέα με το δίκτυο (με Μ/Σ)

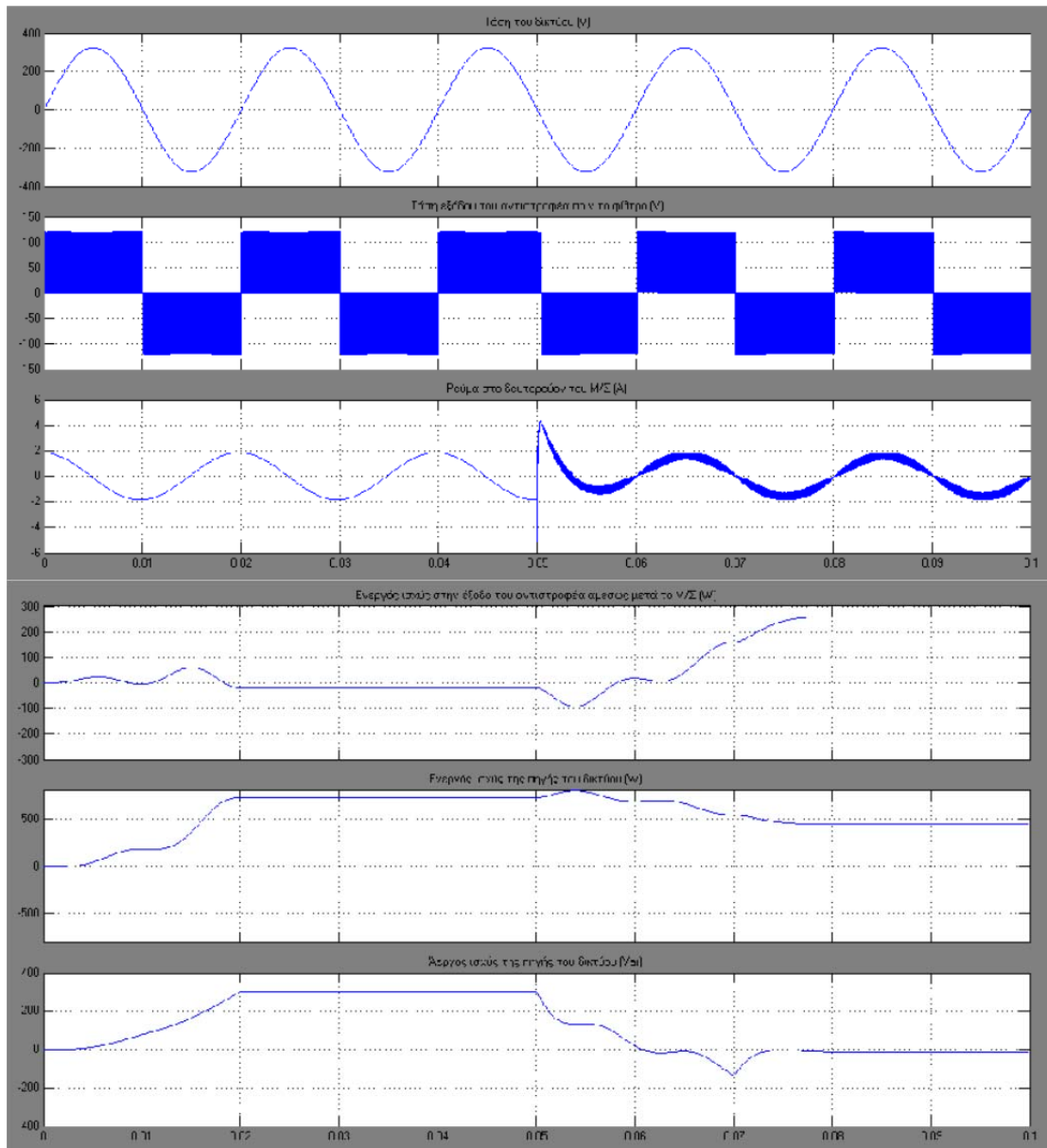
Τώρα τοποθετούμε τον Μ/Σ 1:4, προκειμένου να πετύχουμε την τάση των 230V του δικτύου χαμηλής τάσης. Πάλι θεωρούμε ότι το δίκτυο χαμηλής τάσης προσομοιώνεται με μία μονοφασική πηγή τάσης με ενεργό τιμή όμως 230V, συχνότητας 50Hz και τυχαίας αρχικής φάσης, στην οποία είναι συνδεδεμένο ένα μονοφασικό ωμικό φορτίο, το οποίο απορροφά μονίμως ενεργό ισχύ 700W. Το αντίστοιχο block διάγραμμα φαίνεται στο σχήμα 5.13, όπου και φαίνεται ότι είναι όμοιο με αυτό του σχήματος 5.10, με τη βασική διαφορά ότι τώρα ως ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα θεωρείται το ρεύμα στο δευτερεύον του Μ/Σ. Αντίστοιχα το συγκεκριμένο ρεύμα, συγκρίνεται με ένα ρεύμα αναφοράς που προκύπτει από τον κατάλληλο υποβιβασμό της τάσης του δικτύου.



Σχήμα 5.13 Block διάγραμμα του αντιστροφέα μαζί με το βρόχο ελέγχου του (με Μ/Σ).

Στη συνέχεια, παρατίθενται οι κυματομορφές (σχήμα 5.13) που προκύπτουν από την προσομοίωση του παραπάνω συστήματος. Η αντίσταση στην έξοδο του αντιστροφέα πριν τη σύνδεση με το δίκτυο παραμένει και πάλι 50Ω, ενώ το ρεύμα σύνδεσης καθορίζεται να έχει μέγιστη τιμή 1.92A (στο δευτερεύον του Μ/Σ) έτσι ώστε η παρεχόμενη ενεργός ισχύς να είναι η ίδια με την προηγούμενη ενότητα (δηλαδή 312.5W).

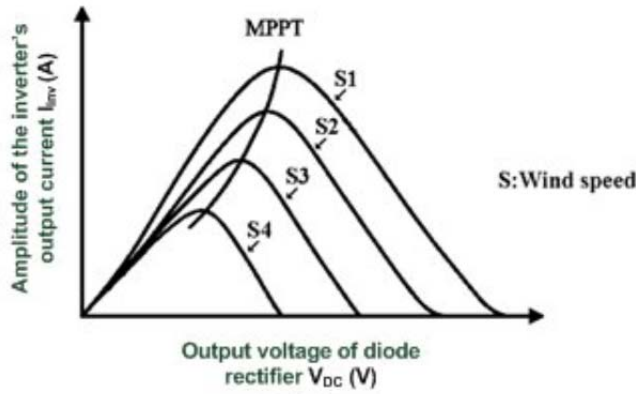
Σε αυτήν την προσομοίωση, ενδιαφέρον παρουσιάζει το τρίτο διάγραμμα του σχήματος 5.14 που αναπαριστά το ρεύμα στο δευτερεύον του Μ/Σ. Παρατηρούμε ότι μετά από ένα react στα 4A το ρεύμα στο δευτερεύον του Μ/Σ λαμβάνει την τιμή που ορίζει το ρεύμα αναφοράς του κλειστού βρόχου (1.92A). Από το τέταρτο διάγραμμα του σχήματος 5.14 παρατηρούμε ότι ο αντιστροφέας πριν τη σύνδεση με το δίκτυο δεν προσφέρει καθόλου ενεργό ισχύ σε αυτό, ενώ έπειτα προσφέρει ενεργό ισχύ μικρότερη της θεωρητικής (312.5W). Επίσης ενδιαφέρον παρουσιάζει και το διάγραμμα της άεργου ισχύος της πηγής του δικτύου που αποτελεί το τελευταίο από τα διαγράμματα του σχήματος 5.14, καθώς πριν τη διασύνδεση, άεργος ισχύς 300Var προσφέρεται από το δίκτυο στις επαγωγές του ισοδύναμου κυκλώματος του Μ/Σ.



Σχήμα 5.14 Κυματομορφές προσομοίωσης του αντιστροφέα με το βρόχο ελέγχου του (με M/Σ).

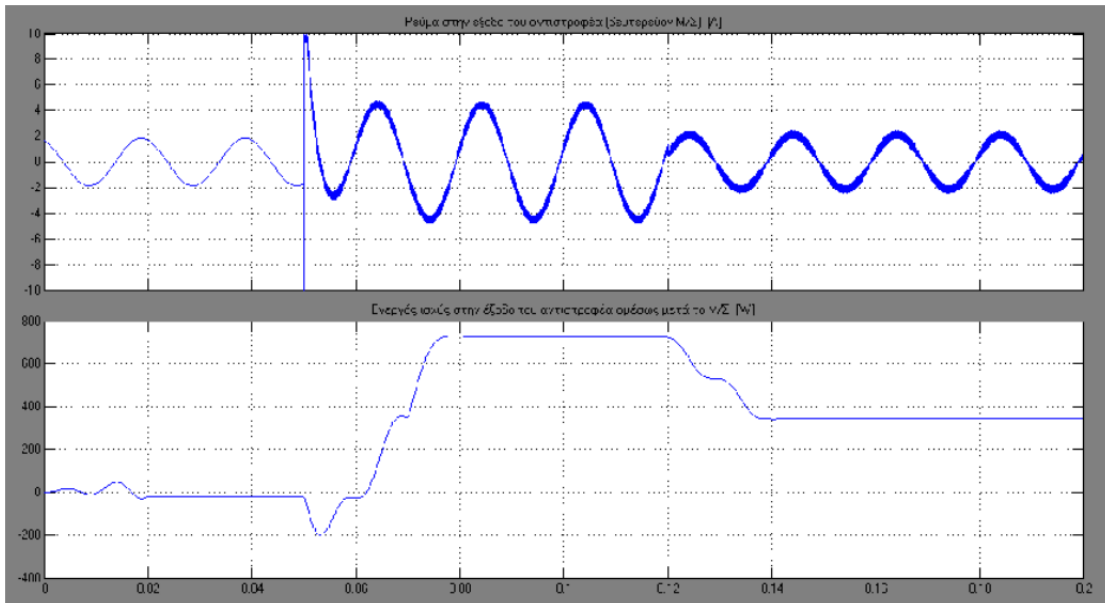
§5.8 Συμπεριφορά του συστήματος σε μεταβολή της αναφοράς του ρεύματος

Η μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος σε μεταβολή του ρεύματος αναφοράς βρίσκει εφαρμογές σε συστήματα που χρησιμοποιούν ανιχνευτή σημείου μέγιστης ισχύος. Ο ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracker, MPPT) είναι μια τοπολογία που επεξεργάζεται το ρεύμα και την τάση εξόδου της ανεμογεννήτριας, ώστε σε κάθε χρονική στιγμή να απορροφάμε τη μέγιστη δυνατή ισχύ από τον άνεμο. Ξεκινώντας από την τυπική μορφή των καμπυλών της αεροδυναμικής ισχύος του στάτη της ανεμογεννήτριας PWM συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα Ω_{WM} και κάνοντας κάποιες παραδοχές, καταλήγουμε στις καμπύλες του σχήματος 5.15.



Σχήμα 5.15 Προκύπτουσα μορφή των καμπυλών της μέγιστης τιμής του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα συναρτήσει της τάσης εξόδου του ανορθωτή.

Στόχος μας είναι παρακολουθώντας της μεταβολές της τάσης εξόδου του ανορθωτή διόδων VDC να μεταβάλλουμε κατάλληλα τη μέγιστη τιμή του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα, έτσι ώστε το σημείο λειτουργίας να βρίσκεται πάντοτε στην κορυφή των αντίστοιχων καμπυλών, ή διαφορετικά να βρίσκεται πάνω στην καμπύλη μέγιστης απόδοσης (MPPT). Την μεταβολή αυτή του ρεύματος, ουσιαστικά την πετυχαίνουμε με το βρόχο ελέγχου του ρεύματος, όπου μεταβάλλεται η τιμή του ρεύματος αναφοράς. Παρακάτω υποθέτοντας ένα σενάριο, κατά το οποίο ο MPPT ορίζει δυο διαφορετικές τιμές ρευμάτων αναφοράς, 5A και 2.5A, θα προσομοιωθεί το σύστημα διασύνδεσης του αντιστροφέα με το δίκτυο, προκειμένου να δούμε πως αυτό ανταποκρίνεται στις συγκεκριμένες μεταβολές.



Σχήμα 5.16 Κυματομορφές προσομοίωσης του αντιστροφέα με χρήση MPPT.

Στο σχήμα 5.16 παριστάνονται τα αποτελέσματα της παραπάνω προσομοίωσης. Παρατηρούμε ότι, αμέσως μετά τη σύνδεση με το δίκτυο το ρεύμα στο δευτερεύον έχει την αναμενόμενη μέγιστη τιμή των 5A, η οποία τη χρονική στιγμή $t=0.12$ μειώνεται στα 2.5A, όπως προστάζει ο MPPT. Αποτέλεσμα αυτού, είναι η μείωση της προσφερόμενης από τον αντιστροφέα ενεργού ισχύος (σχήμα 5.16) μιας και η τάση στην έξοδό του παραμένει σταθερή. Μια άλλη παρατήρηση που μπορεί να γίνει, είναι ότι η δεύτερη μεταβολή του ρεύματος είναι πιο ομαλή σε σχέση με την πρώτη καθώς το peak του ρεύματος είναι πολύ μικρότερο και το μεταβατικό φαινόμενο διαρκεί λιγότερο.

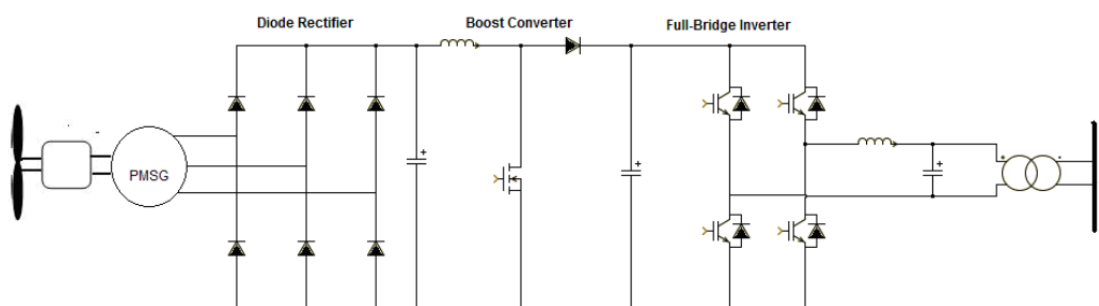
§5.9 Σχεδίαση και ανάλυση του βρόχου ελέγχου του ρεύματος στο πεδίο του LAPLACE

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο PI ελεγκτής δέχεται ως είσοδο τη διαφορά του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα I_g από ένα ρεύμα αναφοράς I_a που προκύπτει από τον κατάλληλο υποβιβασμό της τάσης του δικτύου. Έπειτα η έξοδος του PI ελεγκτή προστίθεται στο προϋπάρχον σήμα ελέγχου του ανοιχτού βρόχου V_a , το άθροισμα των οποίων συγκρίνεται με το υψίσυχο τρίγωνο για την παραγωγή των παλμών.

Τέλος, παρεμβάλλεται ένα LC φίλτρο προκειμένου το ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα να καταστεί ημιτονοειδές. Τα παραπάνω παρουσιάζονται πιο παραστατικά με τη βοήθεια του λειτουργικού διαγράμματος του σχήματος 5.16, όπου απεικονίζονται οι συναρτήσεις μεταφοράς (Σ.Μ.) των διάφορων υποσυστημάτων καθώς και ο τρόπος σύνδεσής τους στο πεδίο του Laplace.

§5.10 Προτεινόμενο σύστημα μεταβλητών στροφών-σταθερής συχνότητας για τη σύνδεση ανεμογεννήτριας με το δίκτυο

Το αιολικό σύστημα που επιλέγεται να μελετηθεί απεικονίζεται στο σχήμα 5.17 και περιέχει σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών, η οποία παρότι αυξάνει το κόστος της κατασκευής έχει το πλεονέκτημα της παραγωγής άεργου ισχύος, προϋπόθεση απαραίτητη σε πολλές εφαρμογές και έτσι δεν χρειάζεται πυκνωτές αυτοδιέγερσης στα άκρα της.



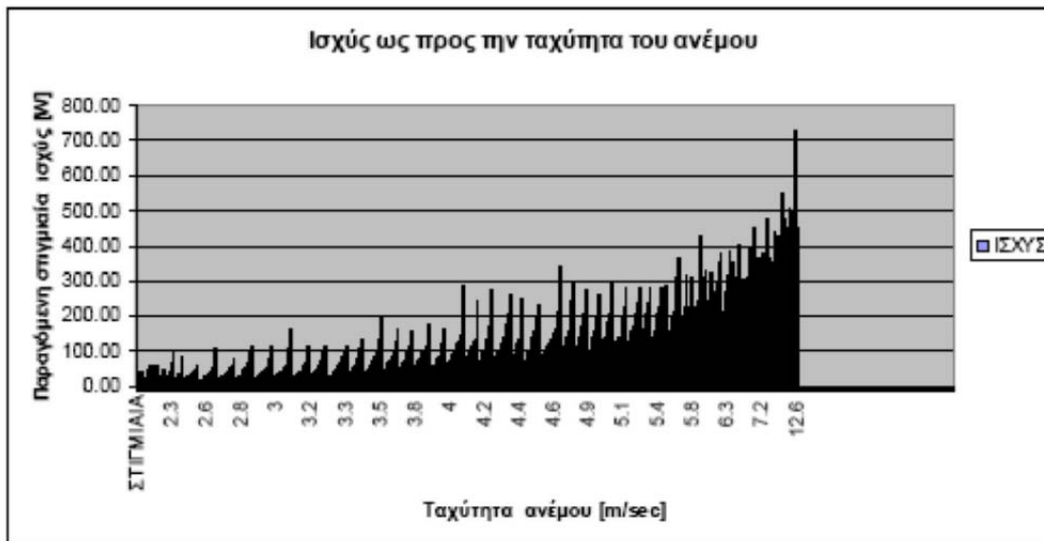
Σχήμα 5.17 Το υπό διερεύνηση αιολικό σύστημα ΜΣΣΣ με σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων Μαγνητών

Τα βασικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Maximum Power	1000W
Rated power	840W
V peak	75V
Cut in wind	3.1m/s
Peak Power wind	13.5m/s

Πρόκειται για ανεμογεννήτρια Whisper 200 της εταιρίας SouthWest Windpower, αμερικάνικης κατασκευής και ισχύος 1kW. Στο Σχήμα 5.18 παρουσιάζεται η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας ως προς τον άνεμο όπου, όπως διακρίνεται, η ανεμογεννήτρια

λειτουργεί στην μέγιστη ισχύ για ταχύτητα ανέμου 13.5m/s. Η μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να αντέξει είναι 5.5m/s και οι τάσεις που παράγει στην έξοδο της είναι 24,36 και 48 VDC.



Σχήμα 5.18 Πραγματική καμπύλη ισχύος που παίρνουμε ως προς τον άνεμο από την Α/Γ που έχουμε στην οροφή του εργοστασίου

Στο σχήμα 5.18 φαίνεται η πραγματική χαρακτηριστική ισχύς της ανεμογεννήτριας σύμφωνα με μετρήσεις. Η ανόρθωση πραγματοποιείται με τον μη ελεγχόμενο ανορθωτή διόδων. Στην έξοδο του υπάρχει ένας πυκνωτής προκειμένου να διατηρεί την τάση κατάλληλα ανορθωμένη και σταθερή στην είσοδο του επόμενου μετατροπέα. Στην πλευρά συνεχούς παρεμβάλλεται ένας μετατροπέας ανύψωσης και σταθεροποίησης τάσης για τον έλεγχο της τάσης εισόδου του αντιστροφέα. Ο αντιστροφέας είναι εφοδιασμένος με σύστημα ελέγχου το οποίο εξαναγκάζει τα φασικά ρεύματα στην έξοδό του να ακολουθούν κάποια ρεύματα αναφοράς. Οι κυματομορφές των ρευμάτων αναφοράς είναι συγχρονισμένες με τις κυματομορφές τάσης του δικτύου έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μοναδιαίος συντελεστής ισχύος. Εξαιτίας της αδυναμίας επίτευξης υψηλού λόγου ανύψωσης (V_o/V_i) από τον boost μετατροπέα, χρησιμοποιείται ένας μετασχηματιστής μετά τον αντιστροφέα για την ανύψωση της τάσης και την ομαλή σύνδεση με το δίκτυο.

§5.11 Σχεδιασμός του συστήματος

Για την πραγματοποίηση της σύνδεσης με το δίκτυο χαμηλής τάσης απαιτείται σταθερή συχνότητα (50Hz για την Ελλάδα) και για το λόγο αυτό είναι απαραίτητες οι διατάξεις μετατροπής ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ. Για τη μετατροπή των εναλλασσόμενων τάσεων σε συνεχή χρησιμοποιείται τριφασική ανορθωτική γέφυρα με διόδους. Δεδομένου ότι στην είσοδο της ανορθωτικής γέφυρας οι εναλλασσόμενες τάσεις είναι μεταβλητού πλάτους, επόμενο είναι στην έξοδό της να παίρνουμε μία συνεχή τάση με μεταβαλλόμενο πλάτος. Η ανορθωτική γέφυρα με διόδους έχει τα σημαντικά πλεονεκτήματα της απλότητας και της αξιοπιστίας αλλά και τα μειονεκτήματα της μη ελεγχόμενης λειτουργίας καθώς και της μη αντιστροφής της ροής ισχύος.

Η τάση στην έξοδο της ανεμογεννήτριας είναι εναλλασσόμενη και κυμαίνεται μεταξύ 15-40VAC οπότε, με βάση τον παραπάνω τύπο, η τάση στην έξοδο της ανορθωτικής γέφυρας είναι συνεχής και έχει τιμές από 40-100VDC. Εδώ πρέπει να επισημάνουμε την χρήση του

πυκνωτή εξομάλυνσης στην έξοδο της ανορθωτικής γέφυρας, καθώς σε αντίθετη περίπτωση ο υπολογισμός της μέσης τάσης εξόδου θα γινόταν με διαφορετικό τύπο.

Για την ανύψωση και σταθεροποίηση της τάσης στην είσοδο του αντιστροφέα, ώστε να μην ακολουθεί τις μεταβολές της τάσης εξόδου της ανορθωτικής γέφυρας, χρησιμοποιείται ο ανυψωτής τάσης, ο οποίος με το κατάλληλο σύστημα ελέγχου δίνει σταθερή τάση στην έξοδο του δηλαδή στην είσοδο του αντιστροφέα. Το βασικό πλεονέκτημα από την χρήση του ανυψωτή είναι ότι επιτυγχάνεται έλεγχος χρησιμοποιώντας ένα μόνο ημιαγωγικό διακόπτη ισχύος, στην προκειμένη περίπτωση ένα MOSFET ισχύος. Ο μετατροπέας boost είναι ικανός για μια ανύψωση, στην έξοδο, 2-3 φορές την τάση εισόδου καθώς ο μέγιστος λόγος κατάτμησης είναι $D \approx 0.7$.

Ακολουθεί ο αντιστροφέας ο οποίος μετατρέπει την συνεχή τάση σταθερού πλέον πλάτους σε εναλλασσόμενη συχνότητας 50Hz προκειμένου να γίνει η σύνδεση με το δίκτυο. Στον αντιστροφέα χρησιμοποιούνται MOSFET και με τη βοήθεια της τεχνικής ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών (SPWM) και του κατάλληλου βρόχου ελέγχου, το ρεύμα εξόδου συγχρονίζεται με την τάση του δικτύου για την επίτευξη μοναδιαίου συντελεστή ισχύος και την έγχυση μόνο ενεργού ισχύος στο δίκτυο. Ουσιαστικά με το βρόχο ελέγχου του ρεύματος του αντιστροφέα επιτυγχάνεται και ο έλεγχος της αποδιδόμενης προς το δίκτυο ισχύος από όλο το αιολικό σύστημα.

Τέλος, πριν τη σύνδεση με το δίκτυο είναι απαραίτητη η τοποθέτηση φίλτρων για την απορρόφηση των ανωτέρων αρμονικών της τάσης εξόδου του αντιστροφέα και ενός μετασχηματιστή, με λόγο μετασχηματισμού 1:4, για την ανύψωση της τάσης και την ηλεκτρική απομόνωση της πριν την σύνδεση με το δίκτυο.

Η στρατηγική διαστασιολόγησης που εφαρμόστηκε, βασίζεται αποκλειστικά στην ιδέα ότι για τη χαμηλότερη τάση στην έξοδο του ανορθωτή ($DC, \min V$) και συνεπώς για την περίπτωση της χαμηλότερης παραγωγής ισχύος από την πλευρά της Α/Γ, το αιολικό σύστημα θα είναι ικανό να συνδέεται στο δίκτυο Χ.Τ. (230V). Καταλήξαμε στην επιλογή ενός Μ/Σ με λόγο μετασχηματισμού $n \sim 1: 4$. Έτσι πηγαινόντας αντίστροφα, δηλαδή από την έξοδο του αιολικού συστήματος προς την έξοδο του ανορθωτή, θα υπολογίσουμε και τα υπόλοιπα μεγέθη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

ΚΕΡΔΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

§ 6.1 Μειονεκτήματα Αξιοποίησης της Αιολικής Ενέργειας

Όπως προαναφέρθηκε η αιολική ενέργεια χρησιμοποιήθηκε στο παρελθόν από τον άνθρωπο, τόσο στη ναυτιλία όσο και στην άρδευση και τη γεωργία. Όμως αντικαταστάθηκε από άλλες πηγές ενέργειας για ολόκληρο σχεδόν τον εικοστό αιώνα, λόγω των σημαντικών μειονεκτημάτων που παρουσίαζε σε σύγκριση με τις υπόλοιπες "πυκνότητες" μορφές ενέργειας. Βέβαια σήμερα οι χρησιμοποιούμενες μηχανές δεν έχουν καμία σχέση τόσο από αεροδυναμικής σκοπιάς όσο και από κατασκευαστικής αντοχής και ποιότητας με τους θρυλικούς ανεμόμυλους, εμφανίζουν δε αξιοσημείωτη συγκέντρωση ισχύος. Παρόλα αυτά είναι χρήσιμο να εξετάσουμε τα κυριότερα μειονεκτήματα που αποδίδονται στην αιολική ενέργεια, ώστε να αποκτήσουμε μια πλέον ολοκληρωμένη εικόνα.

i) Η χαμηλή ροή αξιοποιήσιμης κινητικής ενέργειας του ανέμου (Watt/m^2) κατατάσσει την αιολική ενέργεια στις "αραιές" μορφές ενέργειας. Τυπικές τιμές ροής της αξιοποιούμενης αιολικής ισχύος κυμαίνονται μεταξύ 200W/m^2 και 400W/m^2 . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη χρήση είτε μεγάλου αριθμού ανεμογεννητριών είτε τη χρήση μηχανών μεγάλων διαστάσεων, για την παραγωγή της επιθυμητής ποσότητας ενέργειας. Σήμερα καταβάλλονται προσπάθειες αύξησης της συγκέντρωσης ισχύος των αιολικών μηχανών, οι οποίες σε επιλεγμένες περιπτώσεις πλησιάζουν ή και υπερβαίνουν τα 500W/m^2 .

ii) Η αδυναμία ακριβούς πρόβλεψης της ταχύτητας και της διεύθυνσης των ανέμων δεν μας δίνει τη δυνατότητα να έχουμε την απαραίτητη αιολική ενέργεια και κατ'επέκταση ηλεκτρική τη στιγμή που τη χρειαζόμαστε. Το γεγονός αυτό μας υποχρεώνει να χρησιμοποιούμε τις αιολικές μηχανές κυρίως σαν εφεδρικές πηγές ενέργειας σε συνδυασμό πάντοτε με κάποια άλλη πηγή ενέργειας (π.χ. σύνδεση με ηλεκτρικό δίκτυο, παράλληλη λειτουργία με μονάδες Diesel κ.λπ.).

iii) Σε περιπτώσεις διασύνδεσης της αιολικής εγκατάστασης με το ηλεκτρικό δίκτυο η παραγόμενη ενέργεια δεν πληρεί πάντοτε τις τεχνικές απαιτήσεις του δικτύου, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η τοποθέτηση αυτοματισμών έλεγχου, μηχανημάτων ρύθμισης τάσεως και συχνότητας, καθώς και ελέγχου, της άεργης ισχύος. Η εξέλιξη της τεχνολογίας σήμερα έχει δώσει λύσεις στα περισσότερα από τα αναφερόμενα προβλήματα, ιδιαίτερα με την κατασκευή ανεμογεννητριών μεταβλητού βήματος και μεταβλητών στροφών. Παρόλα αυτά υπάρχει κάποιο αυξημένο κόστος για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών της παραγόμενης ενέργειας, το οποίο προστίθεται στο συνολικό κόστος της παραγόμενης kWh. Τέλος, ακόμα και σήμερα εξακολουθούν να μας απασχολούν οι διαδικασίες ζεύξης-απόζευξης αιολικών μηχανών στο ηλεκτρικό δίκτυο, λόγω των μεταβατικών φαινομένων που αυτές προκαλούν. Λόγω των τελευταίων προβλημάτων απαγορεύεται η διασύνδεση, πέραν ενός ορίου παραγόμενης ισχύος, αιολικών μηχανών σε μικρά τοπικά ηλεκτρικά δίκτυα, τα οποία όμως αποτελούν και την πλειοψηφία των δικτύων του ελληνικού Αρχιπελάγους.

iv) Αντίστοιχα, σε περιπτώσεις αυτόνομων μονάδων είναι απαραίτητη η ύπαρξη συστημάτων αποθημεύσεως της παραγόμενης ενέργειας, σε μια προσπάθεια να έχουμε συγχρονισμό της ζήτησης και της διαθέσιμης ενέργειας. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται αυξημένο αρχικό κόστος (λόγω της προθήκης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας) και βέβαια επιπλέον απώλειες ενεργείας κατά τις φάσεις μετατροπής και αποθήκευσης, καθώς και αυξημένες υποχρεώσεις συντήρησης και εξασφάλισης της ομαλής λειτουργίας.

v) Ένα ακόμα μειονέκτημα της αιολικής ενέργειας είναι η περιορισμένη δυνατότητα αξιοποίησης του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού. Στην πραγματικότητα αξιοποιούμε μερικώς μόνο την κινητική ενέργεια, η οποία αντιστοιχεί σε ένα περιορισμένο φάσμα ταχύτητας ανέμου.

vi) Πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη ότι από το σύνολο της απορροφούμενης αιολικής ενέργειας από μια ανεμογεννήτρια, μόνο ένα περιορισμένο μέρος της μετατρέπεται σε ωφέλιμη ενέργεια λόγω των αεροδυναμικών και των μηχανικών απωλειών και περιορισμών.

vii) Τέλος, θα πρέπει να επισημάνουμε το σχετικά υψηλό κόστος της αρχικής επένδυσης για την εγκατάσταση μιας ανεμογεννήτριας, ειδικά μάλιστα για μεμονωμένες περιπτώσεις αιολικών μηχανών μικρού μεγέθους. Στο σημείο αυτό πρέπει να προσθέσουμε ότι η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας και ο ανταγωνισμός μεταξύ των κατασκευαστών έχει τα τελευταία χρόνια συμπιέσει σημαντικά τις τιμές των ανεμογεννητριών.

§ 6.2 Πλεονέκτημα Αξιοποίησης της Αιολικής Ενέργειας

Αν και δεν είναι δυνατό να αγνοήσουμε τα μειονεκτήματα που συνοδεύουν την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας, είναι επίσης σημαντικό να ληφθούν υπόψη και οι παρακάτω παράγοντες, ορισμένοι από τους οποίους ισχύουν ιδιαίτερα για τη χώρα μας, ώστε να διαμορφώσουμε μια ολοκληρωμένη εικόνα για τις δυνατότητες και τους περιορισμούς αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα:

i) Η αιολική ενέργεια αποτελεί μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι η αιολική ενέργεια δεν εξαντλείται σε αντίθεση με το σύνολο των συμβατικών καυσίμων, των οποίων τα βεβαιωμένα αποθέματα του πλανήτη μας αναμένεται να εξαντληθούν σε σύντομο χρονικό διάστημα.

ii) Η αιολική ενέργεια αποτελεί μια καθαρή μορφή ενέργειας, ήπια προς το περιβάλλον. Η χρήση της δεν επιβαρύνει τα οικοσυστήματα των περιοχών εγκατάστασης και παράλληλα αντικαθιστά ιδιαίτερα ρυπογόνες πηγές ενέργειας, όπως το κάρβουνο, το πετρέλαιο και τη πυρηνική ενέργεια. Τα σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα των περισσότερων ανεπτυγμένων χωρών καθώς και της χώρας μας (π.χ Αθήνα, Πτολεμαΐδα, Μεγαλόπολη κ.λ.π) καθιστούν την αιολική ενέργεια ιδιαίτερα ελκυστική σε σχέση με την προστασία του περιβάλλοντος.

Επιπλέον ειδικά για την χώρα μας ισχύουν και τα ακόλουθα στοιχεία:

iii) Η χώρα μας διαθέτει πολύ υψηλό αιολικό δυναμικό (κυρίως τα νησιωτικά συμπλέγματα του Αιγαίου) και μάλιστα άριστης ποιότητας. Πράγματι στα περισσότερα νησιά του Αρχιπελάγους εμφανίζονται άνεμοι σημαντικής ταχύτητας και διάρκειας σχεδόν ολόκληρο το έτος.

vi) Η περιορισμένη συμβολή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο εθνικό ενεργειακό ισοζύγιο, (βλέπε Πίνακα υπουργείου στο τέλος της εργασίας), με αμελητέα μάλιστα τη συμμετοχή της αιολικής ενέργειας, καθιστά προφανείς τις σχεδόν απεριόριστες δυνατότητες

σύστασης αιολικών εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας, σε μια αγορά με σημαντικό αναξιοποίητων θέσεων εγκατάστασης.

v) Η ισχυρή εξάρτηση της χώρας μας από εισαγόμενα καύσιμα, τα οποία οδηγούν αφ' ενός σε συναλλαγματική αιμορραγία τη χώρα μας, αφ' ετέρου σε εξάρτησή της από χώρες εκτός της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Ας σημειωθεί ότι η χώρα μας εξαρτάται κυρίως από το εισαγόμενο πετρέλαιο, που προέρχεται κυρίως από χώρες υψηλού πολιτικό-οικονομικού κινδύνου και οι οποίες εμπλέκονται αρκετά συχνά σε πολιτικές και στρατιωτικές κρίσεις. Με τον τρόπο αυτό το μεσοπρόθεσμο κόστος παραγωγής ενέργειας, η οποία αποτελεί τον κυριότερο ίσως παραγωγικό συντελεστή για πλήθος βασικών αγαθών, δεν μπορεί να προβληθεί με λογικά σενάρια, πράγμα που οδηγεί σε υπερβολική αβεβαιότητα τον αντίστοιχο σχεδιασμό της εθνικής οικονομίας.

vi) Η υψηλή σεισμικότητα της χώρας μας εγκυμονεί κινδύνους για τις θερμοηλεκτρικές και κυρίως τις πυρηνικές εγκαταστάσεις, με αποτέλεσμα να θεωρείται προβληματική στο άμεσο μέλλον η κατασκευή πυρηνικών μονάδων στη χώρα μας. Προφανώς με τα σημαντικά τεχνολογικά δεδομένα είναι δυνατή η δημιουργία υψηλής ασφαλείας συμβατικών μονάδων, με δυσανάλογη όμως αύξηση του κόστους της παραγόμενης ενέργειας.

vii) Η σημαντική διασπορά και ανομοιομορφία του κόστους παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας στα διάφορα τμήματα της χώρας μας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ότι ακόμη και σε περίπτωση που η μέση τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας στη χώρα μας θα είναι ελαφρώς κατώτερη του οριακού κόστους της παραγόμενης αιολικής kWh, σε αρκετά νησιά της χώρας μας το κόστος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας είναι πολλαπλάσιο, του οριακού κόστους παραγωγής της Δ.Ε.Η.

§ 6.3 Επιπτώσεις Αξιοποίησης Της Αιολικής Ενέργειας

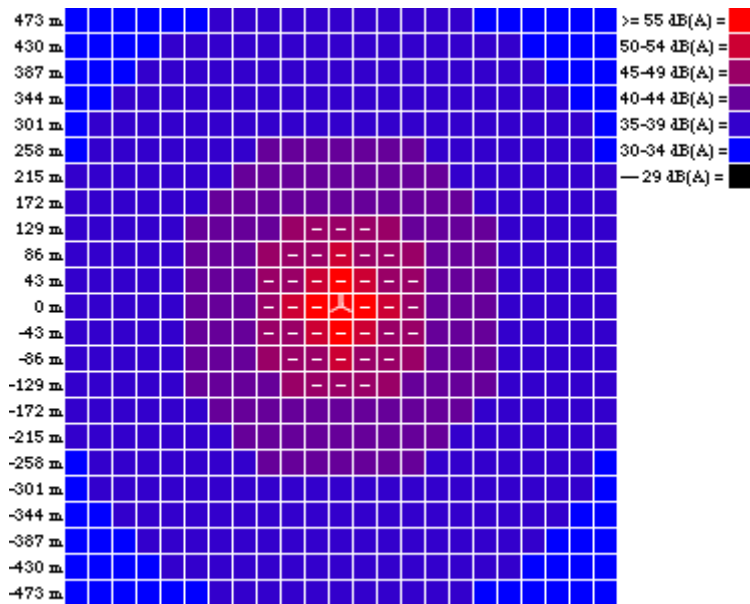
Εντάξει, η αιολική ενέργεια έχει πολλά θετικά στοιχεία. Μήπως, όμως οι αρνητικές της επιπτώσεις στον άνθρωπο και το περιβάλλον είναι χειρότερες ακόμη και από αυτές των συμβατικών (πυρηνικών, λιγνιτικών) σταθμών παραγωγής όπως ισχυρίζονται κάποιοι;

Μια ανεμογεννήτρια αποτελείται από απλά υποσυστήματα και δεν είναι παρά μια μηχανή που σκοπό έχει τη μετατροπή της ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια (αυτός είναι, άλλωστε, και ο ορισμός της). Θα μπορούσαμε μάλιστα να παρομοιάσουμε την ανεμογεννήτρια και σαν ένα μικρό σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας - με "καύσιμη ύλη" όμως τον άνεμο.

Ας προχωρήσουμε τώρα εξετάζοντας τις πιο διαδεδομένες ανησυχίες για τις αρνητικές επιπτώσεις που θα μπορούσε να έχει η εγκατάσταση και χρήση των ανεμογεννητριών σε αιολικά πάρκα.

Α. Προκαλούν προβλήματα θορύβου οι ανεμογεννήτριες ;

Πρόκειται για το μόνο ουσιαστικό πρόβλημα, αλλά συγχρόνως και το ευκολότερο να ελεγχθεί και να προληφθεί. Στις ανεμογεννήτριες ο εκπεμπόμενος θόρυβος μπορεί να υπαχθεί σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με την προέλευση του: δηλαδή μηχανικός και αεροδυναμικός.



Εικόνα 6.1 Γραφική παράσταση της έντασης του θορύβου σε σχέση με την απόσταση από την Α/Γ

- Ο πρώτος προέρχεται από τα περιστρεφόμενα μηχανικά τμήματα (κιβώτιο ταχυτήτων, ηλεκτρογεννήτρια, έδρανα κλπ.)
- Ο δεύτερος προέρχεται από την περιστροφή των πτερυγίων.

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες είναι μηχανές πολύ ήσυχες συγκριτικά με την ισχύ τους και με συνεχείς βελτιώσεις από τους κατασκευαστές γίνονται όλο και πιο αθόρυβες. Η αντιμετώπιση του θορύβου γίνεται είτε στην πηγή είτε στη διαδρομή του. Οι μηχανικοί θόρυβοι έχουν ελαχιστοποιηθεί

με εξαρχής σχεδίαση (γρανάζια πλάγιας οδόντωσης), ή με εσωτερική ηχομονωτική επένδυση στο κέλυφος της κατασκευής. Επίσης ο μηχανικός θόρυβος αντιμετωπίζεται στη διαδρομή του με ηχομονωτικά πετάσματα και αντικραδασμικά πέλματα στήριξης. Αντίστοιχα ο αεροδυναμικός θόρυβος αντιμετωπίζεται με προσεκτική σχεδίαση των πτερυγίων από τους κατασκευαστές, που δίνουν άμεση προτεραιότητα στην ελάττωση του.

Το επίπεδο του αντιληπτού θορύβου από μία ανεμογεννήτρια σύγχρονων προδιαγραφών σε απόσταση 200 μέτρων, είναι μικρότερο από αυτό που αντιστοιχεί στο επίπεδο θορύβου περιβάλλοντος μιας μικρής επαρχιακής πόλης και βεβαίως δεν αποτελεί πηγή ενόχλησης. Με δεδομένη δε τη νομοθετημένη απαίτηση να εγκαθίστανται οι ανεμογεννήτριες σε ελάχιστη απόσταση 500 μέτρων από τους οικισμούς, το επίπεδο είναι ακόμη χαμηλότερο και αντιστοιχεί πλέον σε αυτό ενός ήσυχου καθιστικού δωματίου. Επιπλέον, στις ταχύτητες ανέμου που λειτουργούν οι ανεμογεννήτριες ο φυσικός θόρυβος (θόρυβος ανέμου σε δένδρα και θάμνους) υπερχαλύπτει οποιονδήποτε θόρυβο που προέρχεται από τις ίδιες.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω και σε συνδυασμό με τη θέση των "οικοπέδων" που συνήθως εγκαθίστανται τα αιολικά πάρκα στην Ελλάδα για να έχουν καλύτερη απόδοση, μπορούμε να πούμε με σιγουριά ότι τα αιολικά πάρκα δεν προκαλούν:

- αύξηση της υπάρχουσας στάθμης θορύβου εκτός των ορίων τους και ακόμη περισσότερο σε κατοικημένες περιοχές
- έκθεση ανθρώπων σε υψηλή στάθμη θορύβου.

Ο πιο εύκολος και αποτελεσματικός τρόπος, για να πεισθεί κανείς για το ζήτημα του θορύβου είναι μια επίσκεψη σε ένα αιολικό πάρκο μια μέρα που οι ανεμογεννήτριες βρΐσκονται σε κανονική λειτουργία.

B. Δημιουργούν προβλήματα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών οι ανεμογεννήτριες;

Η ανησυχία αυτή συνήθως αναφέρεται αφενός σε προβλήματα που προκαλούν οι ανεμογεννήτριες λόγω της θέσης τους σε σχέση με ήδη υπάρχοντες σταθμούς τηλεόρασης ή ραδιοφώνου και αφετέρου σε πιθανές ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές από τις ίδιες.

Είναι γεγονός ότι, η διάδοση των εκπομπών στις συχνότητες της τηλεόρασης ή και του ραδιοφώνου (κυρίως στις συχνότητες εκπομπών FM) επηρεάζεται από εμπόδια που παρεμβάλλονται μεταξύ πομπού και δέκτη. Το κυριότερο πρόβλημα από τις ανεμογεννήτριες προέρχεται από τα κινούμενα πτερύγια που μπορούν να προκαλέσουν αυξομείωση σήματος λόγω αντανάκλασεων. Αυτό ήταν πολύ εντονότερο στην πρώτη γενιά ανεμογεννητριών που έφερε μεταλλικά πτερύγια. Τα πτερύγια των συγχρόνων ανεμογεννητριών κατασκευάζονται αποκλειστικά από συνθετικά υλικά, τα οποία έχουν ελάχιστη επίπτωση στη μετάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Η Ελληνική νομοθεσία προβλέπει την προώθηση αδειοδότησης ενός αιολικού πάρκου μόνον εφόσον τηρούνται κάποιες ελάχιστες αποστάσεις από τηλεπικοινωνιακούς ή ραδιοτηλεοπτικούς σταθμούς. Οποιαδήποτε πιθανά προβλήματα παρεμβολών μπορούν να προληφθούν με σωστό σχεδιασμό και χωροθέτηση ή να διορθωθούν με μικρό σχετικά κόστος από τον κατασκευαστή του πάρκου με μια σειρά απλών τεχνικών μέτρων, όπως π.χ. η εγκατάσταση επιπλέον αναμεταδοτών. Σε σχέση με την συμβατότητα και τις παρεμβολές στις τηλεπικοινωνίες, αξίζει να αναφέρουμε, ότι σε άλλες ευρωπαϊκές χώρες οι πύργοι των ανεμογεννητριών όχι μόνον δεν δημιουργούν εμπόδια, αλλά χρησιμοποιούνται ήδη για την εγκατάσταση κεραιών προς διευκόλυνση υπηρεσιών επικοινωνιών, όπως η κινητή τηλεφωνία!

Όσον αφορά τις ειπεμπόμενες ακτινοβολίες, όπως φαίνεται και από την περιγραφή των τμημάτων της ανεμογεννήτριας, τα μόνα υποσυστήματα που θα μπορούσαμε να πούμε ότι "εκπέμπουν" ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία χαμηλού επιπέδου, είναι η ηλεκτρογεννήτρια και ο μετασχηματιστής μέσης τάσης. Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο της ηλεκτρογεννήτριας είναι εξαιρετικά ασθενές και περιορίζεται σε μια πολύ μικρή απόσταση γύρω από το κέλυφος της που είναι τοποθετημένο τουλάχιστον 40-50 μέτρα πάνω από το έδαφος. Για το λόγο αυτό δεν υφίσταται πραγματικό θέμα έκθεσης στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ούτε καν στη βάση της ανεμογεννήτριας. Ο μετασχηματιστής, πάλι, περιβάλλεται πάντα από περίφραξη ασφαλείας ή είναι κλεισμένος σε μεταλλικό υπόστεγο. Η περίφραξη είναι τοποθετημένη σε τέτοια απόσταση που το επίπεδο της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι αμελητέο. Μπορούμε λοιπόν να ισχυριστούμε με βεβαιότητα, ότι αυτά που ακούγονται για εκπομπή ραδιενέργειας η ακτινοβολιών άλλου τύπου από τις ανεμογεννήτριες δεν ευσταθούν.

Γ. Δημιουργούν αισθητικά προβλήματα και προσβολή του φυσικού τοπίου οι ανεμογεννήτριες;

Αυτό είναι ένα θέμα στο οποίο έχει δοθεί μεγάλη δημοσιότητα. Η οπτική όχληση είναι κάτι υποκειμενικό και δύσκολα μπορούν να τεθούν κοινά αποδεκτοί κανόνες. Από έρευνες σε χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης προκύπτει ότι κάποιος που είναι ευνοϊκά διατεθειμένος απέναντι στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας, αποδέχεται τις ανεμογεννήτριες και οπτικά πολύ πιο εύκολα από κάποιον που είναι αρνητικός εξ αρχής. Από τις ίδιες μελέτες, προκύπτει ότι τα αιολικά πάρκα είναι πιο αποδεκτά από αισθητικής άποψης σε ανθρώπους που είναι ενημερωμένοι για τα οφέλη που προέρχονται από την χρήση τους. Αν κάνουμε μια απλή σύγκριση μεταξύ ενός θερμικού σταθμού παραγωγής (π.χ. λιγνιτικού), και ενός αιολικού πάρκου είναι φανερό ότι η οπτική όχληση που προκύπτει από το πρώτο είναι εμφανώς και αντικειμενικά πολύ μεγαλύτερη. Δεδομένου βεβαίως ότι οι ανεμογεννήτριες είναι κατ' ανάγκη

ορατές από απόσταση, αφού οι κορυφογραμμές αποτελούν ιδανικό χώρο εγκατάστασης των Α/Γ, είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη οι ιδιαιτερότητες κάθε τόπου εγκατάστασης και να γίνεται προσπάθεια ενσωμάτωσης τους στο τοπίο. Οι τριπτέρυγες Α/Γ δίνουν ένα αισθητικό αρμονικότερο αποτέλεσμα στον ορίζοντα και η περιστροφή των πτερυγίων γίνεται ευκολότερα αποδεκτή. Ο χρωματισμός των πύργων στήριξης και των πτερυγίων παίζει μεγάλο ρόλο στην εναρμόνιση με τον περιβάλλοντα χώρο. Το λευκό χρώμα έχει επικρατήσει με εναλλακτική λύση το ανοικτό γκρι. Επίσης οι ολόσωμη πύργοι στήριξης είναι από πλευράς αισθητικής και ασφάλειας προτιμότεροι.

Δ. Έχουν επίδραση οι ανεμογεννήτριες στις γεωργικές και κτηνοτροφικές δραστηριότητες ;

Δεν υπάρχει καμία ένδειξη ότι τα αιολικά πάρκα επιβαρύνουν τη γεωργία ή την κτηνοτροφία. Δεδομένου ότι περίπου το 99% της γης που φιλοξενεί ένα αιολικό πάρκο είναι διαθέσιμο για άλλες χρήσεις, μπορούμε να κατανοήσουμε ότι οι αγροτικές δραστηριότητες μπορούν να συνεχίζονται και μετά την εγκατάσταση του. Οι συνήθεις θέσεις αιολικών πάρκων είναι σε ορεινές περιοχές με θαμνώδη βλάστηση ακριβώς λόγω των υψηλών ταχυτήτων του ανέμου που ευνοούν την εγκατάσταση του. Σε αυτές τις περιοχές, η χρήση γης είναι κυρίως για βοσκή αιγοπροβάτων οι οποία μπορεί να συνεχισθεί χωρίς κανένα πρόβλημα και μετά την εγκατάσταση του αιολικού πάρκου. Χαρακτηριστικά, σε μερικά αιολικά πάρκα έχει παρατηρηθεί ότι οι ανεμογεννήτριες γίνονται πόλος έλξης αιγοπροβάτων που επωφελούνται από τη δροσιά της σκιάς που προσφέρουν οι πύργοι τους(βλ. εικόνες 6.1, 6.2)!



Εικόνα 6.2



Εικόνα 6.3

Ε. Έχουν επιπτώσεις στον πληθυσμό των πουλιών οι ανεμογεννήτριες ;

Τα πουλιά καθώς πετούν μερικές φορές συγκρούονται με κτίρια και άλλες σταθερές κατασκευές. Οι ανεμογεννήτριες όμως δεν προκαλούν ιδιαίτερο πρόβλημα όπως έχει φανεί από μελέτες που έχουν γίνει σε ευρωπαϊκές χώρες όπως η Γερμανία, η Ολλανδία, η Δανία και η Αγγλία. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκε ότι στον συνολικό αριθμό πουλιών που σκοτώνονται ετησίως, μόνον 20 θάνατοι οφείλονται σε ανεμογεννήτριες (για εγκατεστημένη ισχύ 1000MW), ενώ αντίστοιχα 1.500 θάνατοι οφείλονται στους κνηγούς και 2.000 σε πρόσκρουση με οχήματα και τις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (καθότι είναι σχεδόν "αόρατες" για τα πουλιά). Ασφαλώς βέβαια, το θέμα της προστασίας του πληθυσμού των πουλιών σε ευαίσθητες οικολογικά και προστατευόμενες περιοχές πρέπει να λαμβάνεται

υπόψη κατά τη φάση σχεδιασμού και χωροθέτησης του αιολικού πάρκου. Συνοψίζοντας, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε, ότι οι οποιοσδήποτε επιπτώσεις από τις ανεμογεννήτριες, αφενός είναι άμεσα "ορατές" και αφετέρου είναι δυνατόν να ελαχιστοποιηθούν με σωστή αντιμετώπιση και προσχεδιασμό. Αντίθετα, οι επιπτώσεις της θερμικής ή πυρηνικής παραγωγής ενέργειας αργούν να φανούν, είναι μακροπρόθεσμες και όση προσπάθεια και κόστος να δαπανηθούν είναι αδύνατον να ελαχιστοποιηθούν. Εν τέλει θα πρέπει να αποφασίσουμε ότι εφόσον πρέπει να παράγουμε ηλεκτρική ενέργεια, είναι σίγουρα προτιμότερο να την παράγουμε με τρόπο που να έχει την μικρότερη δυνατή επιβάρυνση για το περιβάλλον. Από τεχνολογική και οικονομική πλευρά, η πιο ώριμη μορφή ανανεώσιμης και "καθαρής" ενέργειας είναι σήμερα η αιολική. Αυτή μπορεί να συμβάλλει αποτελεσματικά στην αποτροπή των κλιματικών αλλαγών προσφέροντας συγχρόνως ποικίλα περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά οφέλη.

§ 6.4 Το Περιβαλλοντικό Κέρδος Από Τα Αιολικά Πάρκα

Η κάθε κιλοβατώρα (kWh) ηλεκτρισμού που παράγεται από τον άνεμο αντιστοιχεί σε μείωση:

1kg CO₂

0.0015 kg NOX

0.012 kg SO₂

που θα παραγόταν από 1kWh πετρελαίου.

Σε αντίθεση με τους συμβατικούς τρόπους παραγωγής ενέργειας όπου γίνεται χρήση άνθρακα ή πετρελαίου, η αιολική ενέργεια είναι καθαρή με μηδενική εκπομπή αερίων. Έχει υπολογισθεί ότι μια Α/Γ παράγει σε ένα χρόνο λειτουργίας περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια από αυτή που καταναλώθηκε για την κατασκευή της.

§ 6.5 Προδιαγραφές Για Μ.ΕΠ. Αιολικών Πάρκων

Οι μελέτες επιπτώσεων στο περιβάλλον από ένα αιολικό πάρκο θα πρέπει να επικεντρώνονται στα ακόλουθα σημεία:

(α) έδαφος και φυσικό περιβάλλον (βλάστηση, πανίδα, χλωρίδα)

θα γίνεται αναφορά στον τρόπο και διάρκεια της επίδρασης των έργων υποδομής, νέοι δρόμοι, εκσκαφές, μετακινήσεις βαρέων οχημάτων.

Εκτίμηση της επίδρασης σε πανίδα και χλωρίδα.

(β) νερό

Αναφορά τυχόν επιδράσεων σε επιφανειακά νερά ή πηγές.

(γ) θόρυβος

εκτίμηση επιπέδων θορύβου σύμφωνα με προδιαγραφές

(δ) χρήση γης

αναφορά στον τρόπο που το αιολικό πάρκο επιδρά στις παραδοσιακές χρήσεις γης και τυχόν μακροπρόθεσμες αλλαγές.

(ε) πληθυσμός

επίδραση στον τουρισμό, δημιουργία νέων θέσεων εργασίας, γενικότερες συνήθειες.

(στ) μεταφορές – τηλεπικοινωνίες

οιαδήποτε αλλαγή που επιφέρει το πάρκο και μέτρα αντιμετώπισης.

(ζ) αισθητική

θα περιλαμβάνει φωτογραφίες της ευρύτερης περιοχής και φωτομοντάζ του πάρκου

(η) γενική αναφορά στα θετικά σημεία της αιολικής ενέργειας

§ 6.6 Συμπέρασμα

Η ανάπτυξη μιας χώρας είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την κατανάλωση ενέργειας. Οι ήπιες μορφές ενέργειας, και ιδιαίτερα η αιολική που αφθονεί στην πατρίδα μας, είναι σε θέση να συμβάλουν σημαντικά στο ενεργειακό ισοζύγιο. Η χρήση της επιβάλλεται όχι μόνο γιατί δε ρυπαίνει το περιβάλλον αλλά γιατί αποτελεί μια ανεξάντλητη εγχώρια πηγή ενέργειας.

Η αξιοποίηση της θα πρέπει να γίνει γρήγορα με την επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας και με γνώμονα πάντα την προστασία του περιβάλλοντος.

Όπως οι παλιοί παραδοσιακοί ανεμόμυλοι έτσι και οι σύγχρονες Α/Γ θα καταξιωθούν σύντομα στη συνείδηση του καθενός ως μηχανές μεγάλης προσφοράς με σεβασμό προς το περιβάλλον.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] **Γ. Μπεργελές**
 “ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ”, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΥΜΕΩΝ, ΑΘΗΝΑ, 1994.
- [2] **Ιωάννης Κλεάνθη Καλδέλλης**
 “ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ”, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΑΘ. ΣΤΑΜΟΥΛΗΣ, ΑΘΗΝΑ, 1999.
- [3] **Άγι Φ. Μίχου**
 “ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΑ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΑΞΟΝΑ ΤΥΠΟΥ DARRIEUS”, ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ, ΑΘΗΝΑ, 1985.
- [4] **Δ. Κανελλόπουλος**
 “ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗ Α/Γ”, ΤΕΕ ΣΕΜΙΝΑΡΙΟ “ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ – ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ”, ΑΘΗΝΑ, 1995.
- [5] **Α. Ανδρούτσος**
 “ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ”, ΤΕΕ ΣΕΜΙΝΑΡΙΟ “ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ – ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ”, ΑΘΗΝΑ, 1995.
- [6] **Ν. Γρουπαράκης**
 “ΠΤΕΡΥΓΙΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ. ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΤΥΠΟΥ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ – ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΘΟΡΥΒΟΣ”, ΤΕΕ ΣΕΜΙΝΑΡΙΟ “ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ – ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ”, ΑΘΗΝΑ, 1995.
- [7] **Π. Ντοκόπουλος**
 “ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ”, ΤΕΕ ΣΕΜΙΝΑΡΙΟ “ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ – ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ”, ΑΘΗΝΑ, 1995.
- [8] **Α. Ανδρούτσος**
 “ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ”, ΤΕΕ ΣΕΜΙΝΑΡΙΟ “ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ – ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ”, ΑΘΗΝΑ, 1995.
- [9] **Γεώργιος Δημ. Σκικός**
 “ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΛΗΨΗΣ ΑΠΟΦΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΘΕΣΕΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΤΩΝ ΑΣΑΦΩΝ ΣΥΝΟΛΩΝ”, ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ, ΑΘΗΝΑ, 1993.
- [10] **Κ. Φιλίππιδης – Α. Παπακωνσταντίνου – Μ. Παππάς**

“ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ: ΕΜΠΕΙΡΙΑ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ”, ΤΕΕ ΣΕΜΙΝΑΡΙΟ “ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ – ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ”, ΑΘΗΝΑ, 1995.

[11] **Ι. Πινάτσος**

“ΕΜΠΕΙΡΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΣΤΟΝ ΟΤΕ”, ΤΕΕ ΣΕΜΙΝΑΡΙΟ “ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ – ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ”, ΑΘΗΝΑ, 1995.

[12] **Περιοδικό “ΕΝΕΡΓΕΙΑ”**

ΤΕΥΧΗ ΑΥΓΟΥΣΤΟΥ – ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΥ ’95 ΚΑΙ ΝΟΕΜΒΡΙΟΥ ’95.

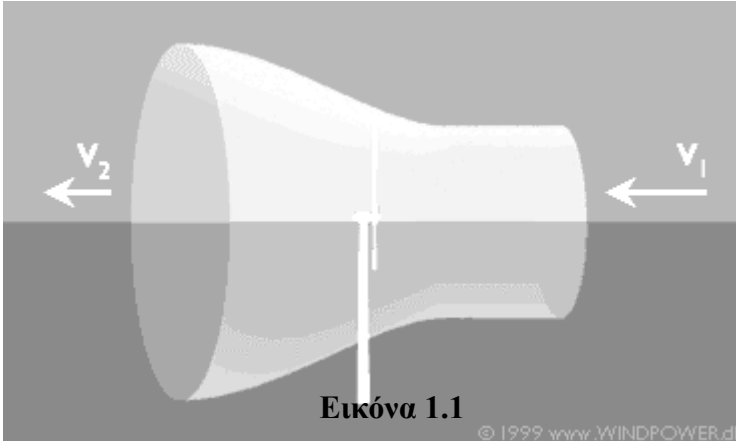
ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΙΣ ΣΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

1. European Wind Energy Association (EWEA)
<http://www.ewea.org>
2. British Wind Energy Association (BWEA)
<http://www.bwea.com>
3. Danish Wind Turbines Manufacturers Association
<http://windpower.dk>
4. Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ)
<http://www.cres.gr>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Αεροδυναμικός βαθμός απόδοσης Α/Γ (Όριο του Betz)

Ο αεροδυναμικός βαθμός απόδοσης Α/Γ χαρακτηρίζεται από τον αεροδυναμικό συντελεστή C_p , ο οποίος εξ ορισμού είναι ο λόγος της ισχύος του δρομέα του Α/Κ προς την ισχύ του προσπίπτοντος ανέμου. Δηλαδή $C_p = \frac{P}{P_{AN}}$. Ο συντελεστής C_p αποδεικνύεται ότι δεν μπορεί να υπερβεί την τιμή



Εικόνα 1.1

16/27 (ονομαζόμενη και όριο του Betz προς τιμή του ερευνητή που πρώτος το απέδειξε) που σημαίνει ότι ο ιδανικότερος από αεροδυναμικής απόψεως δρομέας μπορεί να απορροφήσει το πολύ 59.3% της ισχύος του ανέμου. Η απόδειξη του ορίου του Betz γίνεται με βάση την θεωρία της ορμής. Συγκεκριμένα θεωρούμε ρεύμα αέρα που προσπίπτει στο δρομέα (βλ. εικόνα 1.1) σε μεγάλη απόσταση



Εικόνα 1.2

ανεμογεννήτριας η ταχύτητα του είναι V_1 και V_2 , αντίστοιχα (όπου V_2 είναι μικρότερη της V_1 επειδή μέρος της κινητικής ενέργειας του ανέμου προσφέρεται στην ανεμογεννήτρια) ενώ στις ίδιες θέσεις η στατική πίεση είναι ίση με P_0 . Το ρεύμα περνώντας από τον δρομέα διατηρεί σταθερή την αξονική της ταχύτητας, ενώ μεταβάλλεται η εφαπτομενική προς το επίπεδο του δρομέα (βλ. εικόνα 1.2) συνιστώσα (λόγω προσδιδόμενης) περιστροφικής κίνησης δρομέα καθώς και η στατική πίεση από P_1 σε P_2 .

Η δύναμη T , που δέχεται ο δρομέας από τον άνεμο κατά την κύρια κατεύθυνση του είναι:

$$T = (P_1 - P_2)A \tag{1}$$

όπου:

A = η επιφάνεια του δρομέα

Βάση της θεωρίας της ορμής η δύναμη T είναι ίση με τον ρυθμό μεταβολής της αξονικής ορμής του ρεύματος του αέρα δηλαδή:

$$T = (V_1 - V_2)\rho VA \tag{2}$$

όπου:

ρ = είναι η πυκνότητα του αέρα

V = η ταχύτητα του ανέμου διαμέσου του δίσκου

Εφαρμόζοντας τον νόμο του BERNOLLI ανάντι και κατάντι του δρομέα (υπάρχει διατήρηση της ενέργειας στους δυο ανεξάρτητους υποχώρους πριν και μετά το δίσκο μέσα στο ροϊκό σωλήνα όχι όμως και μεταξύ των υποχώρων αφού ο δίσκος αφαιρεί ενέργεια από το ρεύμα αέρα).

Επομένως ανάντι του δρομέα θα ισχύει:

$$P_0 + \frac{\rho}{2} V_1^2 = P_1 + \frac{\rho}{2} V^2 \tag{3}$$

κατάντι του δρομέα θα ισχύει:

$$P_0 + \frac{\rho}{2} V_2^2 = P_2 + \frac{\rho}{2} V^2 \quad (4)$$

αφαιρώντας τις ενεργειακές σχέσεις του BERNOLLI κατά μέλη προκύπτει:

$$\frac{\rho}{2} (V_1^2 - V_2^2) = (P_1 - P_2) \quad (5)$$

από τις παραπάνω σχέσεις 1,2,3,4,5 έπεται ότι η δύναμη που δέχεται ο δρομέας από τον άνεμο είναι:

$$T = \frac{\rho}{2} A (V_1^2 - V_2^2) \quad (6)$$

και η ταχύτητα του αέρα δια μέσου του δίσκου:

$$V = \frac{(V_1 + V_2)}{2} \quad (7)$$

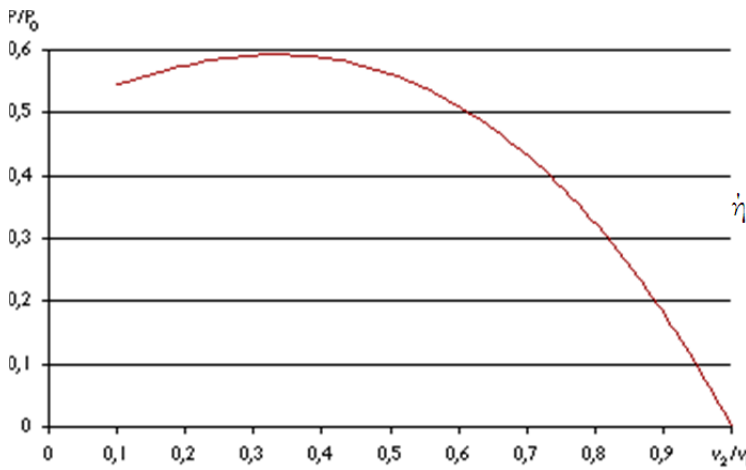
Η ισχύς που απορροφά ο δρομέας βάση των σχέσεων 6,7 είναι:

$$P = TV = \frac{\rho A (V_1^2 - V_2^2) (V_1 + V_2)}{4} \quad (8)$$

Επειδή η ισχύς του ρεύματος αέρος είναι:

$$P_{AN} = \frac{1}{2} \rho A V_1^2 \quad (9)$$

Επομένως ο συντελεστής ισχύος της πτερωτής θα έχει ως εξής:



$$C_p = \frac{P}{P_{AN}} = \frac{TV}{\frac{1}{2} \rho A V_1^2} \quad (10)$$

διαφορετικά

$$C_p = \frac{(1 - k^2)(1 + k)}{2} \text{ όπου } k = \frac{V_2}{V_1}$$

συνεπώς ο C_p μεγιστοποιείται όταν

$$\frac{dC_p}{dk} = 0$$

το παραπάνω συμβαίνει για την τιμή

του $k = 1/3$.

Γραφική παράσταση του συντελεστή ισχύος συναρτήσει του συντελεστή k

Οπότε αντικαθιστώντας την τιμή του k στην παραπάνω εξίσωση (10) η τιμή του C_p που προκύπτει

είναι η μέγιστη δηλαδή $C_{p \max} = \frac{16}{27} = 59,3\%$ αυτό μπορεί να διαπιστωθεί και από την παραπάνω γραφική παράσταση όπου έχουμε $C_p = f(k)$.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Συνομογραφίες μονάδων – επεξηγήσεις			
M = metre = 3.28 ft.	N = Newton	cal = calorie	
s = second	W = Watt	ΤΠΠ = τόνοι ισοδυνάμου πετρελαίου	
h = hour	HP = horsepower	Hz = Hertz (κύκλοι το δευτερόλεπτο)	
	J = Joule		
10 ⁻¹	= p 10 ³	= k kilo = 1,000 = thousands	
10 ⁻²	= 10 ⁶	= M mega = 1,000,000 =	
10 ⁻⁹	= n nano = millions		
1/1000,000,000	10 ⁹	= G giga = 1,000,000,000	
10 ⁻⁶	= μ micro 10 ¹	= T tera =	
= 1/1000,000	1,000,000,000,000		
10 ⁻³	= m milli = 10 ¹	= P peta =	
1/1000	1,000,000,000,000,000		
Ταχύτητες ανέμου			
1 m/s = 3.6 km/h = 2.237 mph = 1.944 knots			
1 knot = 1 ναυτικό μίλι την ώρα = 0.5144 m/s = 1.852 km/h = 1.125 mph			

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΑΕΡΑ ΣΕ ΣΤΑΘΕΡΗ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ			
Θερμοκρασία °Κελσίου (Celsius)	Θερμοκρασία °Φαρενάιτ (Fahrenheit)	πυκνότητα μάζα του ξηρού αέρα kg/m ³	Μέγιστη περιεκτικότητα σε νερό kg/m ³
-25	-13	1,423	
-20	-4	1,395	
-15	5	1,368	
-10	14	1,342	
-5	23	1,317	
0	32	1,292	0,005
5	41	1,269	0,007
10	50	1,247	0,009
15	59	1,225 *	0,013
20	68	1,204	0,017
25	77	1,184	0,023
30	86	1,165	0,030
35	95	1,146	0,039
40	104	1,127	0,051

* η πυκνότητα του ξηρού αέρα στη σταθερή ατμοσφαιρική πίεση στη θάλασσα στους 15°
Χρησιμοποιείται σαν σταθερά στην αιολική βιομηχανία.

Τάξεις τραχύτητας και μήκη τραχύτητας

Η τάξη τραχύτητας ορίζεται από τον European Wind Atlas βασιζόμενη στο μήκος τραχύτητας σε μέτρα Z_0 δηλαδή το ύψος πάνω από το έδαφος όπου η ταχύτητα του ανέμου είναι θεωρητικά μηδέν.

\ln είναι η λογαριθμική συνάρτηση.

$$\begin{aligned} &\text{Αν το (μήκος } \leq 0.03 \text{)} \\ &\text{τάξη εδάφους} = 1.699823015 + \\ &\ln(Z_0)/\ln(150) \end{aligned}$$

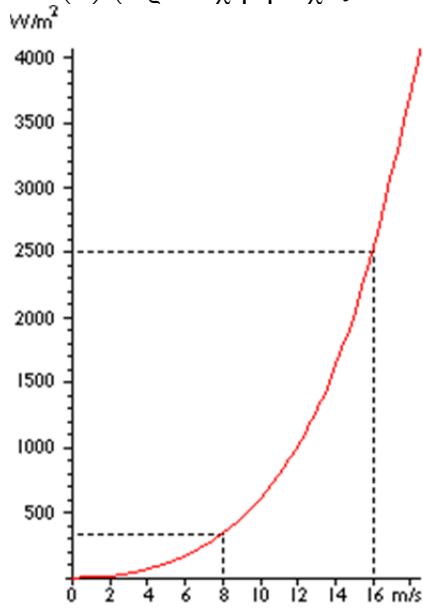
$$\begin{aligned} &\text{Αν το (μήκος } > 0.03 \text{)} \\ &\text{τάξη εδάφους} = 3.912489289 + \\ &\ln(Z_0)/\ln(3.3333333) \end{aligned}$$

ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΑΞΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΤΙΜΩΝ ΜΗΚΟΥΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ		
Τάξη εδάφους	Τιμή μήκους τραχύτητας σε m	Περιγραφή τραχύτητας εδάφους
0	0.0002	Πολύ χαμηλή(ανοιχτή θάλασσα χωρίς υψηλό κυματισμό)
0.5	0.0024	Τελείως ανοιχτό ανάγλυφο με λεία επιφάνεια, π.χ διάδρομοι αεροδρομίων, γρασιδι κ.τ.λ
1	0.03	Ανοιχτή αγροτική περιοχή χωρίς εμπόδια θάμνων και δένδρων με πολύ αραιά κτήρια. Μόνο μικροί λόφοι
1.5	0.055	Αγροτική περιοχή με μερικά σπίτια και μέχρι 8 μέτρων ύψους δένδρα με μια απόσταση περίπου 1250 m.
2	0.1	Αγροτική περιοχή με μερικά σπίτια με 8 μέτρων ύψους δένδρα με μια απόσταση περίπου 500 m.
2.5	0.2	Αγροτική περιοχή με πολλά σπίτια, θάμνοι και φυτά, ή 8 m δένδρα με μια απόσταση περίπου 250m.
3	0.4	Χωριά, μικρές πόλεις, αγροτικές περιοχές με πολλά ψηλά δένδρα και θάμνους δάση και πολύ τραχύ και ανομοιογενές ανάγλυφο εδάφους
3.5	0.8	Μεγάλες πόλεις με ψηλά κτήρια
4	1.6	Πολύ μεγάλες πόλεις με ψηλά κτήρια και ουρανοξύστες

Ισχύς του ανέμου **					
m/s	W/m ²	M/s	W/m ²	m/s	W/m ²
0	0	8	313.6	16	2508.8
1	0.6	9	446.5	17	3009.2
2	4.9	10	612.5	18	3572.1
3	16.5	11	815.2	19	4201.1
4	39.2	12	1058.4	20	4900.0
5	76.2	13	1345.7	21	5672.4
6	132.3	14	1680.7	22	6521.9
7	210.1	15	2067.2	23	7452.3

** για πυκνότητα αέρα 1.225 kg/m³ , αντιστοιχεί σε ξηρό αέρα σταθερής ατμοσφαιρικής πίεσης στην επιφάνεια της θάλασσας στους 15° C. Η φόρμα για την ισχύ ανά m² σε Watts = 0.5 * 1.225 * v³ , όπου v είναι η ταχύτητα του ανέμου σε m/s.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η ισχύς του ανέμου σύμφωνα με την ταχύτητά του P=f(V). (προσοχή η ισχύς του ανέμου όχι η ισχύς που τελικά δεσμεύουμε από τον άνεμο!!!)



© 1998 www.WINDPOWER.org

Σχ. ... γραφική παράσταση ισχύος ανέμου σε σχέση με την ταχύτητά του

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ

Α.Π.Ε. = ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Α/Γ = ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

Α/Κ = ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΑΣ

Α.Σ.Π. = ΑΥΤΟΝΟΜΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Α.Κ.Α. = ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΑΞΟΝΑ

Α.Ο.Α = ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ

Η.Μ.Ε. = ΗΠΙΑ ΜΟΡΦΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Σ.Η.Ε. = ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Μ.Ε.Π. = ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ