

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

# **ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ**

**ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΣΠΟΥΔΑΣΤΗ: Κραβαρίτης Χρήστος**

**ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Τσιμπλοστεφανάκης Ευάγγελος**

**ΠΑΤΡΑ 2011**

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στην εργασία που ακολουθεί, αναπτύσσονται οι προοπτικές αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας στη χώρα μας μέσω των ανεμογεννητριών. Επιπλέον αναλύονται οι διάφοροι τρόποι ελέγχου ισχύος των ανεμογεννητριών, οι τύποι και τα υποσυστήματά τους. Ακόμη, περιγράφονται οι ηλεκτρικές μηχανές που τις απαρτίζουν, τα είδη τους και οι τρόποι λειτουργίας τους, η αυτόνομη λειτουργία τους, καθώς και οι τρόποι διασύνδεσής τους με το εθνικό δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή της θέσης εγκατάστασης των ανεμογεννητριών. Τέλος, γίνεται αναφορά στα οικονομικά μεγέθη που πλαισιώνουν τα αιολικά συστήματα παραγωγής ενέργειας από τη δεκαετία του '80 έως και σήμερα.

## Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....	4
1.1 Εισαγωγή .....	4
1.2 Ιστορική αναδρομή .....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....	7
2.1 Τύποι και υποσυστήματα ανεμοκινητήρων.....	7
2.2 Τύποι και υποσυστήματα α/κ .....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....	20
ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ Α/Γ & ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	20
3.1 Εισαγωγή .....	20
3.2 Συστήματα μετατροπής σε ηλεκτρική ενέργεια .....	22
3.2.1 Ασύγχρονες γεννήτριες .....	23
3.2.2 Σύγχρονες γεννήτριες.....	34
3.2.3 Μηχανές Σ.Ρ.....	38
3.3 Παράλληλη λειτουργία Α/Γ με το ΣΗΕ.....	39
3.3.1 Διαταραχές της τάσεως.....	39
3.3.2 Συμπεριφορά Α/Γ κατά τη διάρκεια βραχ/μάτων στο δίκτυο .....	43
3.3.3 Απομονωμένη λειτουργία Α/Γ.....	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....	47
ΕΛΕΓΧΟΣ ΙΣΧΥΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ .....	47
4.1 Η αεροδυναμική των πτερυγίων της Α/Γ .....	48
4.2 Αεροδυναμικός έλεγχος ισχύος Α/Γ .....	51
4.3 Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών .....	59
4.4 Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών.....	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 .....	66
ΕΠΙΛΟΓΗ ΘΕΣΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΑ.....	66
5.1 Επιλογή θέσης εγκατάστασης.....	67
5.2 Παράμετροι Επιλογής Τοποθεσίας Αιολικών Εγκαταστάσεων .....	68
5.2.1 Οικονομική αξία.....	69
5.2.2 Επιδράσεις στο περιβάλλον .....	70
5.2.3 Κανονισμοί και περιορισμοί στη χρήση γης .....	73
5.2.4 Αποδοχή της ανεμογεννήτριας από το τοπικό δίκτυο.....	74
5.2.5 Ακραίες μετεωρολογικές συνθήκες .....	75
5.2.6 Αποδοχή από το κοινό.....	78

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 .....	80
ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ & ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ .....	80
6.1 Εκτίμηση του αιολικού δυναμικού της Ελλάδας .....	81
6.2 Προτάσεις αξιοποίησης της Αιολικής Ενέργειας στην Ελλάδα.....	84
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 .....	86
ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ .....	86
7.1 Εισαγωγή .....	86
7.2 Κόστος ανεμοκινητήρα.....	87
7.3 Κόστος γης και υποδομής .....	88
7.4 Διάρκεια ζωής του ανεμοκινητήρα .....	88
7.5 Κόστος συντήρησης και λειτουργίας Α/Κ.....	89
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8.....	90
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	90

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### 1.1 Εισαγωγή

Η ζήτηση ενέργειας αυξάνεται ραγδαία, εντείνοντας την αναζήτηση και ανάπτυξη ανταγωνιστικών τρόπων παραγωγής της, με αξιοποίηση ανανεώσιμων ή ανεξάντλητων πηγών ενέργειας. Παράλληλα επιδιώκεται η αποδέσμευση της παραγωγής ενέργειας από τεχνολογίες, με την εφαρμογή των οποίων διακυβεύεται η ισορροπία του περιβάλλοντος ανεπανόρθωτα.

Ο άνεμος, αποτελεί μια ανεξάντλητη, φυσική και καθαρή πηγή ενέργειας. Η αξιοποίησή του προς την κατεύθυνση αυτή, αποκτά νέα διάσταση και προοπτική με την εξέλιξη τεχνολογίας μετατροπής της κινητικής του ενέργειας σε ηλεκτρική.

Βασικοί παράγοντες που έχουν συμβάλλει στην εξέλιξη της τεχνολογίας αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας, θεωρούνται οι παρακάτω:

- Η ανάπτυξη υψηλής αντοχής σύνθετων υλικών και συνθετικών ινών για την κατασκευή μεγάλων πτερυγίων με χαμηλό κόστος.
- Η πτώση των τιμών των ηλεκτρονικών ισχύος
- Η δυνατότητα λειτουργίας των ηλεκτρογεννητριών με μεταβλητή ταχύτητα για μεγιστοποίηση της απόδοσης
- Η βελτιωμένη και ηλεκτρονικά ελεγχόμενη λειτουργία των αιολικών πάρκων και τέλος
- Ο διαρκής εμπλουτισμός της εμπειρίας και της τεχνογνωσίας.

Η αιολική ενέργεια λοιπόν, αποτελεί μια αστείρευτη πηγή ενέργειας με αξιοσημείωτο δυναμικό και με δωρεάν πρώτη ύλη στη διάθεση της ανθρωπότητας και προβάλλει σήμερα σαν μία από τις καλύτερες εναλλακτικές πηγές για την παραγωγή ηλεκτρισμού αλλά και για άλλες χρήσεις.

### 1.2 Ιστορική αναδρομή

Η αιολική ενέργεια χρησιμοποιήθηκε αρχικά από τον άνθρωπο για την κίνηση των ιστοφόρων πλοίων. Οι ιστορικές και αρχαιολογικές αναφορές υποστηρίζουν επίσης ότι αιολικές μηχανές (ανεμόμυλοι) χρησιμοποιήθηκαν και από άλλους αρχαίους λαούς, όπως: τους Κινέζους, τους Πέρσες και τους Αιγυπτίους. Κύριο υλικό κατασκευής τους ήταν το ξύλο, τα πανιά καθώς και ειδικές λιθόκτιστες κατασκευές. Για παράδειγμα στην Αίγυπτο διατηρούνται οι πέτρινες βάσεις ανεμόμυλων με ηλικία μεγαλύτερη των τριών χιλιάδων ετών,

ενώ σύμφωνα με τις ιστορικές μαρτυρίες, ήδη τον 7ο π.Χ. αιώνα στη Βαβυλωνία, ανεμόμυλοι έδιναν την απαραίτητη ενέργεια για την άρδευση της Μεσοποταμίας. Λέγεται μάλιστα ότι ο βασιλιάς Χαμμουραμί της Βαβυλωνίας, ήδη από τον 17ο αιώνα π.Χ. είχε συλλάβει κάποιο σχέδιο προκειμένου να αρδεύσει την πεδιάδα της Μεσοποταμίας με τη βοήθεια της αιολικής ενέργειας.

Παράλληλα αρχαιολογικές ανασκαφές στις αρχές του 20ου αιώνα στο Αφγανιστάν, έφεραν στο φως μεγάλες ποσότητες από ανεμόμυλους καθέτου άξονα στα Σίστρα και στην περιοχή της Βακτρίας, η οποία αποικίθηκε κυρίως από Έλληνες της Στρατιά του Μεγάλου Αλεξάνδρου. Σύμφωνα με τις υπάρχουσες ενδείξεις, οι χρησιμοποιούμενοι ανεμόμυλοι τόσο στη Βαβυλωνία (ο ανεμόμυλος των Περσών), όσο και στην Κίνα, ήταν κατακόρυφου άξονα. Αργότερα, τον 3<sup>ο</sup> π.Χ. αιώνα, ο Ηρών ο Αλεξανδρεύς, σχεδίασε τον πρώτο (κατά πάσα πιθανότητα) ανεμόμυλο οριζοντίου άξονα με τέσσερα πτερύγια.

Η χρήση των ανεμόμυλων για την άλεση των δημητριακών και την άρδευση συνεχίστηκε στις χώρες της Ανατολής, στη Μικρά Ασία και στο Αιγαίο και κατά τη Βυζαντινή εποχή. Στην Ευρώπη υποστηρίζεται ότι οι ανεμόμυλοι εμφανίστηκαν περίπου το 1200 μ.Χ., και μεταφέρθηκαν από τους σταυροφόρους κατά την επιστροφή τους. Η πρώτη γραπτή αναφορά των ευρωπαϊκών ανεμόμυλων οριζοντίου άξονα δίνεται σε ένα Γαλλικό φορολογικό έγγραφο του 1125 μ.Χ., ενώ το πρώτο γνωστό σκίτσο ευρωπαϊκού ανεμόμυλου βρίσκεται σε ένα εκκλησιαστικό Ψαλτήριο του 12ου αιώνα. Έτσι κατά την εποχή του Μεσαίωνα οι ανεμόμυλοι εμφανίζονται στην Ολλανδία, στην Ισπανία (ο θρύλος του Δον Κιχώτη-Don Quixote), στην Πορτογαλία, στη Γαλλία και στην Ιταλία. Στην Ολλανδία μάλιστα γύρω στο 1500 μ.Χ. οι ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν για την άντληση των νερών από τις περιοχές που βρίσκονται σε χαμηλότερη στάθμη από αυτήν της θάλασσας.

Ο τύπος του ανεμόμυλου που χρησιμοποιήθηκε στην Ευρώπη την εποχή του Μεσαίωνα, ήταν ως επί το πλείστον οριζοντίου άξονα με τέσσερα πτερύγια (περιστρεφόμενου κλωβού, περιστρεφόμενης οροφής). Οι κύριες χρήσεις του ήταν το άλεσμα των σιτηρών, το κόψιμο του καπνού, του ξύλου και άλλων γεωργικών προϊόντων, καθώς και η άντληση νερού για άρδευση ή αποξήρανση. Ένας άλλος τύπος ανεμόμυλου ο οποίος εξαπλώθηκε ιδιαίτερα την εποχή της Αναγέννησης και του αμερικανικού ονείρου, ήταν ο αργός πολύπτερος ανεμόμυλος, ο οποίος χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα για την άντληση νερού και ονομάζεται "Αμερικανικός ανεμόμυλος". Για την αποκατάσταση της ιστορικής αλήθειας, ο ανεμόμυλος αυτός προέρχεται από την Ευρώπη και χρησιμοποιήθηκε από τους αποίκους αρχικά στα ανατολικά παράλια της Αμερικής για την κίνηση αντλιών, με αποτέλεσμα να παρουσιάσει μεγάλη εξάπλωση. Τα σχέδια του ανεμόμυλου αυτού δημοσιεύθηκαν στη Λειψία το 1724 σε ένα βιβλίο του L. Jacob

με τίτλο "Schauplatz der Wasserkunste ". Παρόλα αυτά το Σικάγο γίνεται την περίοδο 1870 έως 1930 το κέντρο βιομηχανικής παραγωγής ανεμόμυλων, με εκτιμώμενη παραγωγή έξι εκατομμυρίων (6,000,000) μονάδων την περίοδο που προαναφέραμε.



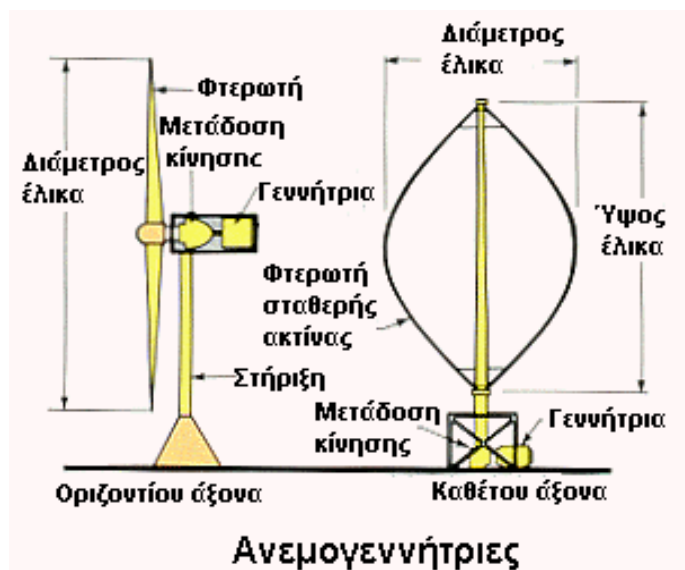
Εικόνα 1.1 Από τον ανεμόμυλο στον ανεμοκινητήρα

Στις αρχές του αιώνα μας πρώτοι οι Δανοί παράγουν ηλεκτρισμό από τον άνεμο, ενώ στην Αμερική ανεμόμυλοι μεταλλικής κατασκευής χρησιμοποιούνται επίσης για ηλεκτροδότηση. Έτσι το 1891 λειτούργησε στο Askov της Δανίας πειραματικός ανεμοκινητήρας με δυο ηλεκτρικές γεννήτριες (2x9kW) και διάμετρο 22.8m, κάτω από την επίβλεψη του καθηγητή P. La Cour. Αντίστοιχα τη δεκαετία του 1930 κατασκευάστηκε στη Βαλτική μηχανή 100kW, με σχεδιαστική επίβλεψη των Sabanin και Yuriev . Τέλος το 1940 κατασκευάζεται στο Vermont των Η.Π.Α. ένας πειραματικός δίπτερος ανεμοκινητήρας (ανεμογεννήτρια) σημαντικής ισχύος.

Στα χρόνια που ακολούθησαν το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, η χρήση της ατομικής ενέργειας και οι χαμηλές τιμές του πετρελαίου περιόρισαν δραστικά το ενδιαφέρον για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας. Όμως η ρύπανση του περιβάλλοντος και οι διαδοχικές ενεργειακές κρίσεις υποχρέωσαν ξανά τις τεχνολογικά ανεπτυγμένες χώρες να ενδιαφερθούν έντονα, γι' αυτή την καθαρή και αρχαία ενεργειακή πηγή του πλανήτη μας, τον άνεμο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### 2.1 Τύποι και υποσυστήματα ανεμοκινητήρων

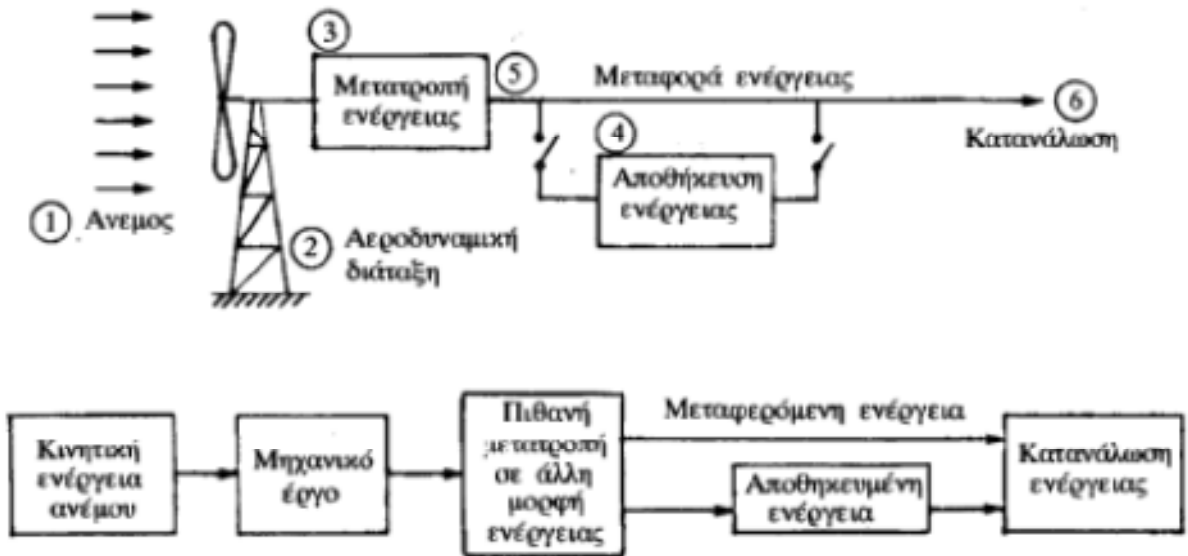


#### 2.1.1 Εισαγωγή

Ο ανεμοκινητήρας από την εποχή της εμφάνισής του μέχρι σήμερα έχει περάσει από πολλά στάδια εξέλιξης, τόσο ως προς τον τύπο του (οριζόντιου ή κατακόρυφου άξονα) όσο και ως προς τα υποσυστήματά του (περύγια, κιβώτια ταχυτήτων, πύργος, αυτοματισμοί, γεννήτρια κ.λπ.). Εξελίξεις έχουν επίσης σημειωθεί και στον τρόπο δέσμωσης, 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 αιολικής ενέργειας καθώς και της ροής ενέργειας παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1.





**Σχήμα 2.1:** Διάταξη εκμετάλλευσης αιολικής ενέργειας.

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 εγκατεστημένος ο ανεμοκινητήρας, δηλαδή απαιτείται η μεταφορά της δεσμευόμενης αιολικής ενέργειας. Σ' αυτήν την περίπτωση η πιο πρόσφορη διάταξη είναι εκείνη που μετατρέπει το μηχανικό έργο σε άλλη μορφή ενέργειας, που μπορεί να μεταφέρεται 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

αποθηκευμένη ενέργεια καλύπτει το ενεργειακό έλλειμμα που παρουσιάζεται, όταν η ισχύς του ανέμου πέφτει κάτω από ένα 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.λπ.).

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 σε άλλη πιο συμφέρουσα μορφή ενέργειας και βέλτιστο σχεδιασμό του συστήματος 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 έρευνα ή και βέλτιστη διάταξη αιολικής εγκατάστασης θα έχανε το μεγαλύτερο μέρος της αξίας της, αν στους στόχους της δεν είχε να καταστήσει την αιολική ενέργεια οικονομικά ανταγωνιστική με τις άλλες συμβατικές πηγές ενέργειας.

### 2.1.2 Τύποι συλλογής αιολικής ενέργειας

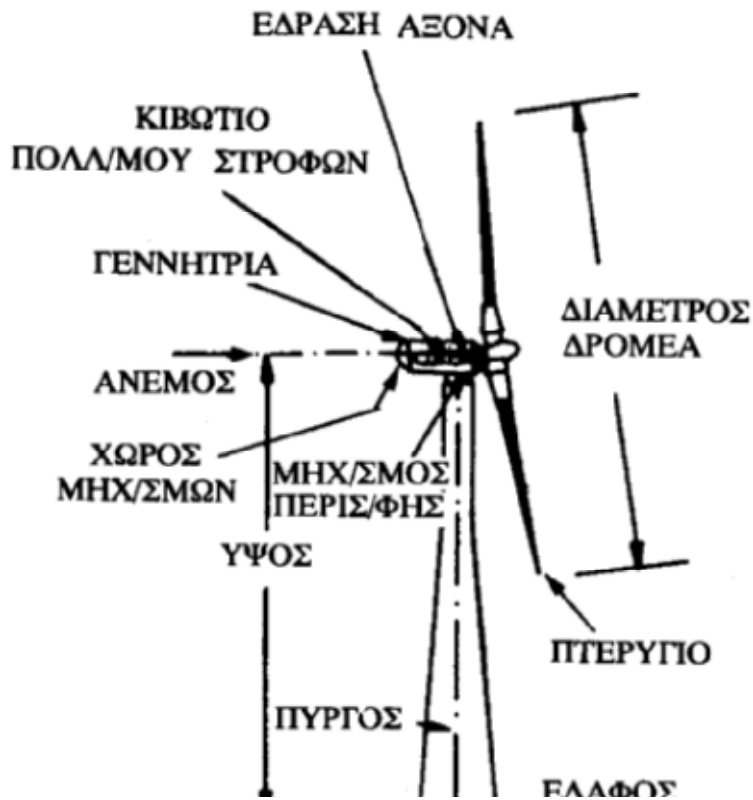
Λέγεται ότι μέχρι σήμερα έχουν επινοηθεί και εφαρμοστεί στην πράξη περισσότεροι τύποι ανεμοκινητήρων από οποιοδήποτε άλλο τύπο εφεύρεσης.

Οι ανεμοκινητήρες μπορούν να ταξινομηθούν συμφωνά με τον προσανατολισμό των αξόνων τους σε σχέση με την ροή του ανέμου σε:

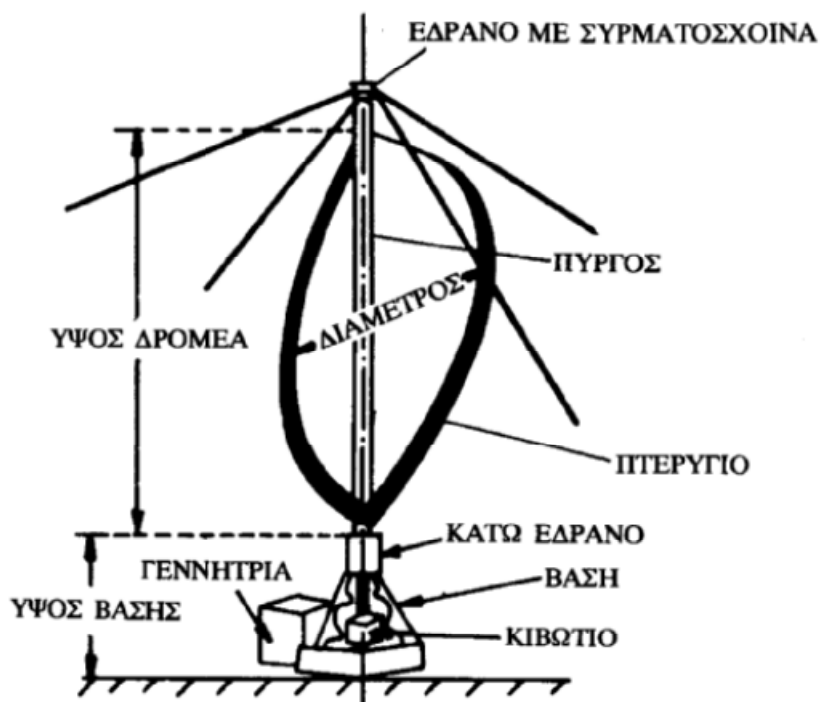
∅ Οριζόντιου άξονα, στους οποίους ο άξονας περιστροφής του δρομέα είναι παράλληλος προς την κατεύθυνση του ανέμου, σχήμα 2.2

∅ Οριζόντιου άξονα (Cross – Wind), στους οποίους ο άξονας περιστροφής είναι παράλληλος προς την επιφάνεια της γης αλλά κάθετος στην κατεύθυνση της ροής του ανέμου.

∅ Καθέτου άξονα στους οποίους ο άξονας περιστροφής είναι κάθετος στην επιφάνεια της γης και κάθετος στη ροή του ανέμου, σχήμα 2.3



Σχήμα 2.2: Ανεμοκνηστήρας οριζοντίου άξονα



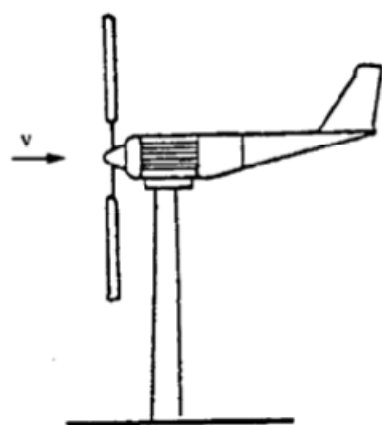
### Σχήμα 2.3: Ανεμοκινητήρας κατακόρυφου άξονα

Επίσης έχουν επινοηθεί και άλλοι τύποι ανεμοκινητήρων, όπως του τύπου μεταφοράς, στον οποίο υπάρχουν «μικρά» οχήματα που κινούνται σε μία καθορισμένη διαδρομή (τύπου σιδηροδρομικών βαγονιών) και είναι συνδεδεμένα με ηλεκτρογεννήτρια κ.λπ.

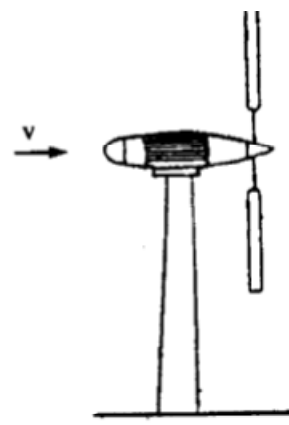
## 2.2 Τύποι και υποσυστήματα α/κ

### 2.2.1 Τυπικές μορφές Α/Κ οριζοντίου 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 ανεμοκινητήρες αυτού του τύπου μπορούν να έχουν το δρομέα μπροστά από τον πύργο (ανάντι) ή πίσω (κατάντι), **σχήμα 2.4** (α,β).



(α) Δρομέας ανάντι του πύργου



(β) Δρομέας κατάντι του πύργου

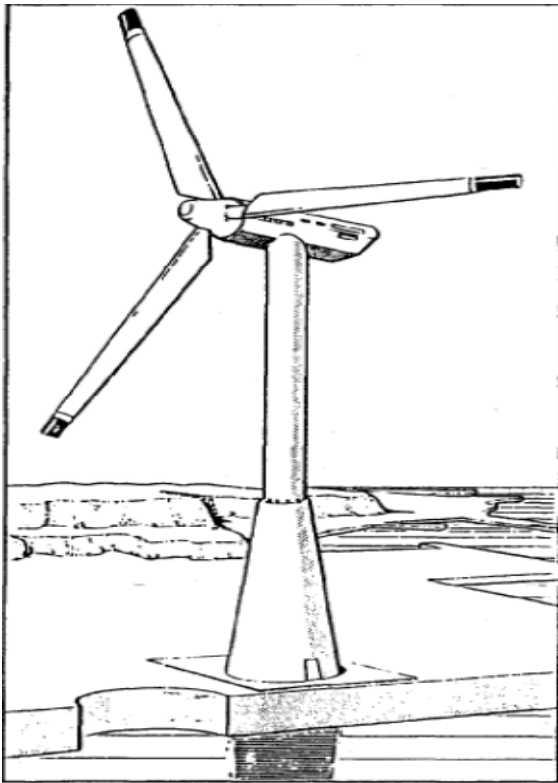
Σχήμα 2.4: (α)

(β)



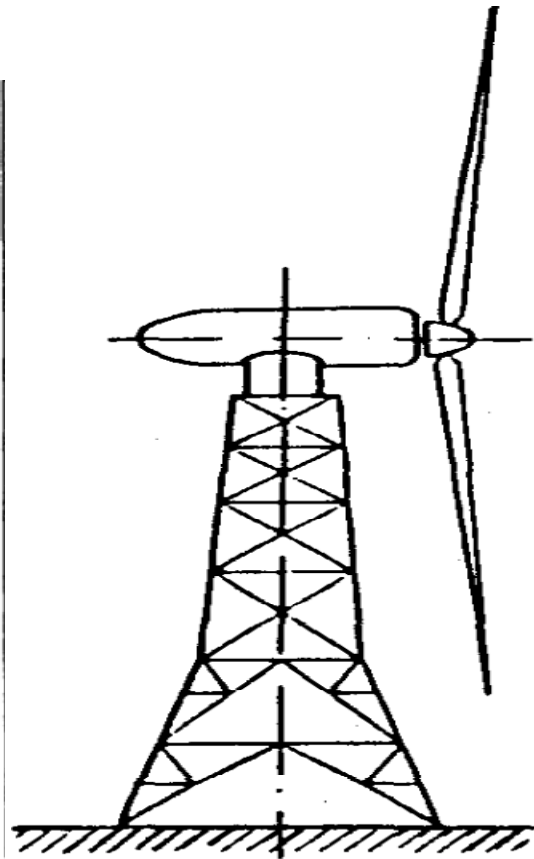
**Σχήμα 2.5:** Α/Κ με πτερύγιο προσανατολισμού

Για τη μεγιστοποίηση δέσμευσης της κινητικής ενέργειας του ανέμου απαιτείται όπως το επίπεδο του δρομέα του ανεμοκινητήρα να είναι κάθετο στην κατεύθυνση του ανέμου. Για το σκοπό αυτό στους μεν μικρής ισχύος ανεμοκινητήρες (και στον ανάντι τύπο) υπάρχει συνήθως πτερύγιο που ευθυγραμμίζει τον άξονα του δρομέα στον άνεμο (σχήμα 2.5), στους δε μεγάλους ανεμοκινητήρες εφαρμόζονται συστήματα αυτόματης ρύθμισης της σωστής θέσης του δρομέα ως προς τον άνεμο μέσω σερβομηχανισμού. Στους «μικρούς» ανεμοκινητήρες με το δρομέα κατάντι δεν τοποθετείται πτερύγιο προσανατολισμού γιατί το κουβούκλιο που καλύπτει τα εξαρτήματα της διάταξης μετατροπής της ενέργειας του δρομέα έχει τέτοιο σχήμα ώστε το ίδιο να αποτελεί πτερύγιοπροσανατολισμού, σχήμα 2.4β. Ο πύργος στήριξης του ανεμοκινητήρα μπορεί να είναι σωληνωτού τύπου, σχήμα 2.6, τύπου δικτυώματος, Σχήμα 2.7.



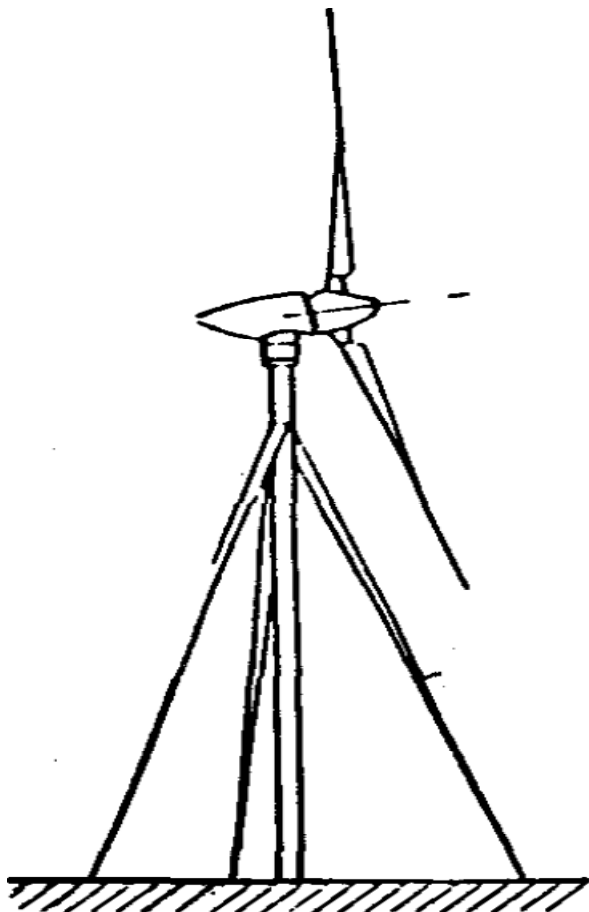
Σχήμα 2.6

Α/Κ Σωληνωτού τύπου



Σχήμα 2.7

Α/Κ Τύπου δικτυώματος

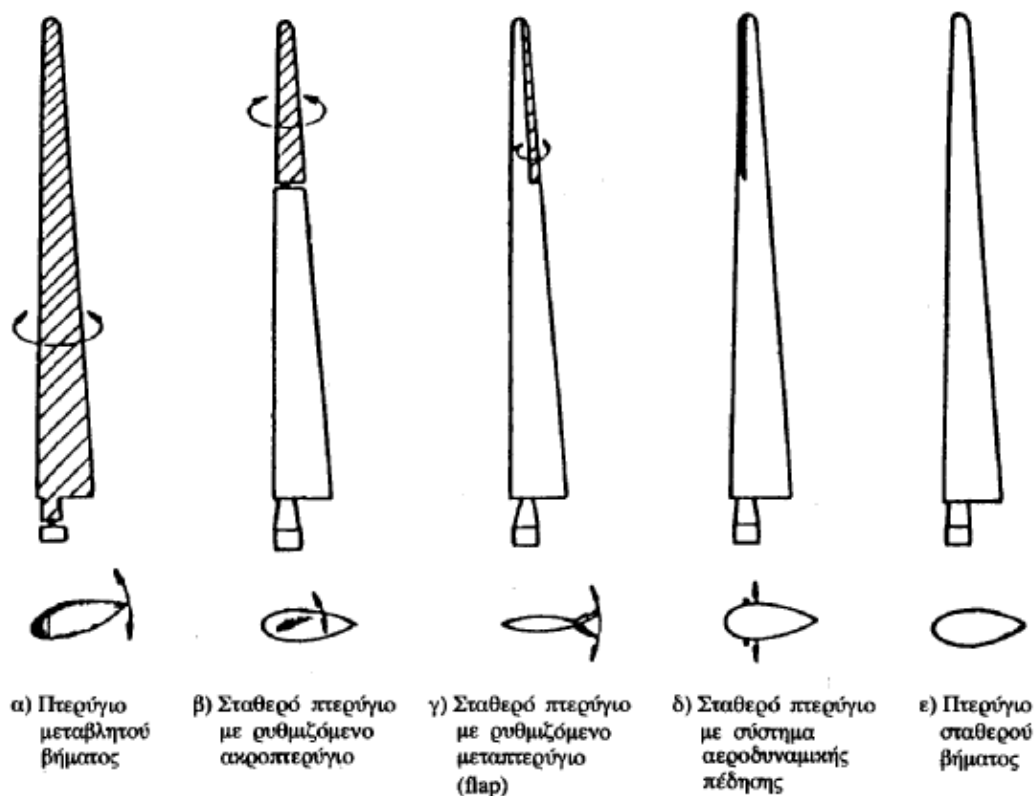


**Σχήμα 2.8:** Α/Κ Με στήριξη επιτόνων (λεπτής κολώνας)

Οι δύο αυτοί τύποι είναι αυτοστηριζόμενοι, ενώ ο τρίτος τύπος λεπτής κολώνας, Σχήμα 2.8, απαιτεί πρόσδεση με συρματόσχοινα. Ο δρομέας του ανεμοκινητήρα δεν πρέπει να ξεπερνάει κάποια μέγιστη γωνιακή ταχύτητα για λόγους προστασίας των πτερυγίων από μηχανικές καταπονήσεις που προέρχονται από φυγόκεντρες δυνάμεις.

Για την προστασία έναντι υπερτάχυνσης έχουν αναπτυχθεί διάφοροι αυτοματισμοί, όπως λειτουργία αεροπέδη στα ακροπτερύγια του δρομέα, γωνιακή στροφή του δρομέα ως προς τη διεύθυνση πνοής του ανέμου κ.λπ., σχήματα 2.9, 2.9β, 2.9γ, 2.9δ, και 2.9ε.





Σχήμα 2.9

(α)

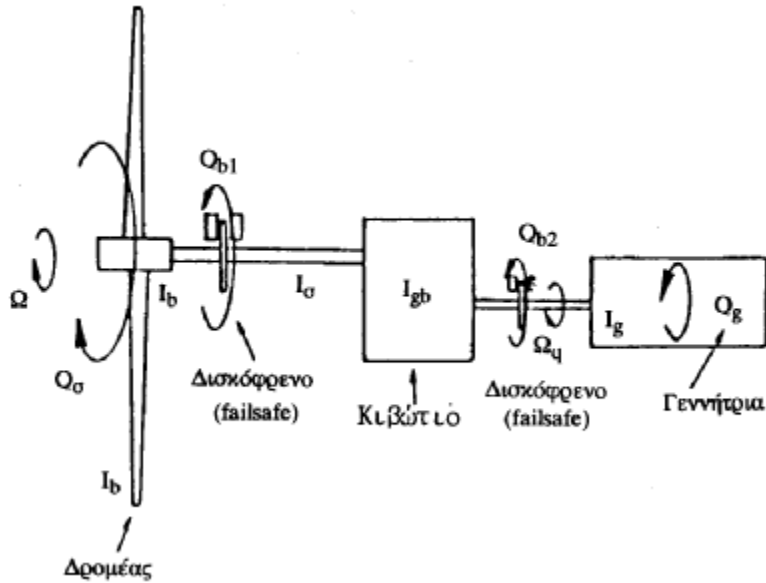
(β)

(γ)

(δ)

(ε)

Στην περίπτωση ανάγκης πέδησης του δρομέα είτε γιατί υπερταχύνθηκε ο δρομέας (π.χ. δεν λειτούργησε η αεροπέδη των ακροπτερυγίων) ή υπερβολική ταχύτητα ανέμου ή μηδενική ενεργειακή ζήτηση (π.χ. διακοπή ΔΕΗ), χρησιμοποιείται αυτόματη ενέργεια πέδη (fail safe) ασφάλειας αστοχίας τύπου δίσκου που ενεργεί είτε στον χαμηλόστροφο άξονα του δρομέα (πριν από το κιβώτιο ταχυτήτων) είτε στον υψηλόστροφο (μετά το κιβώτιο ταχυτήτων), σχ.2.10.



Σχήμα 2.10: Τυπική διάταξη κουβουκλίου A/K

Το σύστημα μετατροπής της μηχανικής ενέργειας του δρομέα σε άλλη μορφή ενέργειας, το οποίο στεγάζεται μέσα στο κουβούκλιο της μηχανής, συνήθως βρίσκεται πάνω στον πύργο του ανεμοκινητήρα, ενώ στις περιπτώσεις απ' ευθείας χρήσης της μηχανικής ενέργειας του δρομέα π.χ. για άντληση νερού, το κιβώτιο ταχυτήτων βρίσκεται κάτω στη βάση του πύργου και από την κορυφή του πύργου μέχρι κάτω κατεβαίνει ο άξονας κίνησης, συνήθως σε υψηλότερες στροφές απ' αυτές του δρομέα.

Κατά καιρούς έγιναν εισηγήσεις για συστήματα πολλών δρομέων πάνω σ' ένα πύργο, χωρίς όμως να τύχουν πρακτικής αξιοποίησης.

### 2.2.2 Τυπική μορφή A/K κατακόρυφου άξονα

Οι ανεμοκινητήρες αυτού του τύπου είναι κατασκευαστικά απλούστεροι του ανεμοκινητήρα οριζοντίου άξονα γιατί:

- Δεν απαιτούν πτερύγιο ή σύστημα αυτοματισμού για τον προσανατολισμό του δρομέα στη διεύθυνση πνοής του ανέμου.
- Το σύστημα μετατροπής της μηχανικής ενέργειας του δρομέα σε άλλη μορφή ενέργειας βρίσκεται στο έδαφος, στη βάση του ανεμοκινητήρα.

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

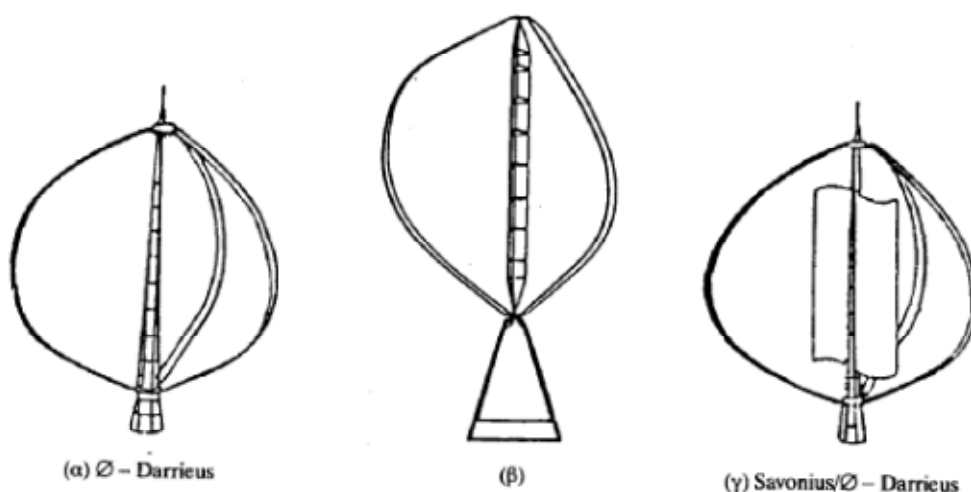
### 2.2.2.1 Χαρακτηριστικά Α/Κ κατακόρυφου άξονα τύπου Savonius

Οι ανεμοκινητήρες αυτού του τύπου που πρωτοπαρουσιάστηκαν το 1931. Τα βασικά χαρακτηριστικά τους είναι ο χαμηλός συντελεστής ισχύος, ο μικρός λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου «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» ο αριθμός των πτερυγίων (2,3 ή και περισσότερα), το σχήμα των πτερύγων κ.λ.π.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η απλότητα κατασκευής του δρομέα savonius φθάνει μέχρι το σημείο να μπορεί να κατασκευαστεί με ερασιτεχνικά μέσα, ακόμα και από βαρέλια πετρελαίου, έχει λοιπόν άμεσες δυνατότητες εφαρμογής για οικιακή χρήση ή για χρήση σε απομακρυσμένες περιοχές (π.χ. άντληση νερού από πηγάδια).

### 2.2.2.2 Χαρακτηριστικά ανεμοκινητήρα κατακόρυφου άξονα Darrieus



Σχήμα 2.11: Α/Κ τύπου DARRIEUS

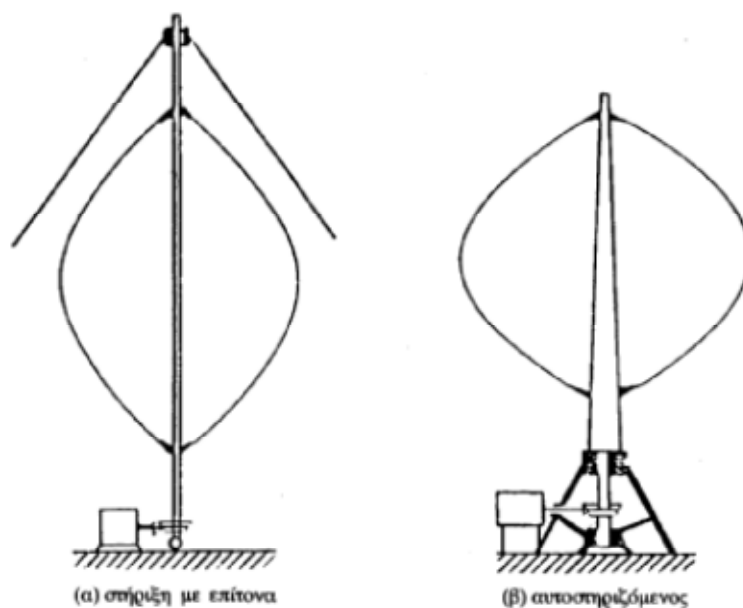
(α)

(β)

(γ)

Ο ανεμοκινητήρας τύπου DARRIEUS, (σχήμα 2.11), επινοήθηκε από τον Γάλλο G.J.M.Darrieus γύρω στα 1920 και έτυχε εκτεταμένης ανάπτυξης και εφαρμογής στον Καναδά, κυρίως στη δεκαετία του 1970 οπότε και έγινε ευρύτερα γνωστός. Ο ανεμοκινητήρας Darrieus είναι μηχανή που χαρακτηρίζεται από καμπυλωτά πτερύγια (Egg beater). Έχει σχετικά χαμηλή αρχική ροπή εκκίνησης και ως εκ τούτου έχει το μειονέκτημα να μη ξεκινάει μόνος του όταν φυσάει ο άνεμος. Συνδυασμός όμως ανεμοκινητήρα Darrieus και ενός μικρού Savonius επιλύει το τεχνολογικό αυτό πρόβλημα, (σχ. 2.11γ). Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μορφές ανεμοκινητήρων Darrieus, όπως :

- Με δύο η τρία πτερύγια, (σχήματα 2.11 α και 2.11 β)
- Με ευθύγραμμα πτερύγια ή
- Με σπαστά πτερύγια, για ρύθμιση ισχύος.



**Σχήμα 2.12:** Στήριξη A/K κατακόρυφου άξονα Darrieus

Ο άξονας περιστροφής του δρομέα αποτελεί συνήθως και τον πύργο στήριξης της αιολικής μηχανής. Συνηθέστερα ο πύργος αυτός προσδένεται και με συρματόσχοινα, ενώ τώρα τελευταία κατασκευάζονται πύργοι αυτοστηριζόμενοι, (σχήμα 2.12). Τα λοιπά υποσυστήματα του ανεμοκινητήρα κατακόρυφου άξονα, ως τοκιβώτιο ταχυτήτων, σύστημα πέδησης αξόνων, γεννήτρια κ.λπ. δεν διαφέρουν ως προς το σκεπτικό επιλογής των από τα υποσυστήματα του ανεμοκινητηραοριζοντίου άξονα.

Οι προηγούμενοι τρεις τύποι ανεμοκινητήρων είναι αυτοί που ουσιαστικά έχουν επιβληθεί για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας. Πρωταρχικός παράγοντας για τη βελτιστοποίηση της αιολικής διάταξης είναι το ποσό της ενέργειας, ανά μονάδα κόστους του συστήματος, το οποίο παράγεται σε μία δεδομένη ταχύτητα του ανέμου και αυτό ίσως είναι το μοναδικό κριτήριο επιλογή του βέλτιστου τύπου ανεμοκινητήρα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ Α/Γ & ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

#### 3.1 Εισαγωγή

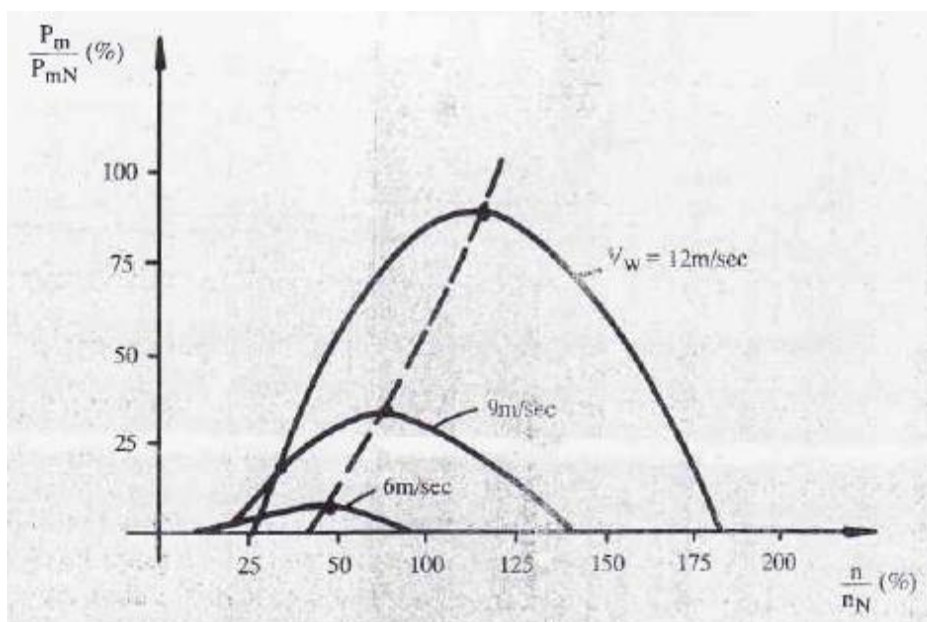
Η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί την προσφορότερη για χρήση μορφή ενέργειας. Ως εκ τούτου, για να αξιοποιήσουμε την αιολική ενέργεια, επιδιώκουμε τη μετατροπή της σε ηλεκτρική.

Η παραγόμενη από τον άνεμο ηλεκτρική ενέργεια, μπορεί να χρησιμοποιείται σε αυτόνομα συστήματα, όπως η ηλεκτροδότηση ενός αγροκτήματος. Τότε προκύπτει θέμα αποθηκεύσεως (που δεν ενδείκνυται οικονομικά για μεγάλες ισχύεις) ή συνεργασίας με άλλες συμβατικές πηγές (π.χ. ντιζελογεννήτριες) ώστε να υπάρχει η δυνατότητα συνεχούς καλύψεως των αναγκών. Συνήθως η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ).

Η χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας, απαιτεί την παραγωγή της υπό σταθερή τάση και συχνότητα, παρά τη συνεχή αστάθεια του ανέμου. Επίσης, όταν οι ανεμογεννήτριες λειτουργούν παράλληλα με τα ΣΗΕ, συνδεδεμένες συνήθως στο δίκτυο διανομής αυτών, δεν πρέπει να δημιουργούν μεγάλες διαταραχές στην τάση και στη συχνότητά τους.

Η σταθερότητα της συχνότητας στις μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικές πηγές, επιτυγχάνεται με τον έλεγχο των στροφών της κινητήριας μηχανής, μέσω του ελέγχου της παροχής καυσίμου, με κατάλληλους ρυθμιστές στροφών. Αντίθετα, στις Α/Γ οι στροφές πρέπει να προσαρμόζονται έτσι ώστε να είναι δυνατή η κατά το δυνατόν μεγαλύτερη μετατροπή από την διατιθέμενη ενέργεια του ανέμου και ταυτόχρονα να εξασφαλίζεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας υπό σταθερή συχνότητα και τάση.

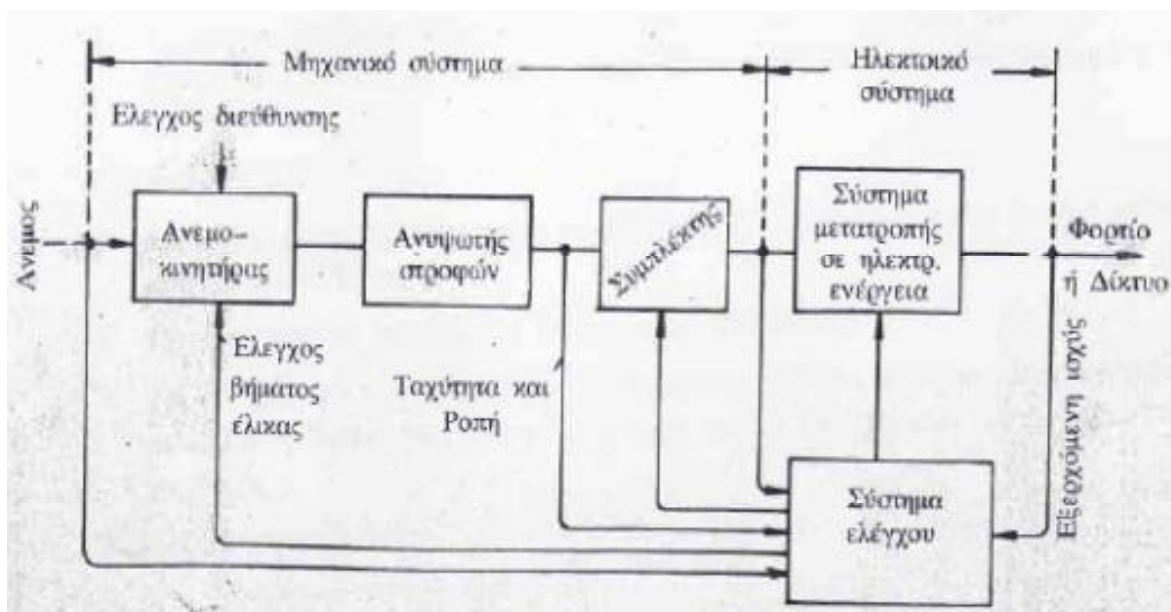
Η μεταβολή της παραγόμενης μηχανικής ισχύος μιας α/γ( $P_m$ ) συναρτήσει των στροφών της( $n$ ), φαίνεται για τρεις τιμές ταχύτητας ανέμου (6,9,12 m/s) στο σχήμα 3.1.



**Σχήμα 3.1:Μεταβολή μηχανικής ισχύος κινητήρα με τις στροφές**

Η διακεκομμένη γραμμή, μας δείχνει την καμπύλη που πρέπει να ακολουθήσει η α/γ, προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη εκμετάλλευση της ταχύτητας του ανέμου, δηλαδή να προσαρμόζει τις στροφές της ( $n$ ) σε αυτήν. Εκτός από τη μέγιστη εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού, πρέπει να παράγεται ενέργεια με σταθερή τάση και συχνότητα.

Τα βασικά στοιχεία μιας α/γ, καθώς και οι τρόποι ελέγχου φαίνονται στο διάγραμμα του σχήματος 3.2.



Σχήμα 3.2:διάγραμμα στοιχείων και ελέγχου μιας Α/Γ

Από τους ελέγχους του μηχανικού συστήματος, ο σημαντικότερος είναι ο έλεγχος βήματος της έλικας. Σχετικά με το συμπλέκτη, αναφέρουμε ότι χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι συμπλεκτών (υδραυλικοί και συμπλέκτες δινορευμάτων), με τους οποίους επιδιώκουμε απόσβεση των απότομων μεταβολών της ροπής.

Η υφιστάμενη σήμερα τάση, είναι ο κατά το δυνατόν περιορισμός και απλούστευση του μηχανικού μέρους και η αντιμετώπιση των προβλημάτων ελέγχου με το ηλεκτρικό τμήμα της α/γ. Αυτό γιατί με τη σημερινή εξέλιξη της τεχνολογίας, με ηλεκτρικά συστήματα ο έλεγχος μπορεί να είναι ακριβέστερος, ταχύτερος και περισσότερο αξιόπιστος, παρά με μηχανικά συστήματα. Συχνά όμως, σε μεγάλες κυρίως α/γ, ο χονδρικός έλεγχος γίνεται με μηχανικά συστήματα και ο λεπτομερής έλεγχος με ηλεκτρικά.

### 3.2 Συστήματα μετατροπής σε ηλεκτρική ενέργεια

Σαν συστήματα μετατροπής σε ηλεκτρική ενέργεια, ονομάζουμε τις μηχανές και τους υπόλοιπους μηχανισμούς μετατροπής και ελέγχου, με τα οποία επιτυγχάνουμε τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Μπορούμε να κατατάξουμε τα συστήματα αυτά, ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους, ή τα χαρακτηριστικά της εξόδου τους, σε:

(α) Συστήματα Σταθεράς Ταχύτητας-Σταθεράς Συχνότητας (ΣΤΣΣ)

(β) Συστήματα Μεταβλητής Ταχύτητας-Σταθεράς Συχνότητας (ΜΤΣΣ).

Τα (ΜΤΣΣ) πλεονεκτούν λειτουργικά έναντι των (ΣΤΣΣ), κοστίζουν όμως περισσότερο και είναι πιο πολύπλοκα. Η επιλογή του κάθε συστήματος, καθώς και τα πλεονεκτήματα του καθενός έναντι του άλλου, εξαρτώνται από τις συνθήκες ανέμου σε συγκεκριμένη τοποθεσία (θέση εγκατάστασης). Τα ΜΤΣΣ μειονεκτούν έναντι των ΣΤΣΣ σε σταθερές συνθήκες ανέμου. Ενώ αντίστοιχα τα ΣΤΣΣ μειονεκτούν με έντονες αλλαγές της ταχύτητας του ανέμου. Αναλύοντας τα ΣΤΣΣ και ΜΤΣΣ, έχουμε:

∅ Στα ΣΤΣΣ:

- i. Τις σύγχρονες γεννήτριες
- ii. Τις ασύγχρονες γεννήτριες, με περιορισμό τη μεταβολή των στροφών τους από 1 έως 5%

∅ Στα ΜΤΣΣ:

- i. Τις σύγχρονες ή ασύγχρονες γεννήτριες που συνδέονται στο δίκτυο μέσω μετατροπέα AC-DC-AC.
- ii. Τις ασύγχρονες γεννήτριες διπλής τροφοδοτήσεως
- iii. Τις σύγχρονες γεννήτριες με διαμόρφωση πεδίου, δηλαδή με τροφοδότηση του τυλίγματος διέγερσης με ρεύμα χαμηλής, ελεγχόμενης συχνότητας .
- iv. Τις γεννήτριες ΣΡ
- v. Τις γεννήτριες ΕΡ με συλλέκτη

Συνήθως σήμερα, χρησιμοποιούνται οι μηχανές i, ii και iii, λόγω του ότι χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά ισχύος και αυτά είναι οικονομικά, αλλά και ταχέως αναπτυσσόμενα.

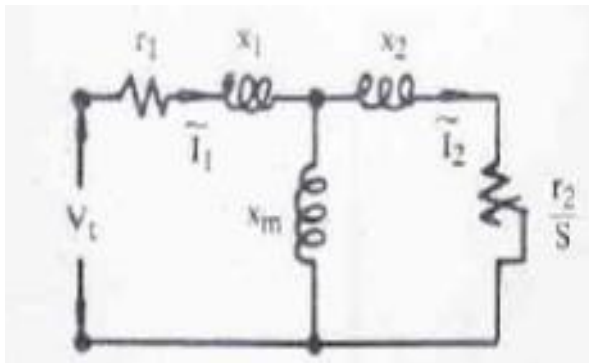
### 3.2.1 Ασύγχρονες γεννήτριες

Στις Α/Γ μέσου ή μικρού μεγέθους ( $\leq 300\text{KW}$ ), χρησιμοποιούνται ασύγχρονες μηχανές με κλωβό, λόγω της στιβαρότητας και του μικρού τους κόστους. Στις Α/Γ μεγάλης ισχύος ( $\geq 1\text{MW}$ ), χρησιμοποιούνται ασύγχρονες γεννήτριες με δακτυλίους, με τις οποίες κάνουμε και έλεγχο στροφών.

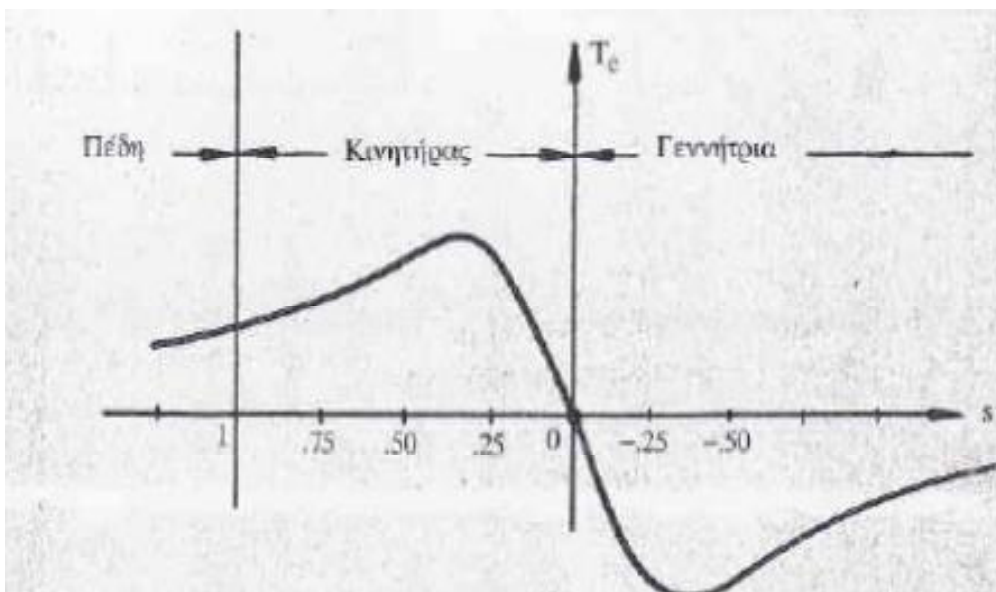
#### 3.2.1.1 Χαρακτηριστικά λειτουργίας

Στο παρακάτω σχήμα (3.3) βλέπουμε το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα της ασύγχρονης γεννήτριας (3.3,α) και το διάγραμμα της ηλεκτρομαγνητικής ροπής-ολίσθησης ( $T_e-s$ ) (3.3,β).





Σχήμα 3.3(α): Ισοδύναμο κύκλωμα ασύγχρονης γεννήτριας



Σχήμα 3.3(β): Διάγραμμα Η/Μ ροπής-ολίσθησης  $T_e-s$

Έστω  $\omega_s$  η ταχύτητα περιστροφής του πεδίου στο στάτη και  $\omega_r$  ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Τότε έχουμε:

$$s = \frac{W_s - W_r}{W_s} = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (3.1)$$

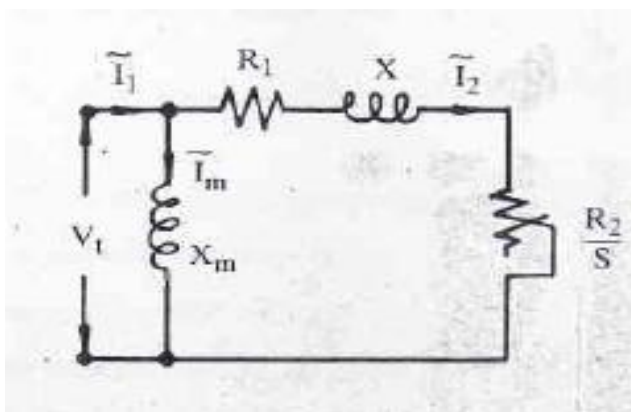
όπου  $n_s$  και  $n_r$  οι αντίστοιχες στροφές ανά λεπτό:

$$\omega_s = 2\pi \frac{n_s}{60} \quad \text{και} \quad \omega_r = 2\pi \frac{n_r}{60} \quad (3.2)$$

$$\text{Επίσης έχουμε: } T_e = \frac{1}{\omega_s} \times \frac{3V_{1a}}{\left[R_e + \frac{r_2}{s}\right]^2 + (x_e + x_2)^2} \quad (3.3)$$

Το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 3.3(α), μπορεί να απλουστευθεί στο ισοδύναμο του σχήματος 3.4 από το οποίο προκύπτει:

$$\tilde{I}_2 = \frac{V_t}{R_1 + \frac{R_2}{s} + jX} \quad , \quad \tilde{I}_m = \frac{V_t}{jX_m} \quad , \quad \tilde{I}_1 = \tilde{I}_m + \tilde{I}_2 \quad (3.4)$$



Σχήμα 3.4: Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα

$$\text{Και: } T_e = \frac{3}{\omega_s} \frac{R_2}{s} I_2^2 = \frac{3}{\omega_s} \frac{V_t^2 \frac{R_2}{s}}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + X^2} \quad (3.5)$$

Για μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, έχουμε τα παραπάνω ισοδύναμα κυκλώματα. Ισχύουν όμως και για την ανάλυση των μηχανικών ταλαντώσεων των μηχανών, με αμνητέες τριβές. Ισχύει δηλαδή:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_e$$

(3.6)

Όπου: J: η ροπή αδράνειας των στρεφόμενων στοιχείων της Α/Γ

$\omega_r$ : η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής

$T_e$ : η ηλεκτρική αντί-ροπή της γεννήτριας

$T_m$ : η μηχανική ροπή της Α/Γ

Η μηχανική ροπή προκύπτει από τη σχέση:

$$T_m = \frac{1}{2} C_p \rho \frac{\pi R^2}{\omega_r} v_w^3$$

(3.7)

Και η αντίστοιχη μηχανική ισχύς:

$$P_m = \omega_r T_m = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 v_w^3$$

(3.8)

Όπου:  $C_p$ : αεροδυναμικός συντελεστής

$\rho$ : πυκνότητα του αέρα

R: ακτίνα της έλικας

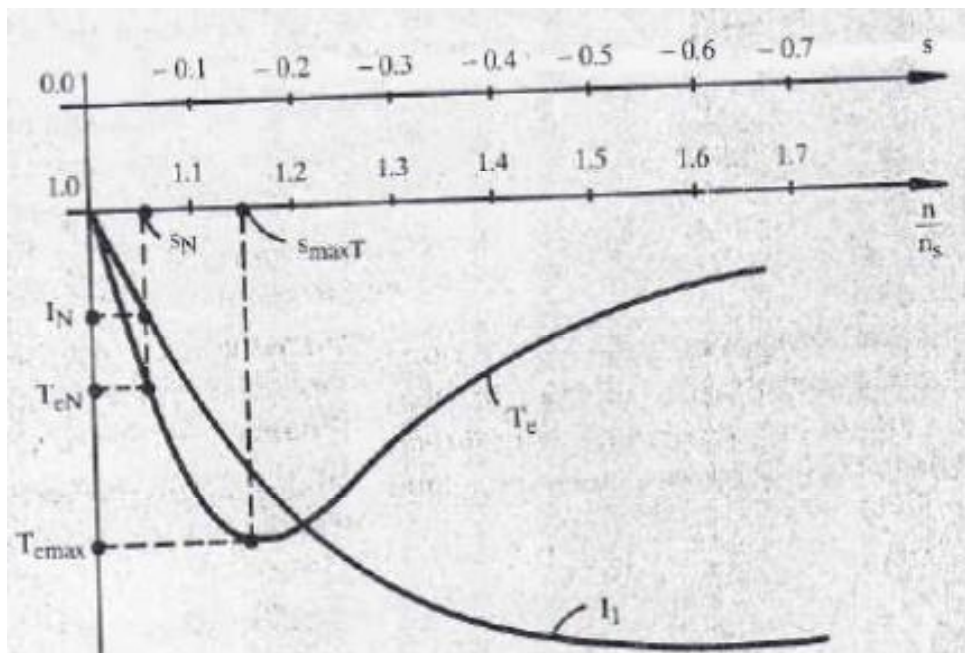
$v_w$ : ταχύτητα του ανέμου

Ο  $C_p$  δίνεται από τον κατασκευαστή, συναρτήσει του παράγοντα:

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v_w} = \frac{2\pi n_r}{60} \cdot \frac{R}{v_w}$$

(3.9)

Βλέπουμε στο διάγραμμα του παρακάτω σχήματος (3.5) τη μεταβολή της ηλεκτρομαγνητικής ροπής ( $T_e$ ) και της απορροφούμενης εντάσεως  $I_{\text{ισαν}}$  συνάρτηση των στροφών της γεννήτριας.



Σχήμα 3.5: Μεταβολή ροπής και έντασης

Η  $T_e$  παρουσιάζει μέγιστη τιμή, που φαίνεται από τους παρακάτω τύπους αντίστοιχα με τα ισοδύναμα κυκλώματα των σχημάτων 3.3(α) και 3.4.:

$$T_{e_{\max}} = \frac{1}{\omega_s} \frac{1,5 V_{1a}^2}{R_e - \sqrt{R_e^2 + (X_e + X_f)^2}} \quad \text{ή} \quad \frac{1}{\omega_s} \frac{1,5 V_1^2}{R_1 - \sqrt{R_1^2 + X^2}} \quad (3.10)$$

Η οποία επέρχεται για τιμή ολίσθησης:

$$s_{\max T} = \frac{r_f}{\sqrt{R_2^2 + (X_e + X_f)^2}} \quad \text{ή} \quad -\frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + X^2}} \quad (3.11)$$

Επίσης στο διάγραμμα του σχήματος 3.5, βλέπουμε τις ονομαστικές τιμές λειτουργίας  $T_{eN}$  και  $I_N$  με ολίσθηση της γεννήτριας  $-s_N$ . Η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς, θα είναι:

$$P_e = T_e \omega_r = T_e (1 - s) \omega_s \quad (3.12)$$

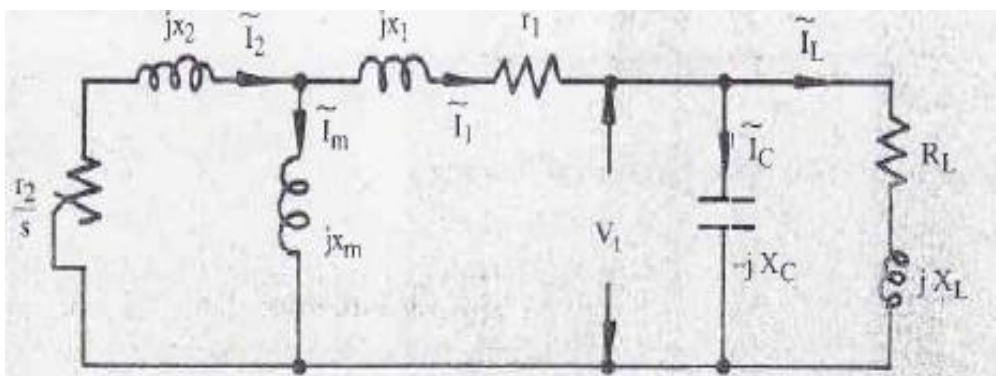
Η Α/Γ λειτουργεί μονίμως σε μεταβατική κατάσταση, λόγω της διαρκούς μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου. Η μεταβολή αυτή, έχει σαν συνέπεια την αντίστοιχη μεταβολή της μηχανικής ροπής ( $T_m$ ). Δηλαδή, σε μια αύξηση της ταχύτητας του ανέμου, θα τείνει να αυξηθεί και η ταχύτητα περιστροφής. Αν η λειτουργία της γεννήτριας γίνεται με ολίσθηση μικρότερη από την  $S_{\max T}$ , θα υπάρχει αύξηση της ηλεκτρικής αντί-ροπής της γεννήτριας ( $T_e$ ), άρα και τάση επιβραδύνσεως της μηχανής, έτσι ώστε όταν η  $T_m$  σταθεροποιηθεί, θα έχουμε ισορροπία της μηχανής σε νέα κατάσταση με μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής και αύξηση της εντάσεως  $I_1$ . Αν η μηχανική ροπή υπερβεί την  $T_{e\max}$  της γεννήτριας, η μηχανή θα επιταχυνθεί, για λειτουργία πέραν της  $S_{\max T}$ . Αυτό συνεπάγεται και αντίστοιχη αύξηση της ηλεκτρικής αντί-ροπής, άρα μεγάλη επιτάχυνση της μηχανής. Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου, πρέπει η μηχανή να απομονωθεί άμεσα από το δίκτυο, διότι κινδυνεύει η μηχανή από υπερένταση και η Α/Γ από υπερτάχυνση και για να αποφευχθεί αυτό, παρεμβαίνουμε στο μηχανικό μέρος του συστήματος.

### 3.2.1.2 Αντιστάθμιση άεργου ισχύος- Αυτοδιέγερση

Στη σύγχρονη γεννήτρια και στη γεννήτρια Σ.Ρ., το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, δημιουργείται από το τύλιγμα διέγερσης. Στην ασύγχρονη γεννήτρια αντίθετα, έχουμε το μειονέκτημα ότι δεν παράγει την άεργο ισχύ που απαιτείται για την εγκατάσταση του ηλεκτρομαγνητικού της πεδίου. Στην περίπτωση που η Α/Γ λειτουργεί παράλληλα με το δίκτυο, αυτό τροφοδοτεί με άεργο ισχύ τη γεννήτρια, ενώ αν η γεννήτρια τροφοδοτεί ανεξάρτητο φορτίο, η άεργος ισχύς πρέπει να δοθεί από εξωτερική πηγή. Μια καλή λύση για το ρόλο της εξωτερικής πηγής, αποτελούν οι στατοί πυκνωτές, που χρησιμεύουν και για τη βελτίωση του συντελεστή ισχύος των εγκαταστάσεων.

Για να μπορέσουμε να αναλύσουμε τον τρόπο αυτοδιέγερσης μιας ασύγχρονης μηχανής, θεωρούμε ότι έχουμε συνδέσει τρεις πυκνωτές κατ' αστέρα, με χωρητικότητα  $C$  ανά φάση.

Στο παρακάτω σχήμα (3.6), βλέπουμε το ισοδύναμο κύκλωμα, όπου φαίνονται ανά φάση η σύνθετη αντίσταση  $Z_L=R_L+jX_L$  και ο πυκνωτής με χωρητική αντίσταση  $X_C=1/\omega C$ .



Σχήμα 3.6: Ισοδύναμο ασύγχρονης γεννήτριας με πυκνωτές & φορτίο

Για μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, έχουμε:

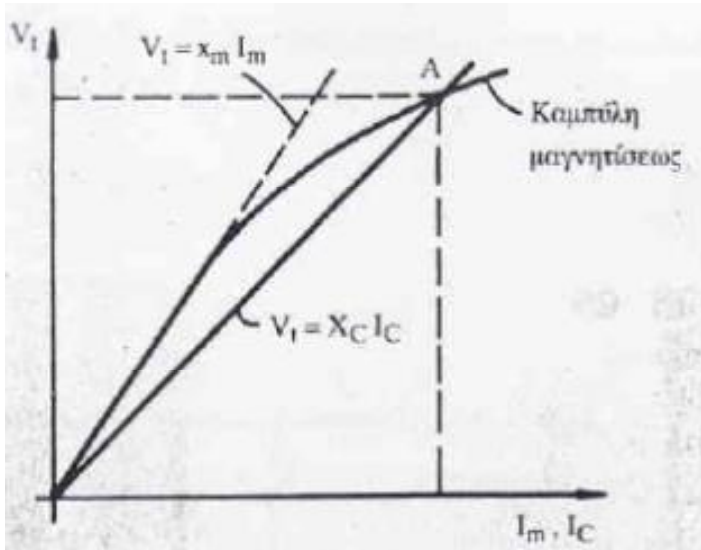
$$\tilde{I}_1 = \tilde{I}_c + \tilde{I}_L \quad \text{ή} \quad \frac{V_1}{z_g} = j \frac{V_1}{X_c} + \frac{V_1}{R_L + jX_L} \quad (3.13)$$

Όπου  $z_g$  η σύνθετη αντίσταση της γεννήτριας για συγκεκριμένη ολίσθηση  $s$ .

Η σχέση 3.13, απλουστεύεται στη σχέση 3.14 που φαίνεται παρακάτω, αν λάβουμε υπόψη ότι η σύνθετη αντίσταση του τυλίγματος του στάτη  $r_1 + jX_1$  είναι πολύ μικρότερη από την αντίσταση του φορτίου και του πυκνωτή και ότι κατά την κανονική λειτουργία, το  $s$  έχει μικρές τιμές, άρα το  $r_2/s$  είναι πολύ μεγαλύτερο του  $X_2$ . Επομένως, μπορούμε με μικρό σφάλμα να παραλείψουμε τα  $r_1 + jX_1$  και  $X_2$ .

$$X_c = \frac{x_m (R_L^2 + X_L^2)}{R_L^2 + X_L^2 + x_m X_L}, \quad s = - \frac{r_2 R_L}{R_L^2 + X_L^2} \quad (3.14)$$

Με την προηγούμενη ανάλυση, δεν λάβαμε υπόψη τον κορεσμό του μαγνητικού κυκλώματος της μηχανής, δηλαδή θεωρήσαμε ότι η  $X_m$  είναι σταθερή και ανεξάρτητη της  $V_1$ . Στο διάγραμμα του παρακάτω σχήματος (3.7), φαίνεται με απλό τρόπο το φαινόμενο της αυτοδιέγερσης, όπου λαμβάνεται υπόψη ο κορεσμός.



**Σχήμα 3.7: αυτοδιέγερση ασύγχρονης μηχανής**

Εδώ η «καμπύλη μαγνητίσεως», μας δίνει τη μεταβλητή τιμή της  $X_m$ , πέρα από μια τιμή της  $I_m$  και για τον πυκνωτή είναι  $X_C = V_t / I_C$ , μια ευθεία γραμμή. Το σημείο λειτουργίας, είναι το σημείο A, για το οποίο πληρούται η σχέση 3.13. Η καμπύλη μαγνητίσεως καθορίζει την αυτοδιέγερση της μηχανής. Η ισχύς του πυκνωτή (που είναι αντιστρόφως ανάλογη του  $X_C$ ), καθορίζει και την επιτυγχανόμενη τάση  $V_t$ . Για  $X_L = 0$ , η ολίσθηση είναι :

$$(3.15) \quad s = -\frac{r_2}{R_L}$$

Και η ταχύτητα περιστροφής είναι:

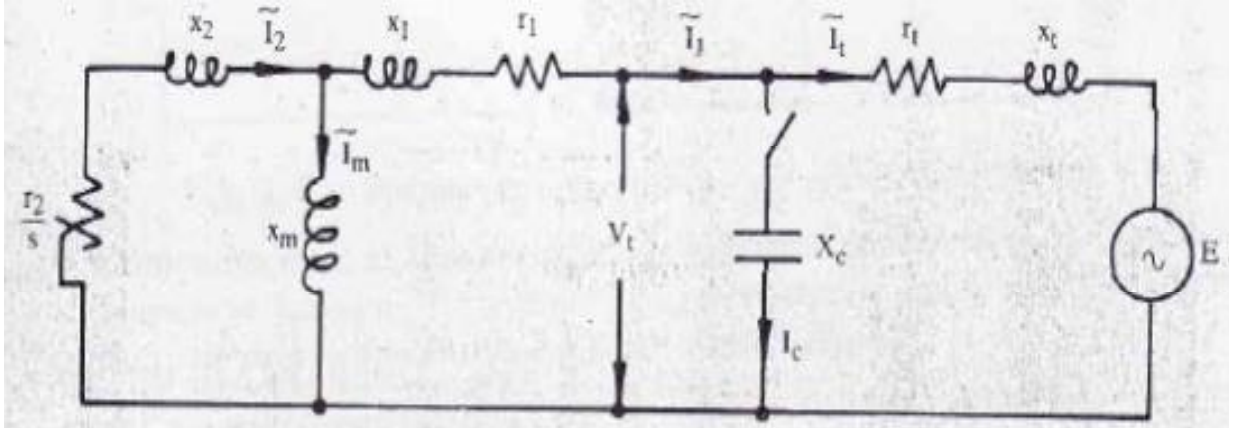
$$(3.16) \quad \omega_r = (1 - s) \omega_s = \left(1 + \frac{r_2}{R_L}\right) \frac{1}{X_C C}$$

Το μέγεθος των στατών πυκνωτών, καθορίζεται από την αυτοδιέγερση της ασύγχρονης γεννήτριας.

Κατά την παράλληλη λειτουργία με το δίκτυο, το μέγεθος του πυκνωτή, το καθορίζει το ποσό της άεργου ισχύος που απορροφά το δίκτυο, το οποίο δεν πρέπει να ξεπερνά μία καθορισμένη από τις ηλεκτρικές επιχειρήσεις τιμή. Επίσης, κατά την παράλληλη λειτουργία, μπορεί να δημιουργηθούν προβλήματα σε περίπτωση διακοπής της σύνδεσης με το δίκτυο, ενώ η Α/Γ εξακολουθεί να δουλεύει. Τότε η λειτουργία της Α/Γ, μπορεί να γίνεται με τάση και συχνότητα διαφορετική από αυτή του δικτύου, με αποτέλεσμα να προκαλέσει ζημιές στους συνδεδεμένους καταναλωτές. Τότε η Α/Γ τίθεται άμεσα εκτός λειτουργίας, μέσω των διατάξεων προστασίας.

### 3.2.1.3 Παράλληλη λειτουργία με το δίκτυο

Το κύκλωμα του παρακάτω σχήματος (3.8) παριστάνει το ισοδύναμο της σύνδεσης της Α/Γ στο δίκτυο



Σχήμα 3.8: Παράλληλη λειτουργία Α/Γ με το δίκτυο

Όπου:  $Z_t = r_t + jx_t$ : Σύνθετη αντίσταση

$V_t$ : Τάση ακροδεκτών ασύγχρονης γεννήτριας

$I_t$ : Ένταση παρεχόμενη προς το δίκτυο

Και ισχύει:  $V_t = E + I_t * Z_t$

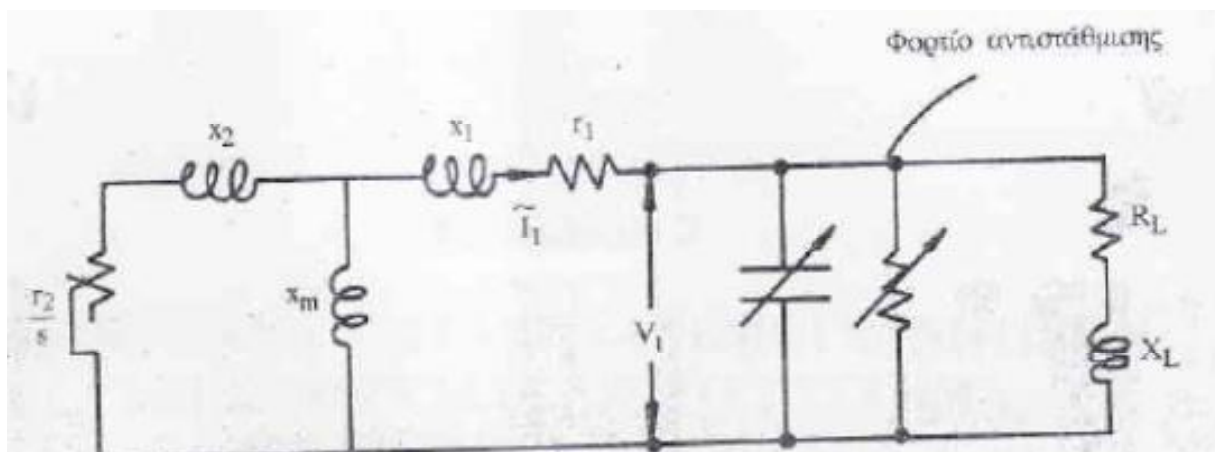
Η τάση  $V_t$  θα πρέπει να κυμαίνεται μέσα σε ορισμένα όρια, για αποφυγή ανωμαλιών στους καταναλωτές του δικτύου.

### 3.2.1.4 Αυτόνομη λειτουργία

Στην αυτόνομη λειτουργία, επιβάλλεται η χρήση πυκνωτών (όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8) με χωρητικότητα αρκετή ώστε να έχουμε αυτοδιέγερση.

Προκειμένου να έχουμε σταθερή τάση και συχνότητα στο φορτίο, με μεταβαλλόμενη ταχύτητα ανέμου, μηχανική ροπή ή και μεταβαλλόμενο φορτίο, πρέπει να αλλάξουν οι τιμές κάποιων στοιχείων του κυκλώματος, με τη μεταβολή των πυκνωτών, ή με τη μεταβολή μιας μεταβαλλόμενης αντίστασης τοποθετημένης παράλληλα σε φορτίο και πυκνωτές (σχήμα 3.9). Η αντίσταση αυτή ονομάζεται «φορτίο αντισταθμίσεως».





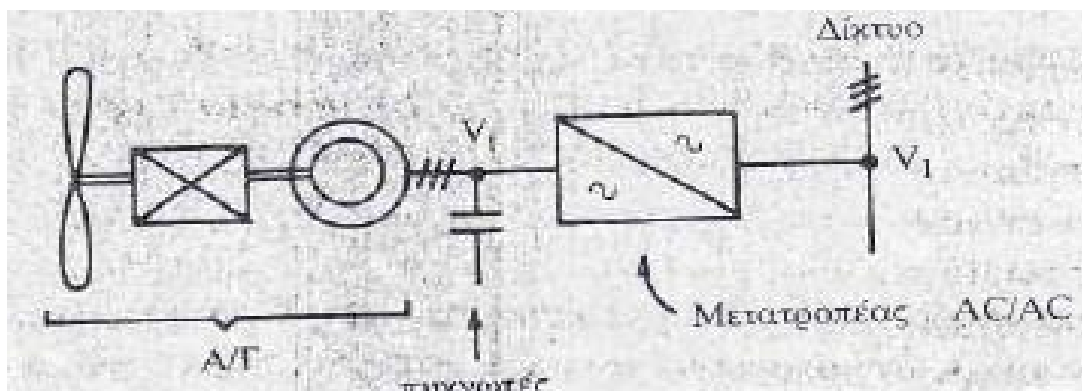
Σχήμα 3.9: Ανεξάρτητη λειτουργία με φορτίο αντιστάθμισης

Λόγω των απωλειών ενέργειας που προκύπτει από την ωμική μεταβλητή αντίσταση, χρησιμοποιούμε μια διάταξη ανορθωτή-συσσωρευτών για να αποθηκεύεται η ενέργεια. Με τη διάταξη αυτή, έχουμε ρύθμιση στροφών και όχι της τάσης. Επίσης, η διάταξη αυτή έχει εφαρμογή σε αυτόνομες μονάδες μικρής ισχύος υποστηριζόμενες από δηζελοηλεκτρικές μηχανές.

### 3.2.1.5 Παρεμβολή μετατροπέα AC-AC στο στάτη

Με την άμεση σύνδεση της ασύγχρονης γεννήτριας στο δίκτυο, δεν έχουμε τη δυνατότητα προσαρμογής της λειτουργίας της, ως προς την ταχύτητα του ανέμου, ώστε να επιτυγχάνονται τα πλεονεκτήματά που επιδιώκουμε να εκμεταλλευτούμε.

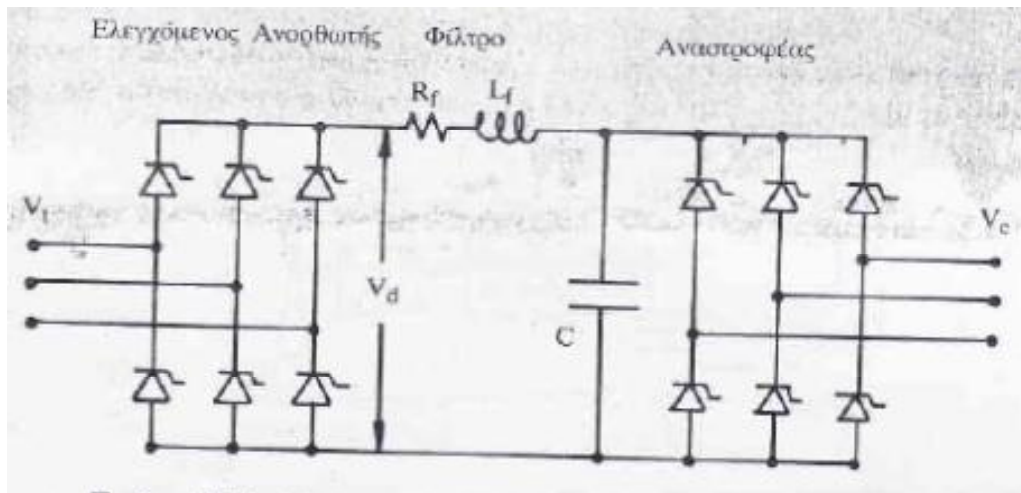
Για την επίτευξη του παραπάνω σκοπού, παρεμβάλλουμε έναν μετατροπέα AC-AC μεταξύ ασύγχρονης γεννήτριας και δικτύου (βλ. σχήμα 3.10).



Σχήμα 3.10: Σύνδεση Α/Γ στο δίκτυο μέσω μετατροπέα AC-AC

Με τον μετατροπέα AC-AC μετατρέπουμε μια εναλλασσόμενη τάση σε μια άλλη ελεγχόμενου εύρους και συχνότητας. Με την παρεμβολή του μετατροπέα λοιπόν, ελέγχουμε την παραγόμενη ισχύ και καταφέρνουμε η Α/Γ να στρέφεται κατά τρόπο τέτοιο ώστε να εκμεταλλεύεται καλύτερα την αιολική ισχύ. Η αντίστοιχα παραγόμενη τάση και συχνότητα, μετατρέπονται σε τάση ίση με την ονομαστική τάση και συχνότητα.

Ο συνηθέστερος τύπος μετατροπέα που χρησιμοποιείται, είναι ο «πλήρους γέφυρας», ο οποίος φαίνεται στο σχήμα 3.11.



**Σχήμα 3.11: Μετατροπέας AC-DC-AC πλήρους γέφυρας**

Η τάση  $V_t$  που παράγεται από την ασύγχρονη γεννήτρια, μετατρέπεται μέσω του ελεγχόμενου ανορθωτή σε DC τάση  $V_d$ . Η σχέση των τάσεων δίνεται από τη σχέση:

$$V_d = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_t (1 + \cos\alpha) \quad (3.17)$$

Με « $\alpha$ » γωνία έναυσης.

Κατόπιν η συνεχής τάση μετατρέπεται σε εναλλασσόμενη μέσω του αναστροφέα, η οποία έχει ονομαστική τάση και συχνότητα ίσες με αυτές του δικτύου  $V_e$ ,  $\omega_s = 2\pi f_s$  (π.χ. 220/380 V, 50 Hz). Αν θεωρηθούν αμελητέες οι πτώσεις τάσης στο φίλτρο Rf-Lf, οι σχέσεις μεταξύ της συνεχούς και της εναλλασσόμενης τάσης είναι:

$$V_e = V_d \sqrt{\frac{\beta}{\pi}}, \text{ ενδεικνύμενη τιμή,}$$

$$V_e = \frac{4V_d}{\sqrt{2\pi}} \sin \frac{\beta}{2}, \text{ η θεμελιώδης}$$

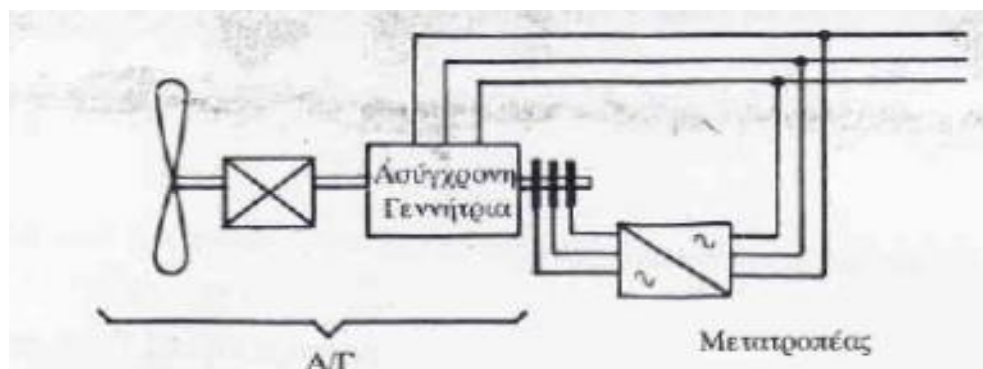
(3.18)

Με «β» γωνία έναυσης.

Ο μετατροπέας, περιέχει επίσης κυκλώματα πυκνωτών και αντεπαγωγών για τον περιορισμό των αρμονικών, καθώς και κυκλώματα ελέγχου των γωνιών έναυσης του ανορθωτή και του αντιστροφέα.

### 3.2.1.6 Παρεμβολή μετατροπέα AC-AC στο δρομέα

Με την παρεμβολή του μετατροπέα στο στάτη, αυξάνεται σημαντικά το κόστος, καθώς απαιτείται από τον μετατροπέα ισχύς ίση με αυτή της γεννήτριας. Για την αποφυγή του μεγάλου αυτού κόστους, χρησιμοποιείται ασύγχρονη γεννήτρια με δακτυλιοφόρο δρομέα (σχήμα 3.12) και η τροφοδότηση του δρομέα γίνεται μέσω ενός μετατροπέα AC-AC με μεταβλητή τάση και συχνότητα.



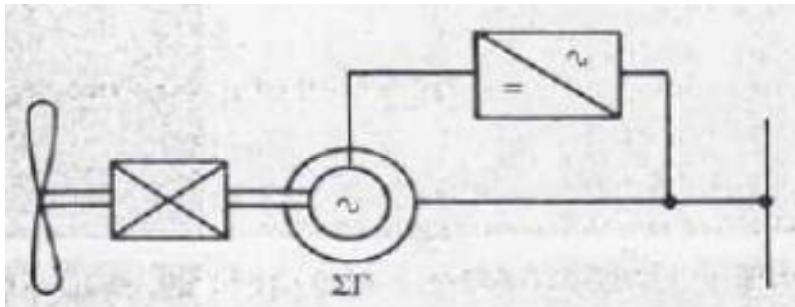
Σχήμα 3.12: Α/Γ με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης

### 3.2.2 Σύγχρονες γεννήτριες

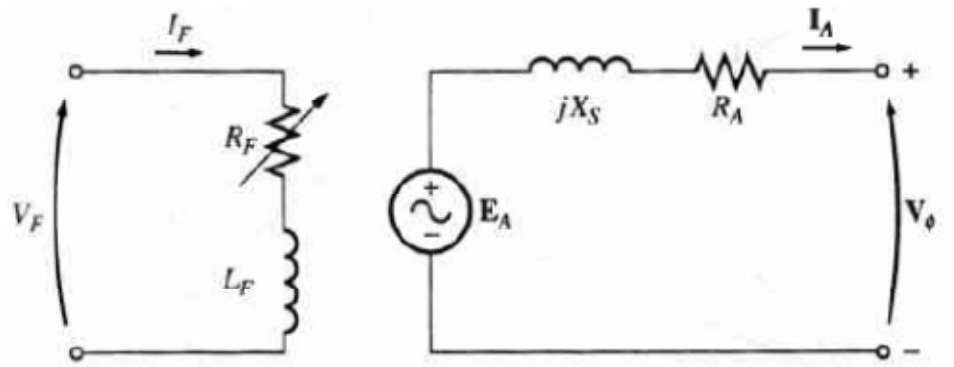
Πλεονέκτημα των σύγχρονων γεννητριών, είναι ότι παράγουν την άεργο ισχύ που απαιτείται για τη διέγερσή τους και για τις καταναλώσεις που συνδέονται, ενώ υπάρχει το σοβαρό μειονέκτημα του ότι οποιαδήποτε απότομη μεταβολή του ανέμου, θα προκαλέσει διακύμανση των στροφών η οποία θα μεταφερθεί απευθείας στο δίκτυο, εκτός και αν συνδεθούν μέσω μετατροπέα AC-AC.

#### 3.2.2.1 Χαρακτηριστικά λειτουργίας

Στο σχήμα 3.13 βλέπουμε το ισοδύναμο κύκλωμα της σύγχρονης γεννήτριας και τη διάταξη Α/Γ με ΣΓ.



(α)



(β)

Σχήμα 3.13: Α/Γ με ΣΓ (α) και ισοδύναμο κύκλωμα ΣΓ (β)

Η ροπή της σύγχρονης γεννήτριας, δίνεται από τη σχέση 3.19:

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{3V_{\phi} E_A \sin \delta}{\omega_m X_S}$$

(3.19)

Όπου:  $E_A$  η τάση διέγερσης, ανάλογη της εντάσεως  $I_F$

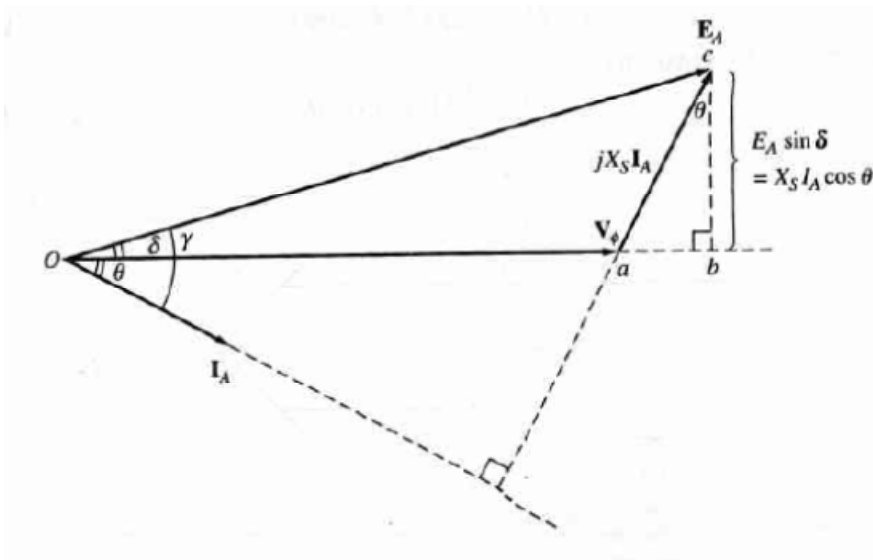
$\delta$  η φασική γωνία μεταξύ  $E_A$  και  $V_{\phi}$

$X_S$  η ασύγχρονη αντίδραση της ΣΓ (με αμελητέα την ωμική αντίσταση του στάτη)

Από το ισοδύναμο κύκλωμα, συμπεραίνουμε ότι:

$$\mathbf{E}_A = \mathbf{V}_{\phi} + jX_S \mathbf{I}_A \quad (3.20)$$

Στο σχήμα 3.14 βλέπουμε το διανυσματικό διάγραμμα της σχέσεως 3.20:



Σχήμα 3.20: Διανυσματικό διάγραμμα όπου αγνοείται η αντίσταση οπλισμού

Η ισχύς εξόδου της γεννήτριας (που αποδίδεται στο δίκτυο), εκφράζεται από τη σχέση:

$$P_{\text{out}} = 3V_{\phi} I_A \cos \theta \quad (3.21)$$

Η μεταβολή της ισχύος, δίνεται από τη σχέση:

$$P = \frac{3V_{\phi} E_A \sin \delta}{X_S} \quad (3.22)$$

Όπως δείχνει η σχέση 3.22, η ισχύς εξόδου της μηχανής εξαρτάται από τη γωνία  $\delta$ . Αυτή η γωνία ονομάζεται γωνία ροπής της μηχανής και προσδιορίζει τη μέγιστη ισχύ που είναι ικανή

$$P_{\text{max}} = \frac{3V_{\phi} E_A}{X_S}$$

να προσφέρει η γεννήτρια. Αυτή η ισχύς είναι:

(3.23)

Η λειτουργία της ΣΓ είναι ευσταθής όταν  $0 < \delta < \pi/2$ .

Η μέγιστη ισχύς της σχέσης 3.23, ονομάζεται στατικό όριο ευστάθειας της γεννήτριας. Οι πραγματικές μηχανές δεν πλησιάζουν ποτέ αυτό το όριο. Συνήθως με πλήρες φορτίο, ισχύει  $15^\circ < \delta < 20^\circ$

Για το πρόβλημα της λειτουργίας υπό μεταβλητή ταχύτητα ανέμου, γνωρίζουμε ότι η γωνία που καθορίζει τη θέση του δρομέα είναι:

$$\theta_r = \omega_s t + \delta \quad (3.24)$$

Επομένως η στιγμιαία γωνιακή ταχύτητα μετά από μια διαταραχή της κανονικής λειτουργίας είναι:

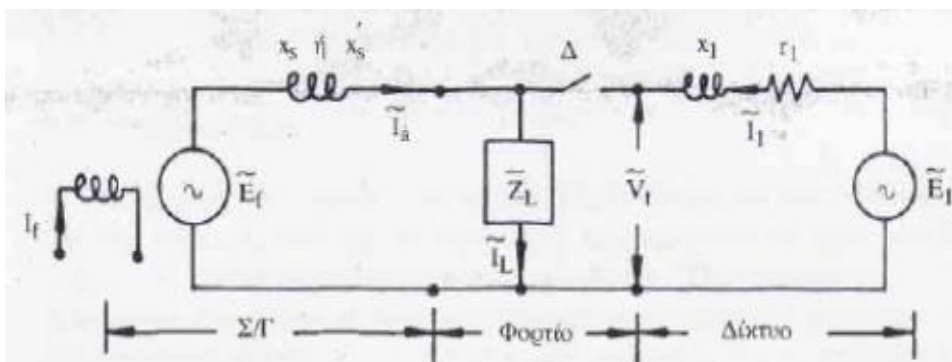
$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s + \frac{d\delta}{dt} \quad (3.25)$$

Άρα η εξίσωση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων για τη σύγχρονη γεννήτρια θα είναι:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = J \frac{d^2 \delta}{dt^2} = T_m - T_e \quad (3.26)$$

### 3.2.2.2 Παράλληλη λειτουργία με το δίκτυο

Εδώ το δίκτυο επιβάλλει την τάση και τη συχνότητα. Στο ισοδύναμο κύκλωμα που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (3.21), έχουμε παραστήσει το δίκτυο σαν διπολική πηγή σταθερής τάσης  $E_1$ , συχνότητας  $f_1$ , με σύνθετη αντίσταση σε σειρά  $Z_1 = r_1 + jx_1$  και το τροφοδοτούμενο φορτίο επίσης σαν σύνθετη αντίσταση  $Z_L$ .



Σχήμα 3.21: Ισοδύναμο για παράλληλη λειτουργία με το δίκτυο

Για μεταβαλλόμενη ταχύτητα ανέμου, έχουμε μεταβολή και της μηχανικής ροπής  $T_m$  και αντίστοιχες μεταβολές της γωνίας  $\delta$ . Επίσης θα ισχύει:

$$\tilde{E}_1 = \tilde{V}_t + z_1 \tilde{I}_1 \quad (3.27)$$

$$\tilde{I}_L = \tilde{I}_1 + \tilde{I}_a = \frac{\tilde{V}_t}{Z_L}$$

και

(3.28)

Πρέπει να τονίσουμε ότι για να μην προκαλούνται διαταραχές στο δίκτυο, η  $V_t$  δεν θα πρέπει να μεταβάλλεται πέραν ορισμένων ορίων. Επίσης ότι η  $E_f$  μπορεί να μεταβάλλεται μόνο με μεταβολή της εντάσεως διεγέρσεως και αυτό σε περιορισμένα όρια. Επομένως οι απότομες μεταβολές της μηχανικής ροπής προκαλούν αντίστοιχες μεταβολές της γωνίας  $\delta$ , η οποία όμως δεν πρέπει να αυξηθεί πέραν του  $\pi/2$ , οπότε η μηχανή οδηγείται σε αστάθεια και θα πρέπει να αποσυνδεθεί από το δίκτυο προκειμένου να αποφευχθεί η βλάβη της.

### 3.2.2.3 Αυτόνομη λειτουργία

Στην αυτόνομη λειτουργία, έχουμε το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 3.21 με τον διακόπτη  $\Delta$  ανοιχτό. Τώρα η συχνότητα δεν επιβάλλεται από το δίκτυο, αλλά θα ακολουθεί τις μεταβολές των στροφών. Εφόσον η συχνότητα πρέπει να κυμαίνεται εντός κάποιων ορίων, είναι ανάγκη να υπάρχει ένας μηχανισμός ρυθμίσεως στροφών μεγάλης ακρίβειας, ο οποίος θα είναι αναγκαστικά μηχανικός, κάτι που είναι δύσκολο και πολυδάπανο να πραγματοποιηθεί.

### 3.2.3 Μηχανές Σ.Ρ.

Οι μηχανές Σ.Ρ έχουν το πλεονέκτημα ότι σε σχέση με τις μηχανές εναλασσομένου έχουν πολύ πιο εύκολο έλεγχο, επομένως διευκολύνουν στη χρήση τους σε Α/Γ. η ευκολία στον έλεγχό τους έγκειται στη δυνατότητα μεταβολής της εντάσεως διέγερσης, άρα της μαγνητικής ροής  $\Phi$ , άρα της  $E_A$ . Έχουν όμως τα μειονεκτήματα του μεγάλου κόστους και της ευπάθειας. Επίσης δε μπορούν να δουλέψουν παράλληλα με το δίκτυο και να τροφοδοτήσουν συσκευές που είναι σχεδιασμένες μόνο για AC. Με αυτές τις προϋποθέσεις, οι μηχανές ΣΡ δεν χρησιμοποιούνται ευρέως, παρά μόνο σε μικρές μονάδες και όταν πρόκειται να φορτίζουν συσσωρευτές.

Υπάρχει δυνατότητα σύνδεσης Α/Γ με γεννήτρια ΣΡ σε δίκτυο AC μέσω Inverter, όπως συμβαίνει και στην πράξη.

### 3.3 Παράλληλη λειτουργία Α/Γ με το ΣΗΕ

Η παράλληλη λειτουργία των Α/Γ στο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας, μπορεί να έχει δυσάρεστα αποτελέσματα στην σταθερότητα και στη συνέχεια της τάσης τροφοδοσίας των καταναλωτών, όπως επίσης και στην ασφάλειά τους.

Επομένως πρέπει να καθοριστούν και να μελετηθούν τα προβλήματα της σύνδεσης και λειτουργίας τους, ώστε οι κατασκευαστές των Α/Γ να τα λάβουν υπόψη τους και να έχουμε έτσι ομαλή λειτουργία των Α/Γ σε παράλληλη λειτουργία με το δίκτυο.

Τα προβλήματα που μπορούν να προκαλέσουν οι Α/Γ στο δίκτυο, μπορούμε να τα διακρίνουμε σε δύο κατηγορίες.

**1.** Διαταραχές που συμβαίνουν κατά την κανονική λειτουργία και οι οποίες συνίστανται κυρίως σε διαταραχές της τάσεως δικτύου. Οι διαταραχές αυτές μπορεί να προέρχονται από:

- i. Από τη μεταβολή που προκαλείται στη ροή των φορτίων του δικτύου, όταν οι Α/Γ τίθενται σε λειτουργία (Αργή μεταβολή των τάσεων)
- ii. Από τη ζεύξη απόζευξη των Α/Γ (απότομες μεταβολές-βυθίσεις της τάσεως), καθώς και λόγω των συνεχών μεταβολών της παραγόμενης ισχύος, λόγω της αστάθειας του ανέμου.
- iii. Από την παραμόρφωση της τάσεως λόγω αρμονικών.

**2.** Διαταραχές που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια ανωμαλιών του δικτύου (βραχυκυκλώματα). Αυτές οι διαταραχές προκαλούνται από:

- i. Από ανωμαλίες στη σωστή λειτουργία των προστασιών του δικτύου Διανομής.
- ii. Από την πρόσθετη καταπόνηση των στοιχείων του δικτύου, δεδομένου ότι τα βραχυκυκλώματα του δικτύου θα τροφοδοτούνται και από τις Α/Γ.
- iii. Από 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 τροφοδότησή του και παραμένει τροφοδοτούμενο από τις Α/Γ με τάση και συχνότητα που μπορεί να απέχουν σημαντικά από τις ονομαστικές τους τιμές.

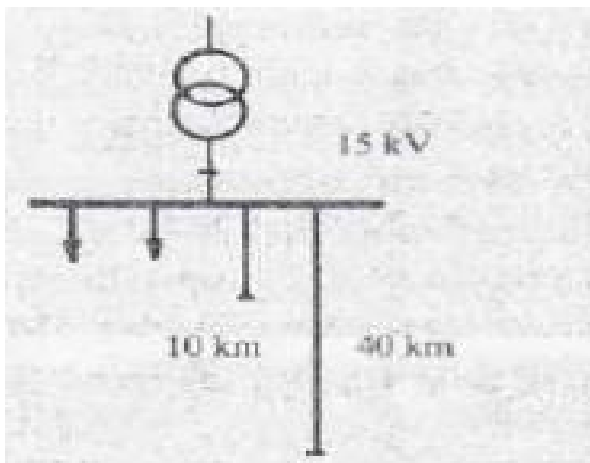
#### 3.3.1 Διαταραχές της τάσεως



### 3.3.1.1 Αργές μεταβολές της τάσεως

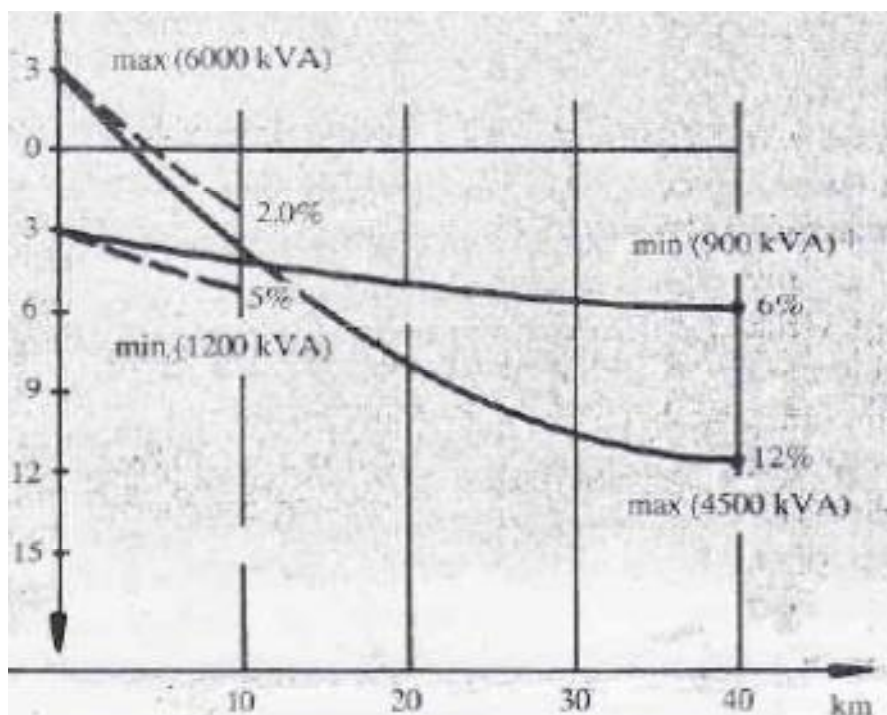
Για τον προσδιορισμό του μεγέθους των μεταβολών της τάσεως που προκαλούν οι Α/Γ κατά τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας τους, μπορούν να εφαρμόζονται οι μέθοδοι υπολογισμού των πτώσεων τάσης των δικτύων διανομής, όπου οι Α/Γ θεωρούνται ως «αρνητικά φορτία».

Στο σχήμα 3.22(α) φαίνεται ένα δίκτυο 15 KV, με το οποίο έχουμε μια συγκεκριμένη εικόνα των επιπτώσεων για τα δίκτυα ΜΤ.



**Σχήμα 3.22(α): Δίκτυο ΜΤ (15 KV) 10 Km και 40 Km**

Έχουμε δύο πλήρως φορτιζόμενες εναέριες γραμμές με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο, μήκους 10 Km και 40 Km των οποίων τη διακύμανση τάσης βλέπουμε στην κυματομορφή του σχήματος 3.22(β)



**Σχήμα 3.22(α): Μεταβολή των τάσεων κατά μήκος της γραμμής MT**

Η δυσμενέστερη κατάσταση από πλευράς τάσεων, θα δημιουργηθεί όταν οι Α/Γ τεθούν σε λειτουργία όλες μαζί με το ονομαστικό τους φορτίο, κατά την ώρα που το συνολικό φορτίο της γραμμής είναι ελάχιστο. Άρα, αν υποθέσουμε ότι στη γραμμή διανομής των 40 Km τίθεται σε λειτουργία Α/Γ συνολικής ισχύος ίσης με το ελάχιστο φορτίο της 900 KVA (20% του μέγιστου), τότε θα έχουμε στη δυσμενέστερη περίπτωση των οριακών καταναλωτών ΧΤ μια ανύψωση της τάσεως κατά 3%, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ότι βρίσκεται στα «ανεκτά όρια».

Έτσι, μπορούμε να πούμε ότι μπορούν να δημιουργηθούν προβλήματα στις γραμμές MT όταν οι συνδεδεμένες Α/Γ αποτελούν σημαντικό ποσοστό του μέγιστου φορτίου της γραμμής (πχ πάνω από 25%).

Με τον ίδιο τρόπο γίνεται υπολογισμός των προβλημάτων για τα δίκτυα Χαμηλής Τάσης.

### 3.3.1.2 Ταχείες μεταβολές της τάσεως

Οι ταχείες μεταβολές της τάσης, μπορεί να προκληθούν κατά τη ζεύξη και την απόζευξη των Α/Γ στο δίκτυο ή κατά τη διάρκεια λειτουργίας των Α/Γ, λόγω των μεταβολών της παραγόμενης ισχύος, οι οποίες έγκεινται στις μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου.

#### I. Διαταραχές κατά τη ζεύξη-απόζευξη των Α/Γ

Με την παραδοχή ότι η συχνότητα των ζεύξεων-αποζεύξεων της Α/Γ με το δίκτυο δεν είναι μεγαλύτερη των τριών ανά ώρα, μπορεί να γίνονται αποδεκτές απότομες μεταβολές της τάσεως των οποίων το όριο δεν υπερβαίνει το 5% της ονομαστικής, με την προϋπόθεση ότι η μεταβατική περίοδος δεν διαρκεί πέραν του 1 sec.

Για την διατήρηση της συχνότητας των ζεύξεων-αποζεύξεων στα όρια που προαναφέρθηκαν, τίθεται συχνά σαν απαίτηση των Ηλεκτρικών Επιχειρήσεων, η πρόβλεψη των κατάλληλων μέτρων από τον κατασκευαστή των Α/Γ. Επίσης, δεδομένου ότι η διάρκεια της μεταβατικής περιόδου κατά την ζεύξη (παραλληλισμό) είναι τόσο μικρότερη όσο μικρότερη είναι η απόσταση των στροφών της μηχανής από τις στροφές που αντιστοιχούν στη σύγχρονη ταχύτητά της, ορισμένες Ηλεκτρικές Επιχειρήσεις θέτουν όρια που καθορίζουν την ακρίβεια των διατάξεων συγχρονισμού, ανάλογα με την ισχύ της Α/Γ και τον τρόπο ελέγχου των στροφών της.

## II. Διαταραχές κατά τη διάρκεια λειτουργίας

Οι διακυμάνσεις της τάσεως του δικτύου που προκαλούνται κατά την διάρκεια της λειτουργίας της Α/Γ, μπορεί να είναι συνεχείς για μεγάλα χρονικά διαστήματα, ανάλογα και με χαρακτηριστικά τον ανέμου στη συγκεκριμένη θέση εγκατάστασης της Α/Γ. Οι μεταβολές αυτές είναι όμοιες με τις προκαλούμενες από κινητήρες κυμαινόμενου φορτίου που δημιουργούν τα γνωστά προβλήματα στο φωτισμό ή και σε άλλες συσκευές (τηλεοράσεις, κλπ) με τις μικρές σε εύρος αλλά μεγάλες σε συχνότητα διακυμάνσεις της τάσεως.

Μια πρακτική προσέγγιση τον θέματος, η οποία έχει προταθεί για Α/Γ που συνδέονται στο δίκτυο ΧΤ, είναι το να υπολογίζεται η ανύψωση της τάσεως που προκαλείται κατά την είσοδο της Α/Γ (με πλήρη ισχύ) και εάν αυτή είναι μικρότερη του 1%, το μάλλον πιθανό είναι η παράλληλη λειτουργία με το δίκτυο, να μη δημιουργεί προβλήματα. Εάν γίνεται υπέρβαση τον ορίου αυτού, είναι αναγκαία μία λεπτομερής εξέταση. Λεπτομερής εξέταση απαιτείται κατά κανόνα πάντοτε προκειμένου περί σχετικά μεγάλου μεγέθους Α/Γ που συνδέονται στο δίκτυο Μ.Τ..

### 3.3.1.3 Αρμονικές και παραμόρφωση του κύματος τάσεως

Οι αρμονικές ρεύματος που παράγουν οι Α/Γ, είναι παρόμοιες με εκείνες που δημιουργούν οι κινητήρες, κυρίως λόγω του κορεσμού του μαγνητικού κυκλώματος, με αποτέλεσμα τη δημιουργία περιττών αρμονικών στην περιοχή των ακουστικών συχνοτήτων. Οι αρμονικές μπορεί να προκαλούν παράσιτα στις τηλεφωνικές γραμμές ή και

ανωμαλίες στα συστήματα τηλεχειρισμών με ακουστική συχνότητα, όπως αυτά που χρησιμοποιεί και η ΔΕΗ (175 Hz).

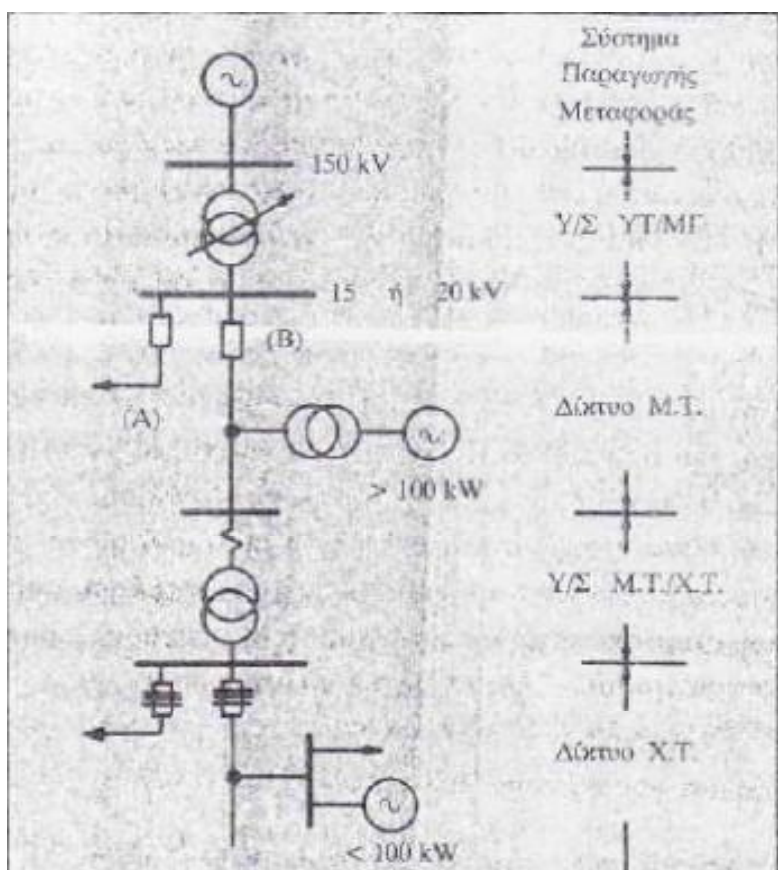
### 3.3.2 Συμπεριφορά Α/Γ κατά τη διάρκεια βραχ/μάτων στο δίκτυο

#### 3.3.2.1 Γενικά

Τα δίκτυα διανομής ΧΤ και ΜΤ λειτουργούν κατά κανόνα «ακτινικά», δηλαδή τροφοδοτούνται από ένα μόνο σημείο τους. Η ακτινική λειτουργία τους επιτρέπει τη χρησιμοποίηση απλών προστασιών υπερεντάσεως.

Η σύνδεση των Α/Γ σε διάφορα σημεία του δικτύου, μεταβάλλει τη βασική αρχή της ακτινικής τους λειτουργίας. Η έκταση των επιπτώσεων που έχει η μεταβολή αυτή, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, με κυριότερο το μέγεθος και το πλήθος των συνδεδεμένων Α/Γ.

Συγκεκριμένα, στο σχήμα 3.23, αναπαριστάται ένα δίκτυο Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, στο οποίο οι Α/Γ μέχρι 100 KW συνδέονται στο δίκτυο ΧΤ και οι Α/Γ άνω των 100 KW στο δίκτυο ΜΤ, με ιδιαίτερο Υ/Σ ανυψώσεως.



Σχήμα 3.23: Ενδεικτικό δίκτυο Διανομής

Βλέπουμε πως όταν δεν είναι συνδεδεμένες οι Α/Γ, ένα βραχυκύκλωμα στη γραμμή ΜΤ (Α) θα τροφοδοτηθεί μόνο από το σύστημα Παραγωγής-Μεταφοράς και για την απομόνωσή του θα προκληθεί το άνοιγμα του διακόπτη στην αρχή της γραμμής (Α). αν στο δίκτυο είναι συνδεδεμένες Α/Γ, το βραχυκύκλωμα στη γραμμή (Α) θα τροφοδοτηθεί εκτός από το σύστημα Παραγωγής-Μεταφοράς και από τις Α/Γ που συνδέονται στη γραμμή (Β), οπότε θα ήταν ενδεχόμενο να προκληθούν ανεπιθύμητες λειτουργίες των μέσων προστασίας. Συγκεκριμένα, μπορεί να προκληθεί πτώση του διακόπτη στη γραμμή της γραμμής (Β) ή τήξη των ασφαλειών διακλάδωσης της ίδιας γραμμής ή των προστασιών του Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ.

Επίσης, το ρεύμα βραχυκυκλώσεως των Α/Γ, προστίθεται στο παρεχόμενο από το Σύστημα και μπορεί να οδηγήσει σε υπέρβαση του ορίου αντοχής του υλικού σε βραχυκύκλωμα.

### 3.3.2.2 Επιπτώσεις στις προστασίες των δικτύων Διανομής

Η κυριότερη επίπτωση που μπορεί να έχει η λειτουργία των Α/Γ είναι το να προκαλούνται δίχως λόγο λειτουργίες των προστασιών.

Η πολυπλοκότητα των δικτύων Διανομής κάνει δύσκολη την διατύπωση γενικών συμπερασμάτων. Όμως, από την εξέταση συγκεκριμένων περιπτώσεων, προκύπτει ότι οι επιπτώσεις αυτές για τα δίκτυα 15-20 KV της ΔΕΗ, είναι γενικά μικρές ή και αμελητέες, ιδίως όταν πρόκειται για Α/Γ με ασύγχρονες γεννήτριες. Συγκεκριμένα έχουν υπολογιστεί τα εξής:

α) Για να προκληθεί η τήξη μιας ασφάλειας εκτονώσεως 30 T (όπως αυτές που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα ΜΤ της ΔΕΗ), η οποία παρεμβάλλεται μεταξύ του βραχυκυκλώματος και των Α/Γ, απαιτείται συνολική αιολική ισχύς Α/Γ με ασύγχρονες γεννήτριες, μεγαλύτερη των 12 ΜVA. Είναι όμως προφανές ότι μια τέτοια ισχύς δεν μπορεί να υπάρξει αφού η ασφάλεια των 30 T επιτρέπει την ροή μόνιμου φορτίου, το πολύ 1,2 ΜVA. Για άλλα μεγέθη ασφαλειών είναι αντίστοιχα:

20 T	7 ΜVA	0,8 ΜVA
6 T	8 ΜVA	0,25 ΜVA

Αλλά και στην περίπτωση σύγχρονων γεννητριών υπολογίστηκε ότι για να προκληθεί τήξη των ασφαλειών απαιτείται, εγκατεστημένη ισχύς συγχρόνων Α/Γ:

<b>Για ασφάλειες</b>	<b>30 T</b>	<b>2.0 MVA</b>	<b>Τουλάχιστον</b>
<b>και</b>	<b>20 T</b>	<b>1,2 MVA</b>	<b>τουλάχιστον</b>

β) Για να προκληθεί η λειτουργία των ηλεκτρονόμων υπερεντάσεως ενός διακόπτη ισχύος, στην αναχώρηση μιας γραμμής ΜΤ, ανάλογα με τον χρόνο διεγέρσεώς τους απαιτούνται οι ακόλουθες εγκατεστημένες ισχύς γεννητριών:

∅ Για την διέγερση ηλεκτρονόμων «στιγμιαίας λειτουργίας», με ελάχιστο χρόνο διέγερσης 0,07 sec και οριακή ένταση διεγέρσεως  $I_e$ , πρέπει να υπάρχουν Α/Γ με ασύγχρονες γεννήτριες των οποίων η ονομαστική ένταση να είναι μεγαλύτερη του 0,30  $I_e$ . Π.χ. για  $I_e=400$  Α στα 20 KV, απαιτείται ισχύς Α/Γ άνω των 4.200 KVA.

Αντίστοιχα για σύγχρονες γεννήτριες η ονομαστική ένταση περιορίζεται σε 0,15  $I_e$ .

∅ Για τη διέγερση ηλεκτρονόμων «χρονικής καθυστέρησης», με χρόνο π.χ. 0,5sec για μεν την περίπτωση των ασύγχρονων γεννητριών η απαιτούμενη ισχύς είναι πρακτικώς απεριόριστη, ενώ για την περίπτωση των σύγχρονων πρέπει να είναι μεγαλύτερη τον 0,25  $I_N$ , όπου  $I_N$  η ονομαστική τους ένταση

Ισχύς Α/Γ		Εντάσεις βραχυκυκλώσεως		
(kVA)	% του μέγιστου φορτίου	Από δίκτυο		Από Α/Γ (Α)
		Αρχή γραμμής (Α)	Τέλος γραμμής (Α)	
450	10	9.600	500	110
900	20	9.600	500	220
2250	50	9.600	500	550

Συμπερασματικά, όπως φαίνεται και από τον παραπάνω πίνακα, ακόμα και αν οι Α/Γ αποτελούν το 50% του φορτίου της γραμμής, στην περίπτωση του βραχυκυκλώματος στην αρχή της γραμμής η συμβολή των Α/Γ είναι τελείως ασήμαντη, ενώ στην περίπτωση βραχυκυκλώματος στο άκρο της γραμμής, μπορεί να είναι σημαντική

ποσοστιαία, αλλά είναι μικρή και δεν επηρεάζει την καταπόνηση του δικτύου σαν απόλυτο μέγεθος.

### 3.3.3 Απομονωμένη λειτουργία Α/Γ

Η κατάσταση της «απομονωμένης λειτουργίας», δηλαδή η περίπτωση κατά την οποία η Α/Γ αποσυνδέεται από το δίκτυο και τροφοδοτεί ένα τμήμα αυτού, μπορεί να δημιουργηθεί από διάφορες αιτίες. Τέτοια π.χ. είναι η περίπτωση ενός παροδικού σφάλματος, το οποίο προκαλεί την λειτουργία ασφαλειών (ή άλλων μέσων προστασίας) τον δικτύου, καθώς επίσης η απομόνωση ενός τμήματος του δικτύου για την εκτέλεση εργασιών κλπ. Ως απομονωμένη λειτουργία, μικρής όμως διάρκειας, μπορεί να θεωρηθεί και η περίπτωση που διακόπτεται η τροφοδότηση από το δίκτυο, λόγω λειτουργίας προηγούμενου διακόπτη με, αυτόματη επαναφορά, οπότε οι Α/Γ τροφοδοτούν το απομονωμένο τμήμα του δικτύου για μερικά το πολύ δευτερόλεπτα, δηλαδή τον χρόνο επαναφοράς του διακόπτη.

Κατά τη διάρκεια της απομονωμένης λειτουργίας, στο δίκτυο μπορεί να υπάρχει σφάλμα ή να μην υπάρχει, ή ακόμα το είδος του σφάλματος να είναι τέτοιο που να επιτρέπει τη μόνιμη λειτουργία της Α/Γ (π.χ. μονοφασικό προς γη σφάλμα στο δίκτυο Μ.Τ. μπορεί να εξακολουθήσει τροφοδοτούμενο από τις Α/Γ, εάν δεν έχουν ληφθεί κατάλληλα μέτρα προστασίας).

Σ' αυτές τις περιπτώσεις λειτουργίας μπορεί να προκληθούν βλάβες σε συσκευές καταναλωτών, λόγω αντικανονικής τάσεως και συχνότητας ή και επικίνδυνες καταστάσεις για το προσωπικό εκμεταλλεύσεως των δικτύων. Είναι βέβαια προφανές ότι η δυνατότητα τροφοδοτήσεως των φορτίων του απομονωθέντος τμήματος του δικτύου από τις Α/Γ πού είναι συνδεδεμένες σ' αυτό και ιδιαίτερα το χρονικό διάστημα που η τροφοδότηση αυτή μπορεί να διατηρηθεί, εξαρτώνται από τον συσχετισμό του φορτίου με τη συνολική ισχύ των Α/Γ, καθώς και τις προστασίες αυτών, αλλά και το είδος των γεννητριών. Συγκεκριμένα, σημειώνεται ότι οι σύγχρονες γεννήτριες και τα συστήματα με αντιστροφείς εξαναγκασμένης αναγωγής μπορούν να λειτουργούν συνεχώς ανεξάρτητα από το δίκτυο, αρκεί να είναι σε θέση να τροφοδοτούν το φορτίο του απομονωμένου τμήματος. Αντίθετα οι ασύγχρονες γεννήτριες και τα συστήματα με αντιστραφείς φυσικής μεταγωγής, είναι δυνατό να λειτουργούν μόνο με κατάλληλο συνδυασμό φορτίων και πυκνωτών αντισταθμίσεως, οπότε προκαλείται «αυτοδιέγερση» της ασύγχρονης γεννήτριας.

Για να προκληθεί «αυτοδιέγερση» της ασύγχρονης γεννήτριας, πρέπει να υπάρχουν

πυκνωτές ισχύος πάνω από το ορισμένο όριο που είναι συνάρτηση των χαρακτηριστικών της μηχανής, για παράγει δε μια ορισμένη ισχύ και τάση το τροφοδοτούμενο φορτίο πρέπει να είναι μονοσήμαντα καθορισμένο. Επομένως εάν λόγω ανωμαλίας, σύμφωνα με τα προηγούμενα αποσυνδεθεί η Α/Γ από το δίκτυο, είναι απίθανο να εξακολουθεί να λειτουργεί χωρίς σοβαρή απόκλιση από την ονομαστική της συχνότητα και τάση, έστω και εάν υπάρχουν πυκνωτές άνω του ορίου αυτοδιεγέρσεώς της. Τότε όμως λειτουργούν οι για το σκοπό αυτό προβλεπόμενες προστασίες, οι οποίες και προκαλούν την άμεση αποσύνδεσή της από το δίκτυο. Έτσι ο κίνδυνος της απομονωμένης λειτουργίας, ενώ θεωρητικά είναι δυνατός, στην πράξη είναι μικρός. Τα ανάλογα ισχύουν και στην περίπτωση που παρεμβάλλεται αναστροφέας φυσικής μεταγωγής. Οι μετατροπείς αυτοί απαιτούν για την λειτουργία τους ένα καθαρό κύμα τάσεως και η λειτουργία τους διακόπτεται όταν η συχνότητα ή η τιμή της τάσεως υπερβεί ορισμένα όρια. Μια προστασία υπέρ- και υπό-συχνότητας, που επίσης προβλέπεται συνήθως, μπορεί να χρησιμεύει σαν προστασία «δεύτερης βαθμίδας».

Σημειώνεται επίσης ότι η πρόβλεψη προστασιών που διακόπτουν τη σύνδεση της γεννήτριας με το δίκτυο σε περίπτωση παρατεταμένης διακοπής της τροφοδοτήσεως του δικτύου από την κύρια πηγή τροφοδοτήσεώς του, επιβάλλεται και για την προστασία της γεννήτριας.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

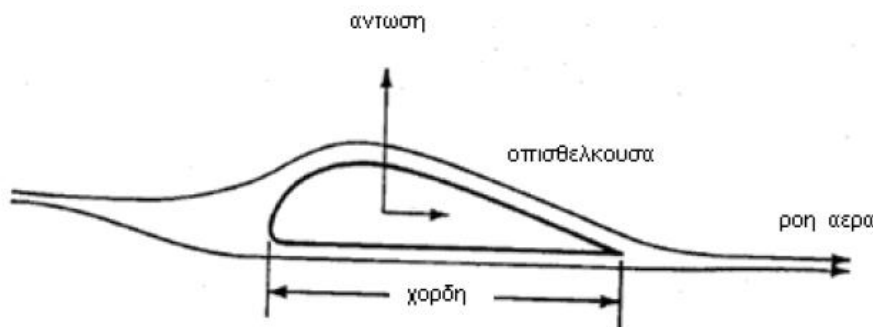
### **ΕΛΕΓΧΟΣ ΙΣΧΥΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ**

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει η περιγραφή των διαφόρων μεθόδων ελέγχου της ισχύος των ανεμογεννητριών που έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται στην πράξη. Πριν από αυτό όμως είναι απαραίτητο να γίνει μια αναφορά στην αεροδυναμική των πτερύγων των ανεμογεννητριών, τις δυνάμεις που αναπτύσσονται πάνω τους και συντελούν στην κίνηση τους.



#### 4.1 Η αεροδυναμική των πτερυγίων της Α/Γ

Στο σχήμα 1 φαίνεται η συμπεριφορά μιας πτέρυγας (αεροτομή) όταν προσπίπτει πάνω της η ροή του αέρα. Αυτή η ροή του αέρα γύρω από μία σταθερή αεροτομή, παράγει δύο δυνάμεις. Μία δύναμη που λέγεται άντωση (lift) και είναι κάθετη στη ροή και μία άλλη λέγεται οπισθέλκουσα (draft) και είναι παράλληλη με την κατεύθυνση του ανέμου.

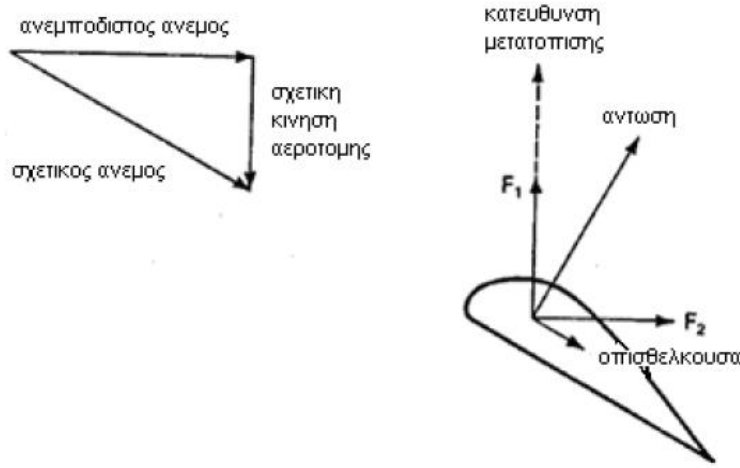


Σχήμα 4.1 Άντωση και οπισθέλκουσα δύναμη σε μία σταθερή αεροτομή.

Το φαινόμενο που λαμβάνει χώρα και προκαλεί τις δυνάμεις πάνω στην πτέρυγα είναι το εξής. Ο αέρας που φτάνει στην πτέρυγα αναγκάζεται να χωριστεί. Ένα μέρος του περνάει πάνω από την πτέρυγα, ενώ το άλλο περνάει κάτω από αυτήν. Ο αέρας που ρέει πάνω από την κορυφή της αεροτομής έχει να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση επειδή το μήκος της πτέρυγας στο πάνω μέρος είναι μεγαλύτερο από ότι στο κάτω. Για να καλυφθεί αυτή η μεγαλύτερη απόσταση, ο αέρας αναγκάζεται να επιταχυνθεί, αλλά αυτή η αύξηση της ταχύτητας προκαλεί μικρή μείωση της πίεσης. Αυτή η διαφορά πίεσης μεταξύ των δύο πλευρών της αεροτομής της πτέρυγας προκαλεί την άντωση, δύναμη κάθετη στην κατεύθυνση της ροής του ανέμου. Η ύπαρξη της άντωσης εξαρτάται από την ομοιόμορφη ροή γύρω από την αεροτομή, πράγμα που σημαίνει ότι ο αέρας ρέει ομαλά και από τις δύο πλευρές της πτέρυγας. Εάν η ροή είναι τυρβώδης, τότε θα δημιουργηθεί μικρή ή και μηδενική άντωση.

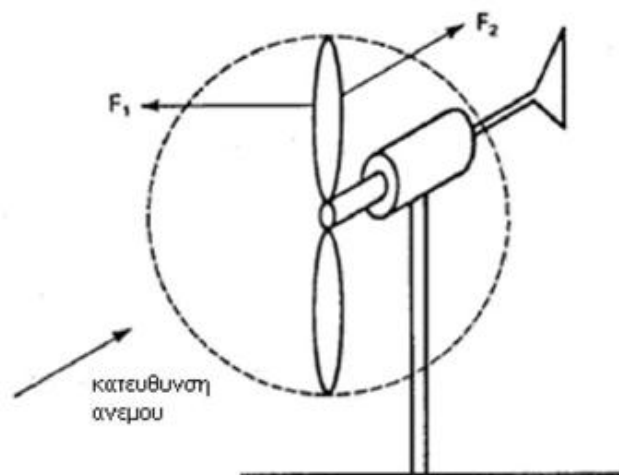
Η κίνηση του ανέμου προκαλεί επίσης την οπισθέλκουσα δύναμη κατά την κατεύθυνση του ανέμου. Αυτός είναι ένας όρος απωλειών και ελαχιστοποιείται όσο είναι δυνατόν, σε υψηλής απόδοσης Α/Γ. Και οι δύο αυτές δυνάμεις είναι ανάλογες της πυκνότητας του αέρα, της επιφάνειας της αεροτομής και του τετραγώνου της ταχύτητας του ανέμου.

Ας υποθέσουμε ότι επιτρέπουμε στην αεροτομή να κινηθεί κατά την κατεύθυνση της άντωσης. Αυτή η κίνηση (μετατόπιση) θα συνδυαστεί με την κίνηση του αέρα, ώστε να παραχθεί η σχετική κατεύθυνση του ανέμου (σχ. 2)



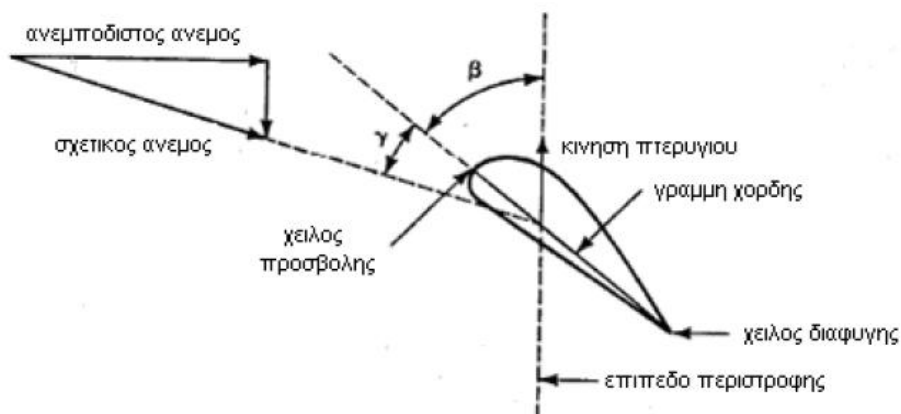
Σχήμα 4.2 Αντωση και οπισθέλκουσα δύναμη σε μία μετατοπισμένη αεροτομή.

Πλέον η αεροτομή έχει επαναπροσανατολιστεί και έχει δημιουργηθεί μια γωνία πρόσπτωσης του ανέμου πάνω της. Η άντωση είναι κάθετη στην σχετική κατεύθυνση του ανέμου, αλλά δεν είναι κάθετη στην κατεύθυνση της μετατόπισης. Οι δύο δυνάμεις μπορούν να αναλυθούν σε δύο συνιστώσες, μία παράλληλη και μία κάθετη στην διεύθυνση του αδιατάρακτου ανέμου και αυτές οι συνιστώσες συνδυάζονται για να διαμορφώσουν την δύναμη  $F_1$  στην κατεύθυνση της μετατόπισης και την  $F_2$  στην κατεύθυνση του αδιατάρακτου ανέμου. Η δύναμη  $F_1$  είναι διαθέσιμη για να παράγει το χρήσιμο έργο. Η δύναμη  $F_2$  πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τον σχεδιασμό της στήριξης της αεροτομής, ώστε να υπάρχει δομική στιβαρότητα. Για να γίνει κατανοητή το παραπάνω φαινόμενο χρησιμοποιούμε το σχήμα 3, στο οποίο φαίνονται οι δύο συνιστώσες  $F_1$  και  $F_2$ . Η δύναμη  $F_1$  προκαλεί την ροπή, η οποία περιστρέφει τον άξονα της ανεμογεννήτριας, ενώ η  $F_2$  σπρώχνει της πτέρυγες προς τα πίσω. Θα πρέπει λοιπόν η σύνδεση των πτερυγίων στον άξονα να είναι ικανή να αντέξει αυτή την δύναμη.



Σχήμα 4.3. Αεροδυναμικές δυνάμεις στα πτερύγια μίας Α/Γ

Αυτές οι δυνάμεις καθώς και η απόδοση της διάταξης εξαρτώνται από την κατασκευή και τον προσανατολισμό των πτερυγίων. Μία σημαντική παράμετρος είναι η γωνία βήματος (κλίσης) του πτερυγίου  $\beta$  (pitch angle), η οποία είναι η γωνία μεταξύ της χορδής του πτερυγίου και του επιπέδου περιστροφής (σχ. 4).



Σχήμα 4.4 Ορισμός της γωνίας βήματος πτερυγίου και της γωνίας πρόσπτωσης.

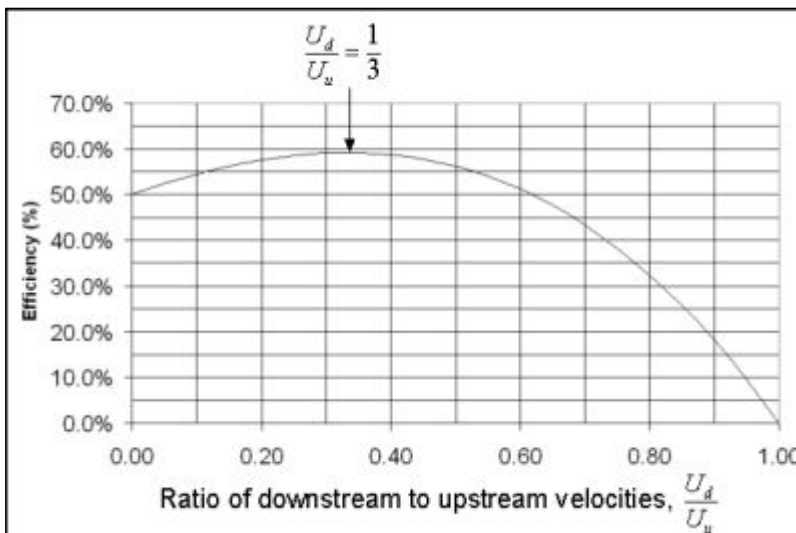
Η χορδή είναι μία ευθεία που συνδέει το χείλος προσβολής (leading edge) με το χείλος διαφυγής (trailing edge) μίας αεροτομής. Το επίπεδο περιστροφής είναι το επίπεδο το οποίο σχηματίζουν τα ακροπερύγια καθώς περιστρέφονται.

Μία άλλη σημαντική παράμετρος του πτερυγίου είναι η γωνία πρόσπτωσης  $\gamma$  (angle of attack), η οποία είναι η γωνία μεταξύ της χορδής του πτερυγίου και του σχετικού ανέμου ή της αποτελεσματικής κατεύθυνσης της ροής του αέρα (μέρος του ανέμου το οποίο μετατρέπεται σε μηχανικό έργο από την ανεμογεννήτρια).

## 4.2 Αεροδυναμικός έλεγχος ισχύος A/Γ

Γενικά σε οποιοδήποτε ανεμοκινητήρα η επιλογή του τρόπου ελέγχου της λειτουργίας του σχετίζεται με τα λειτουργικά του χαρακτηριστικά. Βέβαια σημαντικό ρόλο παίζουν και τα χαρακτηριστικά του αιολικού δυναμικού στο οποίο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί η ανεμογεννήτρια.

Ένα σημαντικό μέγεθος για τη μελέτη της κίνησης μια ανεμογεννήτριας, άρα και της ικανότητας μας να την ελέγχουμε και να τη λειτουργούμε στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας της είναι ο αεροδυναμικός συντελεστής  $C_p$ . Σύμφωνα με τον Γερμανό φυσικό Albert Betz η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει ο αεροδυναμικός συντελεστής είναι  $C_p=0,593$  όπως φαίνεται και από το παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 4.5 Διάγραμμα αεροδυναμικού συντελεστή  $C_p$

Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος  $C_p$  δεν είναι σταθερός. Εξαρτάται από τη γωνία βήματος πτερυγίου  $\beta$  και όπως φαίνεται και από το παραπάνω διάγραμμα από τον λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου  $\lambda$ . Πρέπει να αναφέρουμε ότι  $U_d$  είναι η ταχύτητα του αέρα που περνάει πάνω από το πτερύγιο της ανεμογεννήτριας, ενώ  $U_u$  είναι η ταχύτητα που περνάει από κάτω. Όπως έχουμε πει παραπάνω, η διαφορά στις δύο αυτές ταχύτητες είναι που δημιουργεί τη δύναμη που προκαλεί την περιστροφή του πτερυγίου.

$$I = \frac{U_d}{U_u} = \frac{\omega_{rotor} \cdot R_{rotor}}{U_{wind}}$$

Όπου:  $\omega_{rotor}$  η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα σε rad/sec

R η ακτίνα του δρομέα σε μέτρα

$U_u$  η ταχύτητα του ανέμου σε m/sec

Οι τεχνικές ελέγχου των ανεμογεννητριών που έχουν αναπτυχθεί στηρίζονται στη μεταβολή των παραπάνω μεγεθών. Ο ανεμοκινητήρας μπορεί να λειτουργήσει είτε με σταθερό λόγο ακροπτερυγίου  $\lambda$  ή με σταθερή γωνιακή ταχύτητα  $\Omega$  για δεδομένη ταχύτητα ανέμου. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να προσαρμόζονται οι στροφές κατάλληλα διασφαλίζοντας την καλύτερη εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού και ταυτόχρονα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας υπό σταθερή τάση και συχνότητα για αυτόνομους καταναλωτές ή για δεδομένη τάση και συχνότητα σε περιπτώσεις διασυνδέσεων με το ηλεκτρικό δίκτυο. Επίσης σε υψηλές ταχύτητες ανέμου είναι απαραίτητος ο περιορισμός της παραγόμενης μηχανικής ισχύος της Α/Γ, για να μην έχουμε υπέρβαση των ονομαστικών μεγεθών της γεννήτριας. Αυτός ο έλεγχος εφαρμόζεται επίσης και για την αποφυγή υπερεπιτάχυνσης του ρότορα και την αποσύνδεση της Α/Γ στις πολύ υψηλές ταχύτητες.

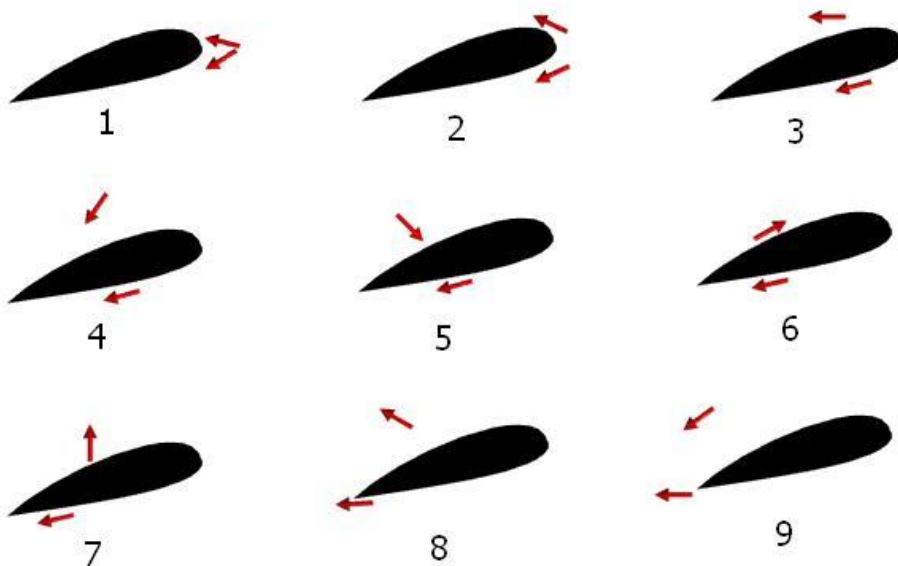
Με βάση τα παραπάνω οι τρόποι ελέγχου των ανεμογεννητριών μπορούν να διαιρεθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες.

- Παθητικές Τεχνικές Ελέγχου
- Ενεργητικές Τεχνικές Ελέγχου

Η κυριότερη από τις **παθητικές τεχνικές ελέγχου** είναι ο έλεγχος απώλειας στήριξης (Passive stall control).

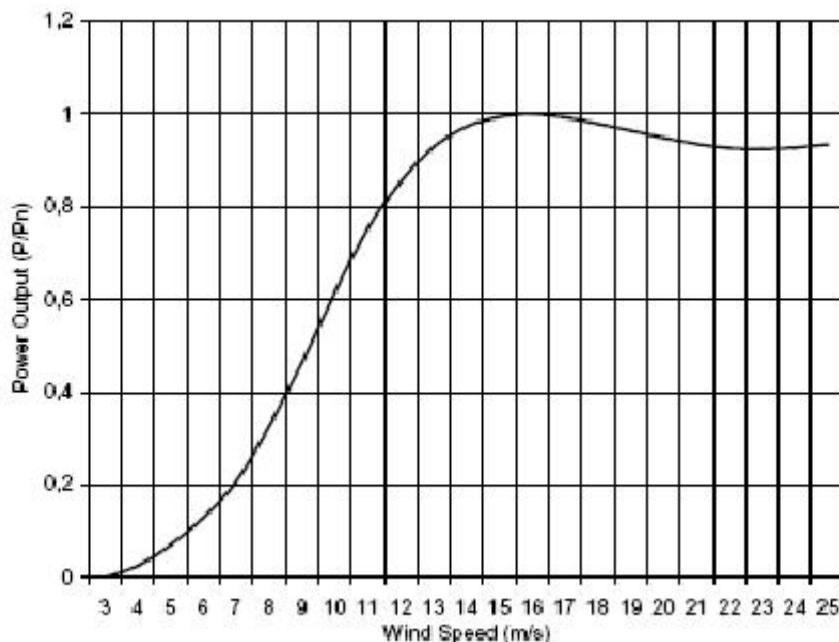
**Έλεγχος Απώλειας Στήριξης** (Passive stall control).

Είναι η απλούστερη μορφή ελέγχου της ισχύος. Η γωνία κλίσης των πτερυγίων είναι σταθερή. Σε κανονική λειτουργία επιτυγχάνεται ομαλή ροή του αέρα στα πτερύγια του ρότορα, συνεπώς διατηρείται ένας υψηλός λόγος άντωσης προς οπισθέλκουσα, που έχει σαν αποτέλεσμα έναν υψηλό βαθμό αεροδυναμικής απόδοσης. Από την άλλη μεριά όταν η ταχύτητα του ανέμου προσεγγίζει την τιμή στην οποία η γεννήτρια φθάνει την ονομαστική της ισχύ, περαιτέρω αύξηση της ροπής πρέπει να αποφευχθεί. Μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου όμως προκαλούν αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης και η ροή του αέρα στο χείλος διαφυγής γίνεται τυρβώδης, που έχει σαν συνέπεια την μείωση της άντωσης και την αύξηση της οπισθέλκουσας. Ο λόγος τους μικραίνει και μαζί του και η αεροδυναμική απόδοση της γεννήτριας. Έχουμε κατά κάποιο τρόπο αυτορρύθμιση της ανεμογεννήτριας για να μην υπερταχυνθεί ο άξονας της.



**Σχήμα 4.6 :** Απεικόνιση σε εννιά φάσεις της δημιουργίας τυρβώδους ροής στο πάνω μέρος της πτέρυγας, που συντελεί στην επιβράδυνση της. Σε αυτό το φαινόμενο στηρίζεται ο έλεγχος απώλειας στήριξης και η αυτορρύθμιση της ανεμογεννήτριας.

Η σταθερή γωνία κλίσης των πτερυγίων επιλέγεται έτσι ώστε η τουρμπίνα να φθάσει την ονομαστική ισχύ στην επιθυμητή ταχύτητα ανέμου. Για την επιλογή λαμβάνονται υπ όψη οι συνθήκες και η ταχύτητα του ανέμου στο σημείο που θα γίνει η τοποθέτηση της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 4.7 Καμπύλη ισχύος μίας Α/Γ με έλεγχο απώλειας στήριξης

Όπως παρατηρούμε από το παραπάνω διάγραμμα η μέγιστη ισχύς της ανεμογεννήτριας δίνεται μόνο για συγκεκριμένη ταχύτητα του ανέμου. Μετά από αυτή την τιμή συντελείται το φαινόμενο της αυτορρύθμισης όπως περιγράψαμε παραπάνω, το οποίο προστατεύει την ανεμογεννήτρια, αλλά δε μας δίνει τη μέγιστη ισχύ εξόδου.

#### Πλεονεκτήματα της μεθόδου απώλειας στήριξης:

- Η μέθοδος αυτή χρειάζεται από ελάχιστα έως ανύπαρκτα συστήματα ελέγχου της αεροδυναμικής ισχύος. Έχει απλή κατασκευή αφού δεν υπάρχουν στρεφόμενα μέρη και ο έλεγχος συσχετίζεται με τη σωστή σχεδίαση από αεροδυναμικής πλευράς.
- Δεν είναι ακριβός από θέμα κόστους τύπος ελέγχου και δεν απαιτεί ιδιαίτερη συντήρηση.
- Δεν έχει κινούμενα μέρη, η σύνδεση των πτερυγίων στην πλήμνη είναι σταθερή, άρα απλή, συμπαγής και ανθεκτική.

#### Μειονεκτήματα της μεθόδου απώλειας στήριξης:

- Η μεγιστοποίηση ισχύος σε συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου που εξαρτάται από την γεωμετρία των πτερυγίων.

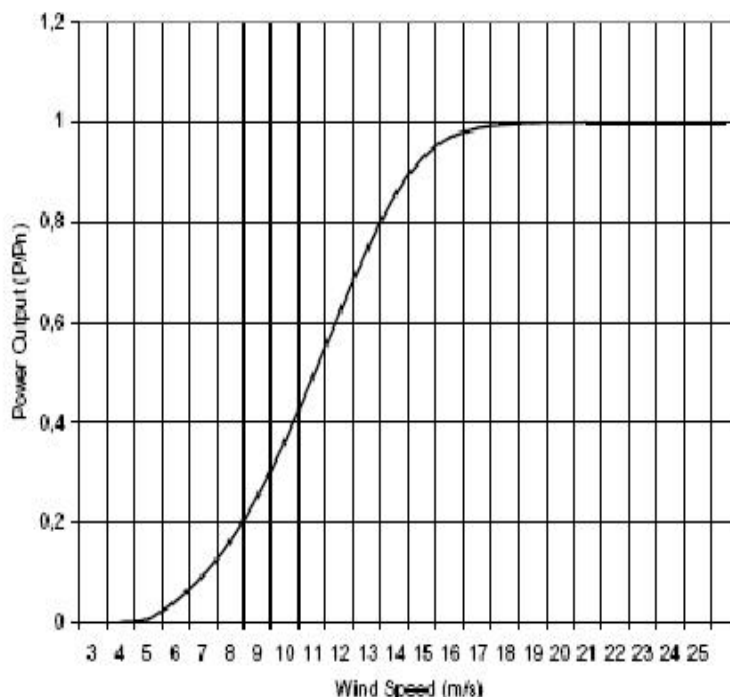
- Τα σταθερά πτερύγια δεν βοηθούν στην έναρξη λειτουργίας της Α/Γ (πολλές φορές συνδέουμε τη γεννήτρια στο δίκτυο και την εκκινούμε σαν κινητήρα), χρειάζεται ξεχωριστό φρένο για προστασία έναντι υπερτάχυνσης.
- Η ονομαστική ισχύς της ανεμογεννήτριας κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα.
- Λόγω του τρόπου λειτουργίας τα πτερύγια υπόκεινται σε υψηλά φορτία καταπόνησης και δεν βοηθά κατά την εκκίνηση.
- Λόγω του τρόπου κατασκευής και λειτουργίας χρήζει ανάγκης για μηχανική πέδη (δισκόφρενο) αφού μόνο αυτή φρενάρει πλήρως το δρομέα, ενώ σε περίπτωση αστοχίας π.χ. διαρροή υγρού δεν μπορεί να εξασφαλισθεί η ακεραιότητα της Α/Γ. Κατά την πέδηση του άξονα των πτερυγίων εμφανίζονται μεγάλες καταπονήσεις τόσο στα πτερύγια όσο και στο δρομέα αφού οι ροπές που φτάνουν σ' αυτόν είναι μεγαλύτερες από εκείνες που εμφανίζονται κατά την πέδη λόγω μεταβολής του βήματος του πτερυγίου. Το αποτέλεσμα είναι να απαιτείται μεγάλο δισκόφρενο αυξάνοντας το κόστος σε επίπεδα ανάλογα του προηγούμενου ελέγχου.
- Όλα τα παραπάνω επιφέρουν μείωση κατά 5-10% της ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με αυτή που παράγεται από Α/Γ με έλεγχο βήματος πτερυγίων.

**Στις ενεργητικές τεχνικές ελέγχου συναντάμε τις παρακάτω μέθοδος.**

#### **Έλεγχος βήματος πτερυγίου**(pitchcontrol).

Απαραίτητη προϋπόθεση για να εφαρμοστεί ο έλεγχος βήματος σε μια ανεμογεννήτρια είναι να έχει μεταβλητά πτερύγια. Μέρος του συστήματος είναι και ένας ελεγκτής ο οποίος επιτηρεί την ισχύ εξόδου της ανεμογεννήτριας. Όταν αυτή γίνει πολύ υψηλή, ο ελεγκτής δίνει εντολή στο μηχανισμό περιστροφής των πτερυγίων, ο οποίος στρέφει τα πτερύγια υπό κάποια γωνία. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνει περιορισμός της παραγόμενης ισχύος στα επιθυμητά επίπεδα και η ταχύτητα περιστροφής διατηρείται κοντά στην ονομαστική ταχύτητα. Όταν οι συνθήκες επανέλθουν στα προηγούμενα επίπεδα ή πάρουν φυσιολογικές τιμές τότε τα πτερύγια επανέρχονται στην αρχική τους θέση ή σε θέση τέτοια ώστε να παίρνουμε στην έξοδο της γεννήτριας της επιθυμητή ποσότητα ισχύος. Έτσι με αυτό τον τρόπο η Α/Γ μπορεί και λειτουργεί ακόμα και σε υψηλές ταχύτητες ανέμου ανεξάρτητα από την ισχύ του φορτίου.





Σχήμα 4.8 Καμπύλη ισχύος μίας Α/Γ με έλεγχο βήματος πτερυγίου

Όπως παρατηρούμε από το παραπάνω διάγραμμα η μέγιστη ισχύς της ανεμογεννήτριας με έλεγχο βήματος πτερυγίου επιτυγχάνεται σε μια τιμή της ταχύτητα ανέμου και διατηρείται σταθερή από εκεί και πάνω. Αυτό επιτυγχάνεται με τον έλεγχο βήματος, όπως είπαμε παραπάνω, όπου μας επιτρέπει αν εκμεταλλευόμαστε στο έπακρο την ενέργεια του ανέμου που περιστρέφει την ανεμογεννήτρια.

#### Πλεονεκτήματα της μεθόδου ελέγχου βήματος πτερυγίου:

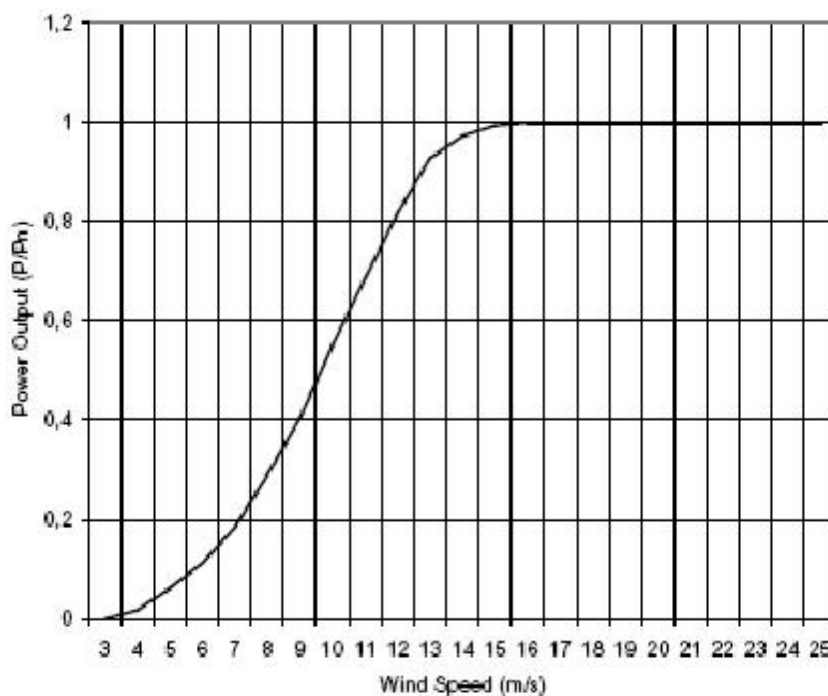
- Δίνει τη δυνατότητα εκμετάλλευσης όλων των ταχυτήτων ανέμου συμπεριλαμβανόμενων όλων των πιθανών διακυμάνσεων και των ριπών.
- Είναι γρήγορη μέθοδος ρύθμισης της ισχύος εξόδου, ιδιότητα που είναι χρήσιμη για υψηλές ταχύτητες ανέμου.
- Προστατεύει τα πτερύγια από καταπόνηση
- Βοηθά και κατά την εκκίνηση την ανεμογεννήτρια αφού ρυθμίζει το βήμα του πτερυγίου και κατά συνέπεια το τοποθετεί σε σωστή θέση σε σχέση με τον άνεμο.
- Τα παραπάνω χαρακτηριστικά και ο τρόπος λειτουργίας της μεθόδου αυτής την κάνει να λειτουργεί και σαν αυτόνομη πέδη δηλαδή ως αεροπέδη η οποία μπορεί και να υποκαθιστά την μηχανική πέδη.

### Μειονεκτήματα της μεθόδου ελέγχου βήματος πτερυγίου:

- Είναι ακριβή σαν μέθοδος αφού υπάρχουν πολλά στρεφόμενα μέρη τα οποία κινούνται μέσω σερβομηχανισμού και υδραυλικών συστημάτων. Επιπλέον χρειάζεται και ειδικά σχεδιασμένη πλήμνη. Για την άψογη απόδοσή του χρειάζεται και επικοινωνία με τον ελεγκτή της ανεμογεννήτριας που σημαίνει πρόσθετα κόστη εξοπλισμού, ηλεκτρικές συνδέσεις άρα εμφανίζει και πολυπλοκότητα.
- Λόγω της μηχανικής περιστροφής του πτερυγίου εμφανίζουν την ανάγκη για συχνή συντήρηση και πιθανότητα βλάβης των μερών αυτών.
- Τα ηλεκτρονικά που απαιτούνται γι' αυτή τη λειτουργία είναι ευάλωτα σε περιπτώσεις κεραυνών ή ακραίων θερμοκρασιών που σημαίνει ότι πιθανή βλάβη τους μπορεί εκτός από το κόστος αντικατάστασης να επιφέρει και βλάβες στον έλικα.

### Έλεγχος ενεργής απώλειας στήριξης(activestallcontrol).

Αυτός ο έλεγχος επιτυγχάνει περιορισμό ισχύος πάνω από την ονομαστική ταχύτητα ανέμου στρέφοντας αρχικά τα πτερύγια προς την απώλεια στήριξης, δηλαδή στην αντίθετη κατεύθυνση από ότι στον έλεγχο βήματος πτερυγίου και μερικές φορές λέγεται αρνητικός έλεγχος βήματος ( negativepitchcontrol ). Εδώ το εύρος της γωνίας κίνησης των πτερυγίων είναι μικρό (περίπου  $0^{\circ}$ -  $4^{\circ}$  ). Εκτός της καλύτερης εκμετάλλευσης της ανεμογεννήτριας επιτυγχάνεται και ευκολότερα η εκκίνηση και η αποσύνδεση της.



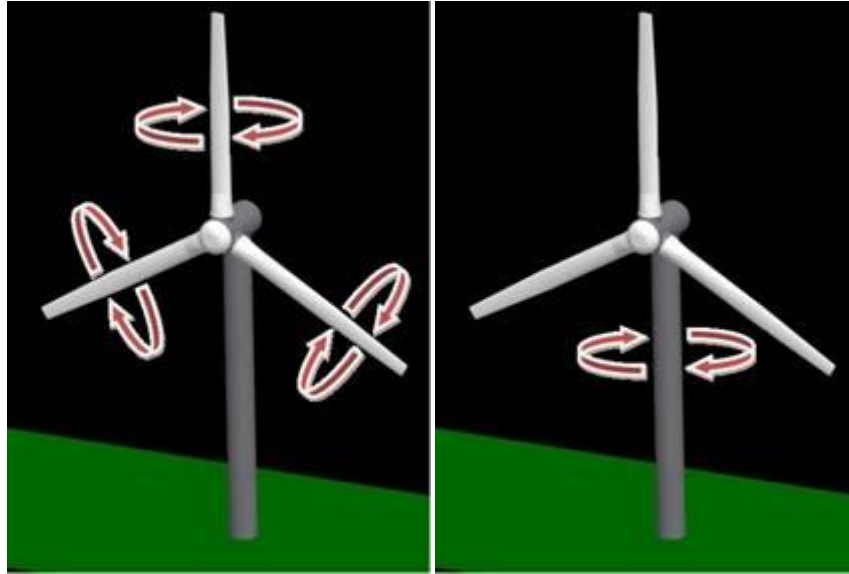
#### Σχήμα 4.9 Καμπύλη ισχύος μίας Α/Γ με ενεργό έλεγχο απώλειας στήριξης

Αν συγκρίνουμε την παραπάνω καμπύλη με την αντίστοιχη την ανεμογεννήτριας με έλεγχο του βήματος πτερυγίων θα παρατηρήσουμε ότι έχουν αρκετές ομοιότητες. Πράγματι μετά από μια κρίσιμη ταχύτητα του ανέμου και στις δύο περιπτώσεις διατηρείται σταθερή και ίση με την ονομαστική η ισχύς εξόδου, ανεξάρτητα από την περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Το πλεονέκτημα όμως της ενεργού απώλειας στήριξεως και το σημείο στο οποίο βελτιώνει τα μέθοδο ελέγχου βήματος είναι ότι μας δίνει μεγαλύτερη ισχύ για ταχύτητες ανέμου μικρότερες από την ονομαστική. Η καμπύλη δλδ αυξάνει πιο γρήγορα, γεγονός που σημαίνει ότι έχω καλύτερη απόδοση για ταχύτητα ανέμου μικρότερη από την ονομαστική.

Γενικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της μεθόδου ελέγχου ενεργής απώλειας στήριξης είναι ίδια με της μεθόδου ελέγχου βήματος. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι εφαρμόζεται σε μεγάλες ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας.

#### Έλεγχος προσανατολισμού(Yawcontrol).

Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα χρησιμοποιούν ένα μηχανισμό οδήγησης του συστήματος προσανατολισμού για να κρατήσει την τουρμπίνα αντιμέτωπη με τον άνεμο. Ο ίδιος μηχανισμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσανατολίσει την ανεμογεννήτρια τουρμπίνα «έξω» από τον άνεμο ώστε να περιοριστεί η παραγόμενη ισχύς και συνεπώς να έχουμε έλεγχο. Υπάρχουν όμως δύο παράγοντες που αντιστρατεύονται την γρήγορη απόκριση ενός τέτοιου συστήματος. Ο πρώτος είναι η μεγάλη ροπή αδράνειας της ατράκτου και του ρότορα γύρω από τον άξονα του συστήματος προσανατολισμού και ο δεύτερος ότι για μία μεταβολή της γωνίας προσανατολισμού έστω κατά  $10^0$  η μείωση της ισχύος είναι ένα μικρό ποσοστό της ονομαστικής ισχύος, ενώ για μεταβολή της γωνίας του βήματος πτερυγίου κατά  $10^0$  η ισχύς εξόδου υποδιπλασιάζεται.



Σχήμα 4.10 Οι μέθοδοι ελέγχου βήματος πτερυγίου (pitchcontrol) (αριστερά) και ελέγχου προσανατολισμού (Yawcontrol) (δεξιά) ώστε να γίνει κατανοητή η διαφορά τους.

Στην προηγούμενη ενότητα έγινε μια παρουσίαση των μεθόδων ελέγχου των ανεμογεννητριών. Το κριτήριο της κατηγοριοποίησης ήταν η ύπαρξη ενεργητικής ή παθητικής μεθόδου πραγματοποίησης του ελέγχου. Στην ενότητα που ακολουθεί το κριτήριο που θα ληφθεί υπ όψη είναι οι ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της ανεμογεννήτριας και θα διακρίνουμε δύο κατηγορίες.

- Τις ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών ή σταθερής ταχύτητας
- Τις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών.

Οι παραπάνω κατηγορίες μπορούν να συνδυαστούν με παθητικά ή ενεργητικά συστήματα ελέγχου και έτσι συνθέτετε ένα πλήθος διαφορετικών συνδυασμών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, το καθένα με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του.

### 4.3 Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών

Στις ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών η γεννήτρια (επαγωγική μηχανή) συνδέεται απευθείας στο δίκτυο. Επειδή η ταχύτητα είναι σχεδόν σταθερή σε σχέση με την συχνότητα του δικτύου, δεν είναι δυνατόν να αποθηκεύσει τις ριπές του ανέμου υπό μορφή μηχανικής ενέργειας. Έτσι σε αυτές τις ανεμογεννήτριες οι ριπές του ανέμου έχουν σαν αποτέλεσμα να προκαλούνται διακυμάνσεις στην ισχύ του, επηρεάζοντας δυσμενώς την ποιότητα ισχύος του δικτύου.

Το σύστημα αυτό παρουσιάζει το πλεονέκτημα της εξαιρετικής απλότητας και αξιοπιστίας και των μηδενικών αναγκών συντήρησης, γεγονός που συνέβαλλε στην καθιέρωσή του, σε μια εποχή όπου η αξιοπιστία ήταν το βασικότερο πρόβλημα των ανεμογεννητριών.

Ταυτόχρονα, το σχήμα αυτό εμφανίζει καθοριστικά μειονεκτήματα τα οποία σχετίζονται με τη σταθερότητα των στροφών και με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της επαγωγικής μηχανής. Τα σημαντικότερα είναι η αυξημένη μεταβλητότητα των ροπών και της ισχύος εξόδου, η αδυναμία απόσβεσης των ταλαντώσεων του μηχανικού συστήματος, ο χαμηλός συντελεστής ισχύος εξόδου και τα μεταβατικά φαινόμενα εκκίνησης της επαγωγικής γεννήτριας.

#### **4.4 Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών**

Τα τελευταία χρόνια οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών έχουν καταστεί ο κυρίαρχος τύπος των ανά έτος εγκαθιστάμενων Α/Γ. Το αυξημένο ενδιαφέρον σε αυτές οφείλεται στα ελκυστικά χαρακτηριστικά τους, εξαιτίας της παρουσίας του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος και όσον αφορά την ίδια την Α/Γ και όσον αφορά τις ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις των διαχειριστών του δικτύου για καλύτερη ποιότητα παραγόμενης ισχύος από ανανεώσιμες πηγές.

Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας έχουν πιο πολύπλοκο ηλεκτρικό σύστημα από αυτές με σταθερή ταχύτητα. Είναι εφοδιασμένες με επαγωγική ή σύγχρονη γεννήτρια και ένα μετατροπέα ισχύος. Η παρουσία του μετατροπέα ισχύος καθιστά δυνατή τη λειτουργία σε διάφορες ταχύτητες. Έτσι αυτές μπορούν να σχεδιασθούν να επιτύχουν μεγαλύτερο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος σε ένα σημαντικό εύρος ταχυτήτων ανέμου.

Ο μετατροπέας ισχύος ελέγχει την ταχύτητα της γεννήτριας κατά τέτοιο τρόπο, ώστε οι διακυμάνσεις της ισχύος που οφείλονται σε αλλαγή της ταχύτητας του ανέμου, να απορροφώνται από αλλαγή στην ταχύτητα της γεννήτριας. Ο μετατροπέας ισχύος αναλαμβάνει να ομαλοποιήσει την ισχύ που δεν παράγεται ομαλή λόγω του μεταβλητού αριθμού των στροφών της ανεμογεννήτριας.

Τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα της λειτουργίας με μεταβλητές στροφές σε σχέση με λειτουργία με σταθερές είναι:

- Μειωμένη μηχανική καταπόνηση στα μηχανικά μέρη, όπως ο άξονας και το κιβώτιο ταχυτήτων. Η υψηλή αδράνεια της ανεμογεννήτριας χρησιμοποιείται σαν αποθήκη ενέργειας

κατά τη διάρκεια ριπών του ανέμου, δηλαδή η διακύμανση της ισχύος απορροφάται στην μηχανική αδράνεια της ανεμογεννήτριας.

- Αυξημένη παραγωγή ισχύος, καλύτερη εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού. Εξαιτίας του χαρακτηριστικού της μεταβλητής ταχύτητας, είναι δυνατή η συνεχής προσαρμογή της γωνιακής ταχύτητας της ανεμογεννήτριας στην ταχύτητα του ανέμου κατά τέτοιο τρόπο, ώστε ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος να διατηρείται στη μέγιστη τιμή του.
- Μειωμένος ακουστικός θόρυβος. Η λειτουργία σε χαμηλές ταχύτητες είναι δυνατή σε χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου.
- Επίσης, η παρουσία του μετατροπέα δίνει στην ανεμογεννήτριας την δυνατότητα να εκπληρώσει τις υψηλές τεχνικές απαιτήσεις που επιβάλλονται από τους διαχειριστές των δικτύων και οι οποίες είναι :
  - Ελεγχόμενη ενεργό και άεργο ισχύ.
  - Γρήγορη απόκριση σε περίπτωση μεταβατικών φαινομένων.
  - Επίδραση στην σταθερότητα του δικτύου.
  - Βελτιωμένη ποιότητα ισχύος (βελτιωμένο επίπεδο flicker, φιλτραρισμένες κατώτερες αρμονικές και περιορισμένα ρεύματα βραχυκύκλωσης ).

Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά κάνουν τις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών πολύ δημοφιλείς, παρά τα κάποια μειονεκτήματα, όπως οι απώλειες στον μετατροπέα ισχύος και το αυξημένο κόστος εγκατάστασης εξαιτίας του.

Υπάρχουν δύο κυρίαρχες ομάδες με Α/Γ μεταβλητών στροφών :

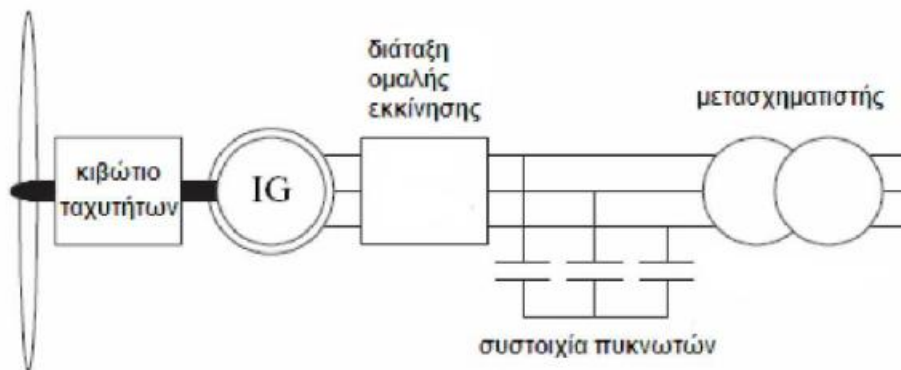
- Οι διατάξεις πλήρους εύρους μεταβλητής ταχύτητας, όπου ο στάτης της γεννήτριας συνδέεται στο δίκτυο μέσω ενός μετατροπέα πλήρους ισχύος. Η γεννήτρια μπορεί να είναι σύγχρονη ή ασύγχρονη.
- Οι διατάξεις περιορισμένου εύρους μεταβλητής ταχύτητας, όπου ο στάτης της γεννήτριας συνδέεται στο δίκτυο. Η συχνότητα και η ταχύτητα του δρομέα ελέγχονται . Υπάρχουν δύο τέτοιες διατάξεις :
  - Η διάταξη μεταβλητής αντίστασης του δρομέα, όπου ο δρομέας συνδέεται σε μια εξωτερική ελεγχόμενη αντίσταση, της οποίας το μέγεθος καθορίζει το εύρος της μεταβλητής ταχύτητας ( περίπου 0-10% πάνω από τη σύγχρονη ).

- Η διάταξη της επαγωγικής γεννήτριας διπλής τροφοδότησης όπου ο δρομέας ελέγχεται από ένα μετατροπέα μερικής κλίμακας, του οποίου το μέγεθος καθορίζει την ταχύτητα ( $\pm 30\%$  γύρω από την σύγχρονη).

### Τοπολογίες Ανεμογεννητριών

#### Ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών με επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού.

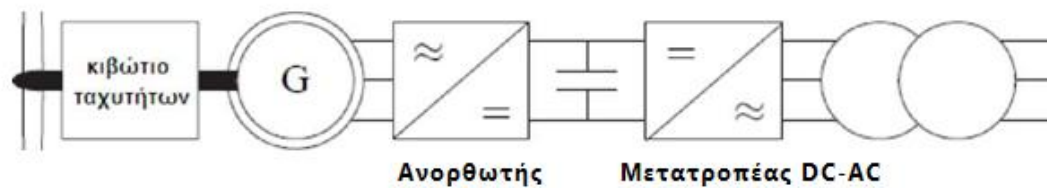
Ο δρομέας μίας ανεμογεννήτριας σταθερής ταχύτητας λειτουργεί με σχεδόν σταθερή ταχύτητα περιστροφής, που προσδιορίζεται από την συχνότητα του δικτύου, τον λόγο του κιβωτίου ταχυτήτων και τον αριθμό ζευγών πόλων της επαγωγικής γεννήτριας βραχυκυκλωμένου κλωβού, ανεξάρτητα από την ταχύτητα του αέρα. Ο στάτης της γεννήτριας συνδέεται με το δίκτυο με μία διάταξη ομαλής εκκίνησης ( soft starter ) και μία συστοιχία πυκνωτών για τη μείωση της κατανάλωσης άεργου ισχύος όπως φαίνεται στο σχήμα 4.11.



Σχήμα 4.11 Ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών με επαγωγική μηχανή βραχυκυκλωμένου δρομέα.

#### Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με μετατροπέα πλήρους ισχύος.

Αυτή η τοπολογία παρουσιάζεται στο σχ.12. Συνίσταται σε μία Α/Γ μεταβλητών στροφών, εφοδιασμένη με μετατροπέα ισχύος συνδεδεμένο στο στάτη της γεννήτριας. Η γεννήτρια μπορεί να είναι επαγωγική βραχυκυκλωμένου κλωβού ή σύγχρονη μύχανη. Το κιβώτιο ταχυτήτων είναι σχεδιασμένο, έτσι ώστε η μέγιστη ταχύτητα του ρότορα να αντιστοιχεί στην ονομαστική τιμή της ταχύτητας της γεννήτριας. Στην περίπτωση της σύγχρονης γεννήτριας, αυτή μπορεί να διεγείρεται στα τυλίγματα του δρομέα με συνεχές ρεύμα ή να είναι μονίμων μαγνητών.



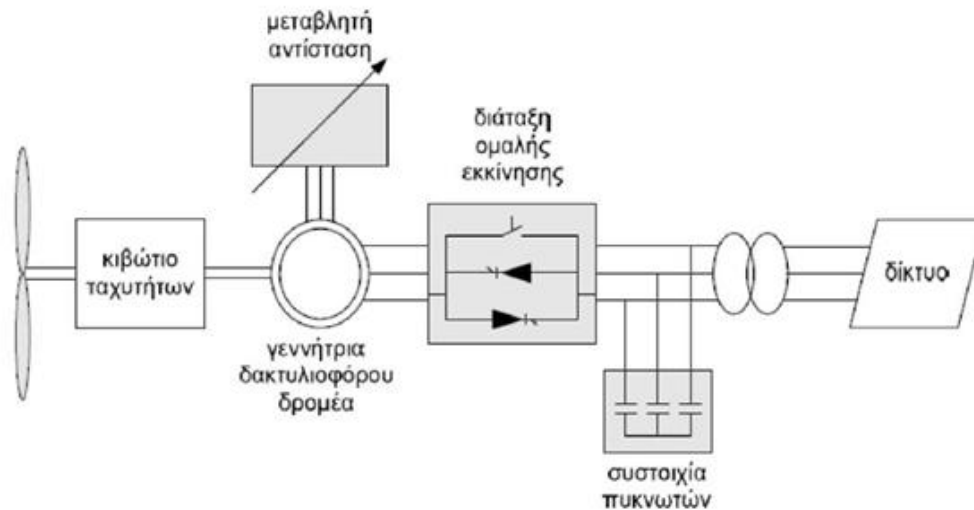
Σχήμα 4.12 Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με σύγχρονη ή επαγωγική γεννήτρια.

#### Ανεμογεννήτρια περιορισμένου εύρους μεταβολής της ταχύτητας.

Σε αυτές τις τοπολογίες χρησιμοποιείται ασύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου. Ο στάτης συνδέεται κατευθείαν στο δίκτυο. Για τα τυλίγματα του δρομέα διακρίνουμε δύο περιπτώσεις.

Στην πρώτη περίπτωση (σχήμα 13) στα τυλίγματα του δρομέα συνδέουμε εξωτερικά μια ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση.



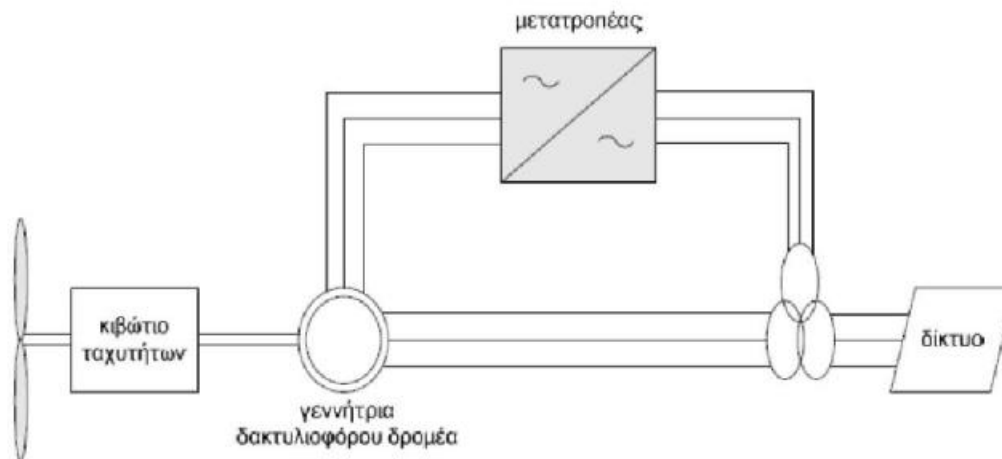


Σχήμα 4.13 Γεννήτρια με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα.

Με αυτόν τον τρόπο η ολίσθηση του δρομέα αλλάζει, μεταβάλλοντας την συνολική αντίσταση του ρότορα μέσω ενός μετατροπέα, ο οποίος συνδέεται στον άξονα του ρότορα. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- Το εύρος μεταβολής της ταχύτητας είναι μόνο 0-10%, επειδή εξαρτάται από το μέγεθος της αντίστασης.
- Οι απώλειες ισχύος στην εξωτερική αντίσταση είναι σημαντικές.
- Δεν ελέγχεται ικανοποιητικά η ενεργός και άεργος ισχύς.

Η δεύτερη περίπτωση αφορά την διάταξη που έχει κυριαρχήσει τα τελευταία χρόνια, όπου χρησιμοποιείται γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης σχήμα 14.



Σχήμα 4.14 **Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με επαγωγική μηχανή με δακτυλίους διπλής τροφοδότησης.**

Αποτελείται από μία γεννήτρια επαγωγής δακτυλιοφόρου δρομέα με τα τυλίγματα του στάτη απευθείας συνδεδεμένα με το τριφασικό δίκτυο και με τα τυλίγματα του δρομέα συνδεδεμένα μέσω δακτυλιδιών ολίσθησης και ψηκτρών με ένα μετατροπέα ισχύος ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ. Αυτός ο μετατροπέας επιλέγεται επειδή πρέπει να μπορεί να καλύψει ένα μεγάλο εύρος λειτουργίας από την υποσύγχρονη μέχρι την υπερσύγχρονη λειτουργία, (δηλαδή η γεννήτρια να μπορεί να περιστραφεί με ταχύτητες μικρότερες και μεγαλύτερες από τη σύγχρονη ταχύτητα). Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει ο μετατροπέας ισχύος πρέπει να μπορεί να λειτουργεί με ροή ισχύος και προς τις δύο κατευθύνσεις.

Η παρουσία του μετατροπέα ισχύος επιτρέπει στην γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης μία πιο ευέλικτη και ευπροσάρμοστη λειτουργία, σε σύγκριση με μία επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού. Έτσι βελτιώνονται οι δυνατότητες ελέγχου μιας τέτοιας γεννήτριας όπως :

- Δίνεται η δυνατότητα ελέγχου της άεργου ισχύος μέσω της διέγερσης της γεννήτριας. Η γεννήτρια είναι ικανή να παράγει ή να απορροφήσει άεργο ισχύ προς ή από το δίκτυο.
- Μπορεί να μαγνητίσει την μηχανή μέσα από το κύκλωμα του δρομέα, ανεξάρτητα από την τάση του δικτύου.

Η επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου ελέγχου ανεμογεννητριών ανάλογα με την ισχύ τους δεν είναι κάτι που μπορεί να γίνει σε θεωρητικό επίπεδο. Είναι μια διαδικασία που επηρεάζεται από πάρα πολλές παραμέτρους και συνήθως η μέθοδος επηρεάζεται από το

περιβάλλον που πρόκειται να τοποθετηθεί η ανεμογεννήτρια, από την ισχύ που επιθυμούμε να παράγουμε, αλλά και το σκοπό που αυτή πρόκειται να εξυπηρετήσει. Το θέμα ξεφεύγει από το ακαδημαϊκά πλαίσια και γίνεται τεχνικό, γεγονός που καθιστά δύσκολη την εύρεση βιβλιογραφικών αναφορών. Επίσης οι πληροφορίες από της εταιρίες που ασχολούνται με το αντικείμενο είναι περιορισμένες επειδή αποτελούν τεχνογνωσία τους την οποία εκμεταλλεύονται εμπορικά. Σε γενικές γραμμές όμως μπορούμε να πούμε τα παρακάτω:

Σε οικιακές εφαρμογές παραγωγής μικρής ισχύος από ανεμογεννήτρια με ισχύ μέχρι 5KW η καλύτερη μέθοδος ελέγχου είναι με απώλειας στήριξης (stall control). Το πρόβλημα της κακής ποιότητας παραγόμενης ισχύος, αντισταθμίζεται από το γεγονός ότι η παραγόμενη ενέργεια θα αποθηκευτεί σε μπαταρίες πριν τη χρήση. Τα οφέλη της χρήσης stallcontrol είναι πάρα πολλά καθώς δεν χρειάζεται ο ιδιώτης καταναλωτής να επωμισθεί το κόστος των ηλεκτρονικών διατάξεων ελέγχου που έχουν οι ενεργητικές μέθοδοι ελέγχου (έλεγχος πτερυγίων, αντιστροφείας κτλ.)

Σε εφαρμογές παραγωγής μεγάλης ποσότητας ενέργειας, δηλαδή για ανεμογεννήτριες μεγάλης ισχύος (από 10 KW μέχρι γεννήτριες αρκετών MW), βέλτιστη λύση αποτελεί η χρήση μιας από τις ενεργητικές μεθόδους ελέγχου. Αυτό συμβαίνει για τους παρακάτω λόγους:

- Με τις ενεργητικές μεθόδους ελέγχου έχουμε μεγαλύτερη αξιοποίηση της ανεμογεννήτριας σε σχέση με τις συνθήκες ανέμου, συνεπώς καλύτερο βαθμό απόδοσης του συστήματος.
- Η παραγόμενη ενέργεια συνδέεται στο Εθνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα της ΔΕΗ. Για το λόγο αυτό η ποιότητα της παραγόμενης ενέργειας είναι μια παράμετρος που παίζει καθοριστικό λόγο. Αυτή η ποιότητα εξασφαλίζεται με τη χρήση ενεργητικών μεθόδων ελέγχου (πχ Pitch control)

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

### **ΕΠΙΛΟΓΗ ΘΕΣΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΑ**

## 5.1 Επιλογή θέσης εγκατάστασης

Ο αντικειμενικός σκοπός της διαδικασίας επιλογής της θέσης εγκατάστασης μιας ανεμογεννήτριας είναι ο προσδιορισμός σε "λογικό" χρονικό διάστημα των θέσεων, οι οποίες παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη πιθανότητα οικονομικοτεχνικής βιωσιμότητας των μελλοντικών αιολικών εγκαταστάσεων με την ταυτόχρονη μεγαλύτερη αποδοχή εκ μέρους του κοινωνικού περίγυρου.

Αν εξαιρεθούν οι απαιτήσεις που συνδέονται με τα ανεμολογικά στοιχεία μιας περιοχής, η διαδικασία εγκατάστασης μιας ή περισσοτέρων ανεμογεννητριών χαρακτηρίζεται από τα ίδια οικονομικοτεχνικά κριτήρια, που δεσμεύουν οποιαδήποτε ενεργειακή επένδυση. Δηλαδή για παράδειγμα η εγκατάσταση της ανεμογεννήτριας θα πρέπει να βρίσκεται σε περιοχή προσπελάσιμη στα συνήθη μεταφορικά μέσα, να υπάρχει πρόσβαση σε λιμάνια ή συγκοινωνιακούς κόμβους, να είναι κοντά στο δίκτυο της Δ.Ε.Η. στην περίπτωση σύνδεσης της με το εθνικό δίκτυο κ.α. Παράλληλα απαιτείται και η σύμφωνη γνώμη του κοινωνικού περιγυρου, με τη διαβεβαίωση ότι η εγκατάσταση των ανεμογεννητριών δεν θα αλλοιώσει το περιβάλλον, καθώς και με την υπενθύμιση ότι η αιολική ενέργεια είναι μια τελείως καθαρή μορφή ενέργειας.

Από την πλευρά της βέλτιστης επιλογής της τοποθεσίας εγκατάστασης μιας ανεμογεννήτριας σε σχέση με το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό η τήρηση των βασικών ανεμολογικών κριτηρίων, προϋποθέτει την επιλογή τοποθεσιών με:

- α. Υψηλή μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου.
- β. Αιολικό δυναμικό υψηλής ποιότητας, δηλαδή μεγάλη διάρκεια ισχυρών ανέμων και περιορισμένη ύπαρξη περιόδων νηνεμίας.
- γ. Απουσία αποφράξεων του ανέμου καθώς και υψηλών εμποδίων.

Βάσει των παραπάνω κριτηρίων ενδιαφέροντα μέρη αποτελούν οι κορυφές λείων και κυκλοτερών λόφων με ελαφρές κατωφέρειες και ανοικτό ορίζοντα, καθώς και οι ανοικτές πεδιάδες, οι ακρογιαλιές ή τέλος και τα ανοίγματα των βουνών που δημιουργούν φυσικούς επιταχυντές (ρεύματα αέρα).

Υπενθυμίζοντας ότι η σωστή επιλογή της θέσης εγκατάστασης μιας ανεμογεννήτριας αποτελεί μια αρκετά σύνθετη διαδικασία, που πρέπει να λάβει υπόψη της πολλούς και διαφορετικής φύσης παράγοντες, παρουσιάζουμε στη συνέχεια και σε συντομία τα τυπικά βήματα επιλογής της ακριβούς τοποθεσίας εγκατάστασης μιας ανεμογεννήτριας.

Πιο συγκεκριμένα:

- i. Επιλέγουμε την ευρύτερη **περιοχή ενδιαφέροντος**.
- ii. Ακολούθως με υποδιαίρεση της παραπάνω περιοχής, εντοπίζουμε τις **υποψήφιες περιοχές**, που διαθέτουν αιολικό δυναμικό υψηλής ποιότητας. Μια καλή ένδειξη αυτών των περιοχών προκύπτει και από την επεξεργασία των ιστορικών-λαογραφικών στοιχείων μιας περιοχής, όπου για παράδειγμα υπήρξαν εγκατεστημένοι στο παρελθόν ανεμόμυλοι.
- iii. Επιλογή των **υποψηφίων θέσεων** στις οποίες είναι δυνατή από τεχνικής πλευράς η εγκατάσταση ανεμοκινητήρων.
- iv. Επιλογή και επαλήθευση της **τελικής θέσεως**.

Τα παραπάνω στάδια δεν έχουν, όπως θα αναπτύξουμε στη συνέχεια, την ίδια χρονικήδιάρκεια, δεδομένου ότι τα πρώτα δύο είναι σχετικά σύντομα. Συνήθως απαιτείται μια περίοδος περίπου  $18 \div 24$  μηνών για την τελική επιλογή της ακριβούς θέσεως για την εγκατάσταση μιας ή περισσοτέρων ανεμογεννητριών. Για την τεκμηριωμένη δεεπιλογή της θέσεως εγκατάστασης συνίσταται η χρήση πολυκριτηριακής μεθόδου αξιολόγησης των υποψήφιων περιοχών, που θα πρέπει να συμπληρώνεται από την απαραίτητη ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων. Στην περίπτωση αυτή καταγράφονται οι διάφοροι παράμετροι του προβλήματος και στη συνέχεια κατατάσσονται ανάλογα με τη σπουδαιότητά τους, καθορίζοντας τους αντίστοιχους συντελεστές βαρύτητας. Ακολούθως αξιολογούνται όλες οι υποψήφιες περιοχές και βαθμολογούνται ανάλογα με το συντελεστή κάλυψης του κάθε κριτηρίου. Η τελική βαθμολογία των υποψήφιων λύσεων προκύπτει από το άθροισμα του γινομένου της βαθμολογίας επί τον αντίστοιχο συντελεστή βαρύτητας του κάθε κριτηρίου. Βάσει της τελικής βαθμολογίας ιεραρχούνται οι υποψήφιες λύσεις και παρουσιάζονται στον υποψήφιο επενδυτή. Εφόσον χρειάζεται ακολουθεί η απαραίτητη ανάλυση ευαισθησίας του προβλήματος.

## **5.2 Παράμετροι Επιλογής Τοποθεσίας Αιολικών Εγκαταστάσεων**

Η εκτίμηση του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής αποτελεί ένα καθοριστικό αλλά όχι και το μοναδικό παράγοντα που προσδιορίζει την περιοχή εγκατάστασης μιας ανεμογεννήτριας. Έτσι ο υπεύθυνος επιλογής πρέπει να συνυπολογίσει και άλλες επιμέρους παραμέτρους, προκειμένου να καταλήξει στην επιλογή της οριστικής θέσης εγκατάστασης. Πιο

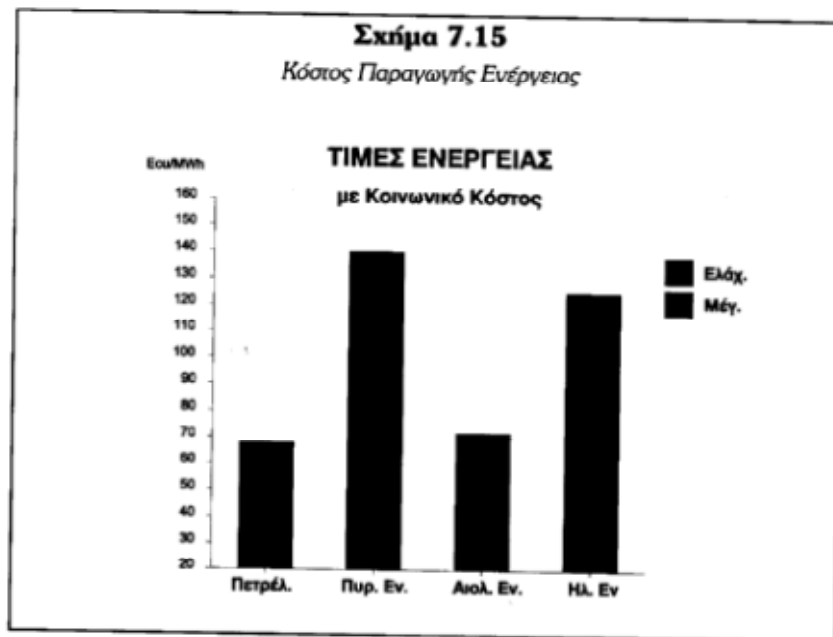
συγκεκριμένα η επιλογή θα είναι η καλύτερη δυνατή εφόσον συνυπολογισθούν και οι ακόλουθες συνιστώσες:

- α. Οικονομικά συμφέρουσα παραγωγή ενέργειας.
- β. Επιπτώσεις στο περιβάλλον από την αιολική εγκατάσταση.
- γ. Κανονισμοί και περιορισμοί στη χρήση γης.
- δ. Αποδοχή της ανεμογεννήτριας από το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο.
- ε. Αντιμετώπιση ακραίων μετεωρολογικών συνθηκών.
- στ. Αποδοχή της εγκαταστάσεως από το κοινό.

### **5.2.1 Οικονομική αξία**

Όπως είναι προφανές στόχος κάθε αιολικής εγκατάστασης είναι η παραγωγή φθηνής ηλεκτρικής ενέργειας, και μάλιστα φθηνότερης από την ήδη παραγόμενη από συμβατικά καύσιμα, (βλέπε σχήμα 4.1). Σε εγκαταστάσεις διασυνδεδεμένες με το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται για την εξοικονόμηση συμβατικού καυσίμου. Για το λόγο αυτό είναι σημαντικό να γνωρίζουμε το κόστος παραγωγής ενέργειας εκ μέρους των υφιστάμενων συμβατικών σταθμών, το είδος του καυσίμου που χρησιμοποιείται (αεριοστρόβιλος ή ΜΕΚ,

Μαζούτ ή Diesel), τις ώρες λειτουργίας των ανεμοκινητήρων (ημέρα ή νύκτα) καθώς και την περίοδο του έτους που έχουμε τη μέγιστη αιολική ισχύ. Επίσης δεν πρέπει να αγνοείται η συνεισφορά ισχύος των αιολικών σταθμών στο τοπικό δίκτυο.



**Σχήμα 5.1: Συνάρτηση Ενέργειας με το Κοινωνικό Κόστος**

Τέλος, τα τελευταία χρόνια γίνεται μια συστηματική προσπάθεια για συνυπολογισμό στην τελική τιμή της ενέργειας και του κοινωνικού ή εξωτερικού κόστους, σχήμα 4.1. Στην περίπτωση αυτή επανακαθορίζεται η συγκριτική θέση κόστους παραγωγής ενέργειας από κάθε διαθέσιμη πηγή, συμπεριλαμβάνοντας στο συνολικό κόστος της ενέργειας εκτός του χρηματικού και το αντίστοιχο κοινωνικό-εξωτερικό κόστος.

Επιπλέον πρέπει να συνεκτιμηθεί το κόστος αρχικής εγκατάστασης και συντήρησης και λειτουργίας, γεγονός που ευνοεί περιοχές κοντά στο οδικό δίκτυο, δηλαδή περιοχές ευκόλως προσπελάσιμες. Στην περίπτωση δε μεταφοράς της παραγόμενης ενέργειας είναι χρήσιμο η επιλεγείσα περιοχή να βρίσκεται κοντά στις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας του τοπικού δικτύου. Αναλυτικά στοιχεία για την οικονομική αξιολόγηση υπονηψίων περιοχών δίνονται στο τρίτο μέρος της παρούσας εργασίας.

### 5.2.2 Επιδράσεις στο περιβάλλον

Είναι εν γένει γνωστό ότι οι αιολικές μηχανές προκαλούν περιορισμένες επιδράσεις στο περιβάλλον. Αυτό μάλιστα γίνεται σαφέστερο, όταν αναλογισθούμε τις επιδράσεις των αντίστοιχων θερμοηλεκτρικών ή πυρηνικών σταθμών παραγωγής ενέργειας στα οικοσυστήματα μιας περιοχής. Παρόλα αυτά σε μεμονωμένες περιπτώσεις αναφέρονται

ορισμένες αρνητικές επιπτώσεις των αιολικών μονάδων στο περιβάλλον. Στα παραδείγματα καταγράφονται:

**i. Η οπτική αισθητική επίδραση**, η οποία είναι κάπως έντονη σε περιπτώσεις εγκαταστάσεως ανεμοκινητήρων μεγάλων διαστάσεων (άνω των 500kW, ύψος 50m, διάμετρος πτερωτής 35m) σε σχετικά κλειστές περιοχές. Αντίθετα η εγκατάσταση μηχανών ή και ενός αιολικού πάρκου σε ανοικτές εκτάσεις δε φαίνεται να επηρεάζει αρνητικά την οπτική αισθητική της περιοχής.

Επειδή στο θέμα αυτό έχει δοθεί υπερβολική δημοσιότητα τα τελευταία χρόνια είναι δυνατόν να συνοψίσουμε εν συντομία τα αποτελέσματα πρόσφατων ερευνών. Πράγματι η χρησιμοποίηση απλών σωληνωτών πύργων σε χρωματισμό που συμφωνεί με το περιβάλλον φαίνεται να παρουσιάζει καλύτερη οπτική αποδοχή από τη χρησιμοποίηση δικτυωτού πύργου. Παράλληλα η επίτευξη οπτικής ομοιομορφίας έχει αποδειχθεί ότι δεν διαταράσσει ιδιαίτερα την αρμονία της περιοχής. Η οπτική ομοιομορφία περιλαμβάνει ομοιότητα διαστάσεων δρομέα και υπερκατασκευής (όχι αναγκαστικά ίδιου τύπου μηχανές), καθώς και ύψους πύργου στήριξης.

Τέλος όταν οι ανεμογεννήτριες περιστρέφονται το ανθρώπινο μάτι τις θεωρεί χρήσιμες με αποτέλεσμα να γίνονται ευκολότερα οπτικά αποδεκτές καθώς φαίνεται να εξυπηρετούν κάποιο σκοπό. Αντίθετα, όταν σημαντικός αριθμός ανεμογεννητριών δεν δουλεύει ενώ πνέουν άνεμοι, η προσδοκία του παρατηρητή για χρησιμότητα των αιολικών μηχανών παραβιάζεται. Για το λόγο αυτό θεωρείται σκόπιμη η διατήρηση περιστροφής των δρομέων για το μεγαλύτερο δυνατό διάστημα, ενώ οι ιδιοκτήτες των αιολικών πάρκων θα πρέπει να συντηρούν τακτικά τις μηχανές τους και να αντικαθιστούν το γρηγορότερο τυχόν κατεστραμμένα τμήματα, ώστε να αυξηθεί η δημόσια αποδοχή των εγκαταστάσεων τους. Επιπλέον οι ανεμογεννήτριες που διαθέτουν τρία πτερύγια δίνουν ένα αισθητικά αρμονικότερο αποτέλεσμα, ενώ ο χρωματισμός των πύργων στήριξης και των πτερυγίων διαδραματίζει ουσιαστικό ρόλο στην ομαλή ενσωμάτωση των μηχανών στον περιβάλλοντα χώρο, με επικρατέστερη επιλογή το λευκό χρώμα και σαν εναλλακτική λύση το γκρι.

**ii. Οι επιδράσεις στο πουλιά** είναι δυνατόν να περιορισθούν, εφόσον αποφεύγονται περιοχές οι οποίες αποτελούν νυκτερινά περάσματα αποδημητικών πουλιών. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η μείωση του πληθυσμού των πτηνών και εμποδίζεται η καταστροφή των πτερυγίων της μηχανής.

Μελέτες που έγιναν για το σκοπό αυτό τόσο στις ΗΠΑ όσο και στην Ολλανδία, κατέγραψαν ένα μικρό αριθμό νεκρών πτηνών στην περιοχή των αιολικών πάρκων (π.χ. περίπου 60 πτηνά σε ένα έτος στην ευρύτερη περιοχή αιολικού πάρκου 25x300kW).



Σημαντικό μάλιστα ποσοστό των πτηνών αυτών βρέθηκε κοντά στο χώρο περιφράξης του οικοπέδου του αιολικού πάρκου. Ωστόσο το πρόβλημα δεν θεωρείται σημαντικό δεδομένης και της περιβαλλοντικής καθαρότητας της αιολικής ενέργειας σε σύγκριση με τις υπόλοιπες εναλλακτικές ενεργειακές λύσεις.

**iii. Η ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση** δημιουργείται λόγω της ανάκλασης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων πάνω στα περιστρεφόμενα πτερύγια του δρομέα. Μάλιστα κάποια στιγμή δόθηκε στις Η.Π.Α. υπερβολική δημοσιότητα στο θέμα αυτό, αναφέροντας παρεμβολές των αιολικών πάρκων στις τηλεοπτικές μεταδόσεις. Όμως η αντικατάσταση των μεταλλικών πτερυγίων από πλαστικά μέρη έχει περιορίσει σημαντικά το πρόβλημα αυτό. Σε κάθε όμως περίπτωση καλό είναι να αποφεύγονται περιοχές με εγκατεστημένες τηλεπικοινωνιακές κεραίες και αναμεταδότες.

Ειδικότερα στη χώρα μας το θέμα έχει αντιμετωπισθεί και νομοθετικά καθώς για την έκδοση άδειας εγκατάστασης από το ΥΠ.ΑΝ. απαιτείται είτε βεβαίωση της αρμόδιας Νομαρχίας ότι η αιολική εγκατάσταση απέχει τουλάχιστον 1 km από αναμεταδότες της τηλεόρασης (ΕΡΤ) και πομπούς της τηλεφωνίας (ΟΤΕ) ή έγγραφη συναίνεση των οργανισμών αυτών για μικρότερες αποστάσεις.

**iv. Τέλος, το πρόβλημα του θορύβου** αποτελεί ίσως τη μόνη πραγματική επιβάρυνση του περιβάλλοντος από την ύπαρξη αιολικών μονάδων, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις πολλών μηχανών μεγάλων διατάσεων. Βέβαια στο σημείο αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι η εγκατάσταση αιολικών πάρκων γίνεται κυρίως σε απομονωμένες περιοχές, ενώ ο προσεκτικός σχεδιασμός των σύγχρονων μηχανών έχει περιορίσει στο ελάχιστο τόσο τον αεροδυναμικό όσο και κάθε άλλο ηλεκτρομηχανολογικό θόρυβο.

Εν γένει ο μηχανικός θόρυβος προξενεί τη μεγαλύτερη όχληση σε ανεμογεννήτριες μικρού ή μεσαίου μεγέθους ( $N0 \leq 200 \text{ kW}$ ), ενώ στις μεγαλύτερες μηχανές ο μηχανικός θόρυβος είναι σημαντικά μικρότερης έντασης από το συνολικά μετρούμενο θόρυβο (έως και 10dB).

Οι κύριες πηγές μηχανικού θορύβου είναι το κιβώτιο μετάδοσης, η ηλεκτρογεννήτρια και τα έδρανα στήριξης. Η αντιμετώπιση του μηχανικού θορύβου γίνεται είτε στην πηγή είτε στη διαδρομή του. Ο μηχανικός θόρυβος στην πηγή μειώνεται είτε με επέμβαση στα στοιχεία που θορυβούν (π.χ. χρησιμοποιώντας οδοντωτούς τροχούς στο κιβώτιο μετάδοσης με πλάγια οδόντωση αντί ευθείας οδόντωσης) είτε με εσωτερική ηχομονωτική επένδυση στο κέλυφος της κατασκευής. Επίσης ο μηχανικός θόρυβος αντιμετωπίζεται και στη διαδρομή του χρησιμοποιώντας ηχομονωτικά πετάσματα καθώς και αντικραδασμικά πέλματα στήριξης. Τέλος σημαντική μείωση του μηχανικού θορύβου επιτυγχάνεται με τη μείωση των εξαρτημάτων που "θορυβούν", π.χ. κατάργηση του κιβωτίου μετάδοσης.

Αντίστοιχα ο αεροδυναμικός θόρυβος πρέπει να αντιμετωπισθεί κατά το στάδιο σχεδιασμού και κατασκευής της μηχανής, αποτελείται δε από το θόρυβο περιστροφής και το θόρυβο τύρβης. Ο θόρυβος περιστροφής περιλαμβάνει όλους τους θορύβους οι οποίοι έχουν διακριτές συχνότητες και παράγονται σε πολλαπλάσιες αρμονικές της συχνότητας διέλευσης των πτερυγίων, (δηλαδή τογινόμενο αριθμού πτερυγίων επί την τιμή της γωνιακής ταχύτητας). Η στάθμη του θορύβου περιστροφής αυξάνεται με τη διάμετρο, τη μείωση του αριθμού των πτερυγίων, τη μεγαλύτερη ταχύτητα των ακροπτερυγίων και την αεροδυναμική φόρτιση των πτερυγίων (αύξηση απορροφούμενης ισχύος).

Παράλληλα ο θόρυβος τύρβης συνδέεται με το στροβιλισμό του χείλους εκφυγής των ακροπτερυγίων αλλά και με το γενικό πεδίο τύρβης πίσω από την πτερωτή. Για να μειωθεί ο θόρυβος τύρβης πρέπει να ελαττωθεί η ταχύτητα των ακροπτερυγίων, περιορίζοντας ταυτόχρονα την αποδιδόμενη αιολική ισχύ.

Για την αντιμετώπιση του θορύβου, ιδιαίτερα τις ώρες κοινής ησυχίας, ορισμένοι κατασκευαστές παρέχουν στο χρήστη του αιολικού πάρκου την επιλογή της "νυκτερινής λειτουργίας" με μείωση των στροφών της πτερωτής αλλά και με παράλληλη μείωση της παραγόμενης ενέργειας.

### **5.2.3 Κανονισμοί και περιορισμοί στη χρήση γης**

Κατά τη φάση προεπιλογής των θέσεων εγκατάστασης μιας ανεμογεννήτριας ή ενός αιολικού πάρκου πρέπει να ληφθούν υπόψη οι τοπικοί νόμοι και οι κανονισμοί, που πιθανόν να εμποδίζουν τη χρησιμοποίηση της γης, για την εγκατάσταση κυρίως μεγάλων ανεμοκινητήρων. Τέτοιοι νόμοι αναφέρονται είτε στην προστασία ιστορικών και αρχαιολογικών χώρων, είτε στην προστασία του περιβάλλοντος με τη διατήρηση των τοπικών οικοσυστημάτων.

Έτσι στην περίπτωση ύπαρξης αρχαιολογικών ευρημάτων ή ιστορικών μνημείων (π.χ. απολιθωμένο δάσος στη Λέσβο) θα υπάρξουν πιθανώς αξεπέραστα εμπόδια από τις τοπικές αρχές (αρχαιολογικές υπηρεσίες, νομαρχία κ.λπ.) αλλά και από τους κατοίκους, οι οποίοι θα θελήσουν να προστατεύσουν την ιστορική τους κληρονομιά. Αντίστοιχα στην περίπτωση χαρακτηρισμού της περιοχής σαν οικοσύστημα, που πρέπει να προστατευθεί (π.χ. εθνικός δρυμός), θα τεθούν σημαντικά εμπόδια και από τις αρχές αλλά και από τους οικολογικούς συλλόγους.

Επιπλέον πρέπει να αποφεύγονται περιοχές με έντονη σεισμικότητα, καθώς και περιοχές με πρόβλημα κατολισθήσεων ή τέλος και περιοχές βραχώδεις, που θα δυσχεράνουν την προσπάθεια μεταφοράς και θεμελίωσης των μηχανών.

Αντίθετα θα πρέπει να συνυπολογισθεί θετικά κάθε επενδυτικό κίνητρο και κάθε αναπτυξιακός εθνικός ή κοινοτικός νόμος, ο οποίος πιθανόν να ενθαρρύνει έμπρακτα την εγκατάσταση ανεμοκινητήρων σε συγκεκριμένες περιοχές. Πράγματι η δημιουργία ενός αιολικού πάρκου έχει σαν επακόλουθο και τη δημιουργία κάποιων έργων υποδομής (π.χ. οδικό δίκτυο) καθώς και την άφθονη παραγωγή ενέργειας. Στα θετικά στοιχεία μπορεί επίσης να προστεθεί και η δυνατότητα χρήσης της περιοχής εγκατάστασης για την κτηνοτροφία.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να προστεθεί ότι πρόσφατα ανακινήθηκε το θέμα των "δικαιωμάτων επί του ανέμου", που σχετίζεται με την ελάχιστη απόσταση μεταξύ διαδοχικών ανεμοκινητήρων, έτσι ώστε να περιορίζεται η αλληλεπίδραση μεταξύ μηχανών που βρίσκονται σχετικά κοντά η μία στην άλλη. Επίσης η ισχύουσα νομοθεσία καθορίζει την ελάχιστη απόσταση του πλησιέστερου κινητού σημείου της περωτής από τα όρια γειτονικών οικοπέδων, από παρακείμενο δρόμο ή κοινόχρηστο χώρο αλλά και από τυχόν υπάρχοντα κτίσματα και οικοδομές.

Τέλος, στα θέματα χρήσης γης υπάρχει μια σαφής τάση για περιορισμό της απαιτούμενης έκτασης, είτε με την εγκατάσταση μεγαλύτερων και λιγότερων μηχανών είτε με την πυκνότερη διάταξη των ανεμογεννητριών, στα ιδιόχρηστα αιολικά πάρκα. Έτσι σήμερα αναλογούν μόλις 50m<sup>2</sup> γης για κάθε 1m<sup>2</sup> επιφάνειας περωτής, ενώ και από την προαναφερόμενη έκταση μόλις το 1% χρησιμοποιείται για την ανεμογεννήτρια, τη θεμελίωση του πύργου, το απαραίτητο οδικό δίκτυο και τις υπόλοιπες εγκαταστάσεις υποδομής.

#### **5.2.4 Αποδοχή της ανεμογεννήτριας από το τοπικό δίκτυο**

Κατά την αξιολόγηση των προς εγκατάσταση περιοχών είναι ιδιαίτερα σημαντικό, για μεγάλες κυρίως εγκαταστάσεις, να είναι αποδεκτή η διασύνδεση των υποψήφιων μηχανών με το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο, ώστε να είναι δυνατή η μεταφορά της παραγόμενης αιολικής-ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς προβλήματα. Επιπλέον πρέπει να δίνεται προσοχή στο να αποφεύγεται η "απομονωμένη" λειτουργία τμημάτων του δικτύου.

Για την αντιμετώπιση της "απομονωμένης" λειτουργίας τμήματος του δικτύου θα πρέπει να αποφεύγεται η απευθείας τροφοδοσία ομάδος καταναλωτών από το αιολικό πάρκο χωρίς τη μεσολάβηση συστήματος ελέγχου, ενώ επιθυμητή είναι η σύνδεση της ηλεκτρικής εξόδου του αιολικού πάρκου σε κομβικό σημείο του δικτύου, ώστε να παρέχεται η δυνατότητα

απορρόφησης τυχόν διακυμάνσεων (συχνότητας, τάσης) στα χαρακτηριστικά του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος.

Αντίστοιχα για την εξασφάλιση της απορρόφησης της παραγόμενης αιολικής-ηλεκτρικής ενέργειας τίθενται περιορισμοί στο μέγεθος των εγκαθισταμένων αιολικών πάρκων σε σύγκριση με το μέγιστο φορτίο (ζήτησης) του τοπικού δικτύου. Κατά κανόνα η ΔΕΗ δεν χορηγεί προέγκριση εγκατάστασης εφόσον η υφιστάμενη αιολική ισχύς πλησιάζει ή υπερβαίνει ένα ποσοστό (π.χ. 30%) της μέγιστης ηλεκτρικής ζήτησης του δικτύου κατά το προηγούμενο έτος.

Σε αντίθετη περίπτωση η παραγόμενη ενέργεια δεν θα απορροφάται από το δίκτυο ή θα προκαλεί συχνά προβλήματα ομαλής λειτουργίας, με αποτέλεσμα είτε την οικονομική επιβάρυνση της επένδυσης σε περίπτωση κατασκευής επιπλέον ηλεκτρικών γραμμών για τη μεταφορά της παραγόμενης ενέργειας, είτε τη μερική μόνο αξιοποίηση των δυνατοτήτων της αιολικής μονάδος. Και στις δύο περιπτώσεις η βιωσιμότητα της εγκατάστασης καθίσταται προβληματική, πράγμα που έρχεται να υπογραμμίσει τη σημασία του παράγοντα αυτού.

### **5.2.5 Ακραίες μετεωρολογικές συνθήκες**

Κατά την αξιολόγηση θέσεων για εγκατάσταση ανεμοκινητήρων πρέπει επίσης να συνυπολογισθούν και πιθανές ακραίες μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν στις υποψήφιες περιοχές. Ορισμένες από αυτές είναι δυνατόν να προκαλέσουν σημαντικές φθορές στην εγκατάσταση, ενώ οι υπόλοιπες αυξάνουν το κόστος συντήρησης και λειτουργίας της μηχανής περιορίζοντας ίσως και τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης.

i. **Ο παγετός** επιδρά στη λειτουργία μιας ανεμογεννήτριας με αρκετούς τρόπους.

Αρχικά η επικάλυψη πάγου στα μέρη της εγκατάστασης αυξάνει τη στατική και δυναμική τους καταπόνηση, με αποτέλεσμα να πρέπει τα μέρη της εγκατάστασης αλλά και οι γραμμές μεταφοράς ενέργειας να υπολογισθούν σε αυξημένα φορτία.

Επίσης, η επικάλυψη πάγου πάνω στα πτερύγια μιας μηχανής εκτός από το αυξημένο βάρος έχει και σαν πιθανή συνέπεια την εκτόξευση τμημάτων πάγου κατά την περιστροφή των πτερυγίων. Για να αντιμετωπισθούν τα προβλήματα αυτά θα πρέπει να ακινητοποιηθεί η ανεμογεννήτρια και να ακολουθήσει καθαρισμός των πτερυγίων. Σε περιπτώσεις δε συχνών παγετών είναι κατανοητή η μείωση της διαθεσιμότητας της εγκατάστασης.

Ένας επιπρόσθετος κίνδυνος που συνοδεύει την εμφάνιση παγετού, είναι η καταστροφή των ανεμόμετρων ή η βλάβη των συστημάτων ελέγχου της εγκατάστασης. Είναι συνεπώς σκόπιμη η επιλογή περιοχών με μειωμένο κίνδυνο εμφάνισης παγετών. Η ανάγκη αυτή

ενισχύεται και από την επιδείνωση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς της περωτής της μηχανής, λόγω αλλαγής του αεροδυναμικού σχήματος των πτερυγίων από τις επικαθήσεις πάγου σε αυτά.

Τέλος ακόμα και οι συχνές χιονοπτώσεις αυξάνουν σημαντικά το κόστος συντήρησης και λειτουργίας της μονάδος, ιδιαίτερα όταν η περιοχή αποκλείεται συχνά από τα χιόνια.

ii. Η **υγρασία** και οι συχνές **βροχοπτώσεις** επιδρούν επίσης σημαντικά στη συμπεριφορά μιας αιολικής μηχανής. Πράγματι η υψηλή υγρασία επιταχύνει φαινόμενα οξειδωσης και διάβρωσης της μηχανής, ενώ αντίθετα αυξάνει την πυκνότητα του αέρα και συνεπώς και την αποδιδόμενη ισχύ.

Βέβαια με την αύξηση της υγρασίας σε επίπεδα κορεσμού εμφανίζονται σταγόνες νερού πάνω στα πτερύγια, οι οποίες όπως και στην περίπτωση της βροχής αλλοιώνουν την αεροδυναμική συμπεριφορά των πτερυγίων οδηγώντας σε πρόωρη αποκόλληση το οριακό στρώμα και σε πρόωρη απώλεια στήριξης τα πτερύγια της μηχανής. Στην περίπτωση αυτή η σχετική μείωση ισχύος είναι της τάξεως του 10% έως και 20% για ισχυρή βροχόπτωση. Ταυτόχρονα οι συχνές βροχοπτώσεις δυσκολεύουν το έργο συντήρησης της εγκατάστασης, ενώ στην περίπτωση που συνοδεύονται και από κεραυνούς οι τελευταίοι απειλούν σοβαρά την ακεραιότητα και την εύρυθμη λειτουργία μιας ανεμογεννήτριας.

iii. Το **υψόμετρο και η θερμοκρασία** της περιοχής επηρεάζουν σημαντικά την αποδιδόμενη ισχύ μιας ανεμογεννήτριας. Πράγματι η υψηλή θερμοκρασία οδηγεί σε μείωση της πυκνότητας. Φυσικά η μεταβολή στη συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας εξαρτάται και από το χρησιμοποιούμενο τρόπο ελέγχου ισχύος. Συνεπώς για θερμά κλίματα ( $\theta > 15^\circ \text{C}$ ) και μηχανές ελέγχου απώλειας στήριξης παρατηρείται μια σχετική μείωση της αποδιδόμενης ισχύος σε σύγκριση με αυτή του κατασκευαστή της μηχανής για όλο το φάσμα λειτουργία της μηχανής, η οποία για θερμοκρασίες της τάξεως των  $30^\circ \text{C}$  υπερβαίνει το 5%. Αντίστοιχα για μηχανές ελέγχου βήματος η προαναφερθείσα μείωση αποδιδόμενης ισχύος εμφανίζεται στο μεταβατικό στάδιο λειτουργίας της μηχανής, ενώ παρατηρείται μετάθεση κατά 1m/s έως και 2m/s της ταχύτητας επίτευξης ονομαστικής λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Στην περίπτωση αυτή η αποδιδόμενη ισχύς στην περιοχή ονομαστικής λειτουργίας παραμένει αναλλοίωτη. Αντίστοιχα, η επιλογή του υψομέτρου της περιοχής εγκατάστασης επιδρά στην επικρατούσα πίεση στην περιοχή της μηχανής, γεγονός που επιδρά και στην τιμή της πυκνότητας του αέρα.

iv. Η συχνότητα εμφάνισης **υπερβολικά ισχυρών ανεμών** (άνω των 9 Beaufort) σε μια περιοχή πρέπει να συνεκτιμάται κατά την επιλογή της υποψήφιας περιοχής. Αυτό είναι δυνατόν να γίνει με αρκετή ακρίβεια κάνοντας χρήση των διαθέσιμων ανεμολογικών στοιχείων. Με τον τρόπο αυτό επιλέγονται κατασκευές που είναι ικανές να λειτουργούν και σε μεγάλες ταχύτητες του ανέμου, ενώ διαθέτουν και την απαραίτητη στιβαρότητα να επιβιώσουν σε ιδιαίτερα δυσμενείς ανεμολογικές καταστάσεις.

Οι μηχανές για αντίστοιχες περιοχές έχουν αυξημένο κόστος κατασκευής, μεγαλύτερη ταχύτητα διακοπής λειτουργίας, ενώ η ταχύτητα επιβίωσης της εγκατάστασης πλησιάζει τα 80m/sec. Όλες οι παραπάνω ειδικές κατασκευαστικές απαιτήσεις μιας ανεμογεννήτριας πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την οικονομική αξιολόγηση της περιοχής εγκατάστασης.

v. Η **έντονη τύρβη** μιας υποψήφιας περιοχής έχει σαν συνέπεια τη διαρκή μεταβολή του μέτρου και της διεύθυνσης του ανέμου. Οι διαρκείς αυτές μεταβολές προκαλούν κόπωση των συστατικών της κατασκευής, με αποτέλεσμα τη μείωση της διάρκειας ζωής της ανεμογεννήτριας, αλλά και την αύξηση του κόστους συντήρησης της εγκατάστασης. Φυσικά η αξιόπιστη πρόβλεψη για τη μορφή ενός τυρβώδους πεδίου ροής εξαρτάται από τα ακριβή στοιχεία της περιοχής (ανάγλυφο, διεύθυνση και ένταση ανέμων, τυχόν καλλιέργειες κ.λπ.) με αποτέλεσμα την αδυναμία προβλέψεως του επιπέδου τύρβης και της επίδρασης του στην ομαλή και μακρόχρονη λειτουργία μιας εγκατάστασης. Εν γένει είναι προτιμότερη η επιλογή θέσεων με το ελάχιστο δυνατό επίπεδο τύρβης, καθώς η αύξηση της τύρβης του ανέμου προκαλεί και σχετική μείωση της αποδιδόμενης ισχύος στο μεταβατικό τμήμα λειτουργίας της μηχανής και ταυτόχρονα μετατόπιση σε μεγαλύτερες ταχύτητες του ονομαστικού σημείου λειτουργίας της μηχανής (π.χ. αύξηση κατά 3 m/s για 10% αύξηση της τύρβης).

vi. **Τα μεταφερόμενα υλικά από τον άνεμο** προκαλούν συχνά σημαντικές αλλοιώσεις στα μέρη μιας μηχανής. Έτσι μηχανές οι οποίες πρόκειται να εγκατασταθούν σε παραθαλάσσιες περιοχές κινδυνεύουν από διάβρωση, δεδομένου των σημαντικών ποσοτήτων αλάτων που περιέχει ο αέρας στις περιοχές αυτές. Για το λόγο αυτό ορισμένα τουλάχιστον τμήματα της κατασκευής πρέπει να διαθέτουν αυξημένη αντισκωριακή προστασία.

Επίσης οι ανεμογεννήτριες κινδυνεύουν από τη μεταφερόμενη σκόνη, την άμμο και το ψιλό χαλίκι, τα οποία προξενούν βλάβες στα πτερύγια, στα προστατευτικά καλύμματα, τα λιπαντικά κ.λπ. Για την προστασία της μηχανής απαιτούνται ειδικές διαδικασίες συντήρησης, με την ανάλογη οικονομική επιβάρυνση της παραγόμενης ενέργειας.

Από αντίστοιχες πειραματικές αναλύσεις προκύπτει ότι η αύξηση της τραχύτητας των πτερυγίων, προκαλούμενη είτε από κακή ποιότητα κατεργασίας είτε κυρίως από σκόνη, άλατα και έντομα που προσκολλώνται στο χείλος προσβολής των πτερυγίων, οδηγεί κατά κανόνα σε μειωμένη απόδοση της ανεμογεννήτριας, η οποία εντοπίζεται σε σχετικά μεγάλες ταχύτητες ανέμου ( $\approx 10\text{m/s}$ ) και οδηγεί σε μείωση της ονομαστικής ισχύος της εγκατάστασης. Το γεγονός αυτό μπορεί να εξηγηθεί, καθώς οι αεροδυναμικές απώλειες των πτερυγίων (για μεγάλες τιμές του Reynolds) εξαρτώνται κυρίως από την τραχύτητα της επιφάνειας των πτερυγίων. Αντιθέτως σε μικρούς αριθμούς Reynolds είναι δυνατόν η αυξημένη τραχύτητα να σταθεροποιεί το στρωτό οριακό στρώμα μετατρέποντας το σε τυρβώδες, με αποτέλεσμα την αρχική βελτίωση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς της μηχανής.

- vi. **Η σταθερότητα των πνεόντων ανέμων** σε μια περιοχή συνεισφέρει σημαντικά στη μείωση της καταπόνησης ενός ανεμοκινητήρα, με αποτέλεσμα την επιμήκυνση του χρόνου ζωής της εγκατάστασης. Συνεπώς η ταχεία μεταβολή τόσο της έντασης όσο και της διεύθυνσης του ανέμου προκαλούν αυξημένα και μεταβαλλόμενα καμπικά φορτία στα πτερύγια της μηχανής. Αν και δεν έχει γίνει ακόμα δυνατό να αποδειχθεί με βεβαιότητα, είναι προφανές ότι η λειτουργία μιας μηχανής σε μια θέση με συχνές αλλαγές στα χαρακτηριστικά του ανέμου είναι μειονεκτικότερη μιας άλλης, η οποία είναι τοποθετημένη σε περιοχή με σταθερότερους ανέμους.

### 5.2.6 Αποδοχή από το κοινό

Ένας βασικός παράγοντας επιτυχούς επιλογής μιας τοποθεσίας εγκατάστασης είναι και η αποδοχή της από την κοινή γνώμη της περιοχής. Το κοινό πρέπει να ενημερωθεί για τα έργα υποδομής τα οποία αφενός θα διευκολύνουν τη ζωή των κατοίκων αφετέρου δεν θα αλλοιώσουν το τοπίο. Παράλληλα θα πρέπει να υπογραμμισθεί η δημιουργία κάποιων νέων θέσεων εργασίας, ενώ η παραγόμενη ενέργεια θα συνεισφέρει στην ανάπτυξη της περιοχής.

Δεδομένων των περιβαλλοντικών προβλημάτων, η κοινή γνώμη έχει θετική άποψη για τις αιολικές εγκαταστάσεις, αφού αυτές δε ρυπαίνουν το περιβάλλον, εξοικονομούν συμβατικά καύσιμα και έχουν ως πρώτη ύλη μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Εφόσον ληφθεί μέριμνα στο να περιορισθεί στο ελάχιστο δυνατόν η στάθμη του παραγόμενου θορύβου κατά τη λειτουργία της εγκατάστασης, δεν αναμένονται ιδιαίτερα προβλήματα από τους κατοίκους των υποψήφιων περιοχών. Ειδική αναφορά πρέπει να γίνει βέβαια και σε περιπτώσεις αλληλοσυγκρουόμενων συμφερόντων των κατοίκων μιας περιοχής (π.χ. από που θα περάσει

κάποιος δρόμος), η πιθανή άρνηση διάθεσης γης για διάφορους λόγους καθώς και τα φαινόμενα κερδοσκοπίας, που συχνά παρατηρούνται σε κάθε νέα παραγωγική μονάδα που δημιουργείται.

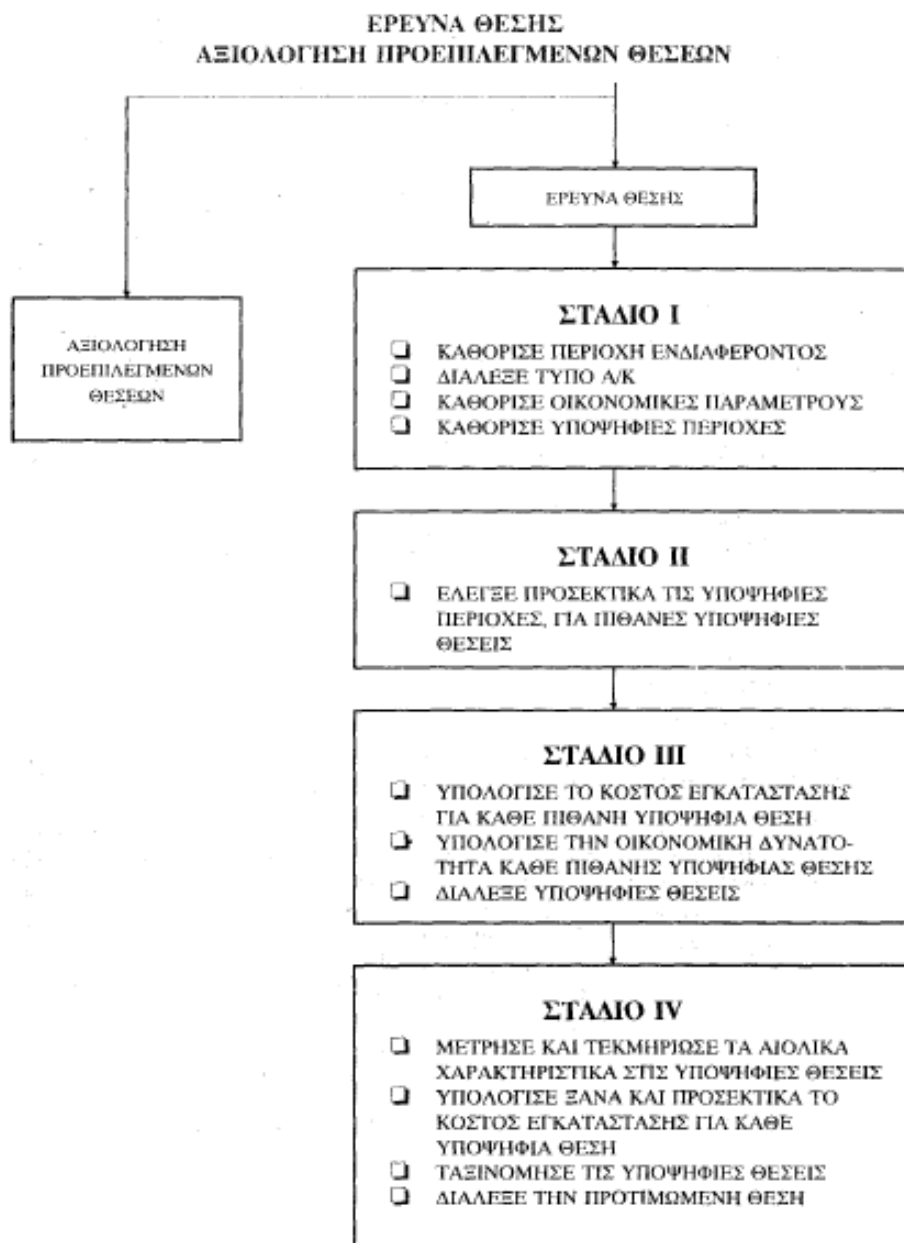
Όμως αν και οι έρευνες έχουν δείξει ότι η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας έχει μεγάλη υποστήριξη, ωστόσο η αιολική ενέργεια παρουσιάζει ένα σχετικό μεγάλο ποσοστό της παραμέτρου "NIMBY" (not in my backyard). Τον παράγοντα αυτό καθορίζουν εκείνοι οι πολίτες, οι οποίοι αποδέχονται κάποια τεχνολογική εφαρμογή στη χώρα τους, ωστόσο δεν αποδέχονται τις αντίστοιχες εγκαταστάσεις που βρίσκονται κοντά στην κατοικία τους (π.χ. σε απόσταση 51km από το σπίτι τους).

Επειδή λοιπόν η υποστήριξη ή όχι της κοινής γνώμης μπορεί να αποτελέσει αστάθμητο παράγοντα, που πιθανόν να εμποδίσει τη δημιουργία ενός αιολικού πάρκου, πρέπει οι υπεύθυνοι της εγκατάστασης να εξασφαλίσουν ότι οι ανεμογεννήτριες θα αποτελέσουν "καλούς γείτονες". Ένας τρόπος αύξησης της αποδοχής είναι η τήρηση των οδηγιών αισθητικής καθώς και η μείωση των επιπέδων του εκπεμπόμενου θορύβου. Άλλοι, λιγότερο σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να αντιμετωπισθούν είναι η δυσπιστία στη χρήση των ανεμογεννητριών και στη σωστή εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού, καθώς και ο φόβος μήπως οι μηχανές βλάψουν τους κατοίκους.

Ολοκληρώνοντας το κεφάλαιο αυτό πρέπει να επισημάνουμε ότι όλες οι συνιστώσες που προαναφέρθηκαν επιδρούν στην οικονομική βιωσιμότητα μιας αιολικής εγκατάστασης, γι' αυτό και πρέπει να συνεκτιμώνται κατά τη λήψη των τελικών αποφάσεων. Ακόμα όμως και στην περίπτωση μιας ολοκληρωμένης μελέτης, είναι πιθανόν να μην έχει επιλεγεί η βέλτιστη θέση εγκατάστασης, κυρίως λόγω της διαρκούς μεταβολής των μετεωρολογικών φαινομένων αλλά και της παρεμβολής τριτογενών (εξωγενών) παραγόντων. Σκοπός βέβαια μιας αντίστοιχης εργασίας είναι η ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων επιλογής.

Τέλος παρουσιάζεται ένα γενικό διάγραμμα για τη διαδικασία αξιολόγησης και τελικής επιλογής της θέσης εγκατάστασης ανεμοκινητήρων





Σχήμα 5.2: Διαδικασία επιλογής θέσης εγκατάστασης Α/Κ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΔΙΟΛΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ & ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

## 6.1 Εκτίμηση του αιολικού δυναμικού της Ελλάδας

### Μεθοδολογία

Το αιολικό δυναμικό της χώρας εκτιμήθηκε για πρώτη φορά από το Εργαστήριο Αεροδυναμικής τον Ε.Μ.Π. Στην έρευνα αυτή, το πρώτο βήμα αποτέλεσε η χάραξη καμπυλών ισοταχυτήτων ανέμου σε ολόκληρο τον ελλαδικό χώρο και σε κλίμακα χάρτου 1:100.000. Κατόπιν θεωρήθηκε μέση απόσταση θέσεων εγκατάστασης ανεμογεννητριών μεγάλου μεγέθους τα 5 km, οπότε οι κορυφές των ισοπλεύρων τριγώνων αποτελούσαν πιθανές θέσεις εγκατάστασης ανεμογεννητριών. Στη συνέχεια πάνω στο χάρτη χαράχθηκαν οι γραμμές μέσης τάσης του εθνικού ηλεκτρικού δικτύου και σημειώθηκαν οι θέσεις εκείνες εγκατάστασης ανεμογεννητριών που γειτνιάζουν με το δίκτυο. Οι θέσεις αυτές εγκατάστασης Α/Γ είναι οι οικονομικότερες από άποψη κόστους για διασύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου παρουσιάζονται στη συνέχεια.

### Χάραξη καμπυλών ισοταχυτήτων ανέμου

Για τη χάραξη των καμπυλών μέσης ετήσιας ταχύτητας ανέμου στον ελλαδικό χώρο, χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις της Μετεωρολογικής Υπηρεσίας και οι μετρήσεις της ΔΕΗ, πίνακας 6.1α και 6.1β.

Ορισμένα αποτελέσματα της Μετεωρολογικής Υπηρεσίας βασίζονται σε παρατηρήσεις 20-40 ετών και προέρχονται από 100 μετεωρολογικούς σταθμούς. Σε 40 απ' αυτούς, οι μετρήσεις γίνονται με ανεμογράφο είτε με ανεμόμετρο χειρός 8 φορές την ημέρα. Τα αποτελέσματα της εργασίας βασίστηκαν στη στατιστική επεξεργασία μετρήσεων 20 μετεωρολογικών σταθμών της Μετεωρολογικής Υπηρεσίας που βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη από 150 km και καλύπτουν έτσι ικανοποιητικά την περιοχή τον Αιγαίουπελάγους και επαρκούν για τη χάραξη των ισοταχυτήτων ανέμου στην περιοχή αυτή.

Στο εσωτερικό της χώρας όμως δεν υπάρχει επαρκές δίκτυο μετεωρολογικών σταθμών για την ακριβή χάραξη των ισοταχυτήτων ανέμου. Έτσι τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται, βασίστηκαν σε ανεπαρκή αριθμό μετεωρολογικών σταθμών.

Πρέπει να τονισθεί ότι σχεδόν όλες οι θέσεις των μετεωρολογικών σταθμών, είναι ακατάλληλες για την εκτίμηση του αιολικού δυναμικού επειδή διαφορετικοί είναι οισκοποί

που οι σταθμοί αυτοί εξυπηρετούν (π.χ. συνήθως θέσεις αεροδρομίων που είναι κατά κανόνα υπήνεμες θέσεις). Γι' αυτό για τη σωστή εκτίμηση των αιολικού δυναμικού απαιτείται η ακριβής γνώση της μορφολογίας του εδάφους, της παραμέτρου τραχύτητας και κατά συνέπεια του εκθέτη  $\alpha$  αναγωγής ταχυτήτων με το ύψος από το έδαφος.

Για ανεμογεννήτριες διαμέτρου δρομέα 50 m, το τυπικό ύψος από το έδαφος εγκατάστασής τους είναι 50 m. Στο ύψος αυτό η ταχύτητα είναι κατά 31% μεγαλύτερη της ταχύτητας στο ύψος μετρήσεως 10m. Ο εκθέτης  $\alpha$  λήφθηκε ίσος με 0.17 τυπική τιμή για την τοπογραφία του ελλαδικού χώρου.

Θέση	Μέση ταχύτητα (τυπική απόκλιση)			Ετησίως δεσμευομένη αιολική ενέργεια kwh/m <sup>2</sup>
	(3) (ΔΕΗ)	(4) (ΕΜΥ)	(5)	
Αθήνα		4.0 (± 0.2)		141
Αθήνα (Αστεροσκοπείο)		2.3 (± 0.1)		27
Αλεξανδρούπολη		3.5 (± 0.5)		94
Άνδρος		–	6.7	662
Βόλος		3.9 (± 0.4)		130
Ζάκυνθος		–	6.6	632
Ηράκλειο		4.6 (± 0.8)		14
Θεσσαλονίκη		2.90 (± 0.6)		54
Θήρα		6.6 (± 0.8)		632
Καβάλα		1.6 (± 0.2)		9
Κύθηρα	6.2	5.4 (± 0.4)		429
Κύθνος		–	6.8	691
Κύμη		2.5 (± 0.1)		34
Κως	6.2	6.2 (± 0.5)		524
Λαύριο		–	6.4	576
Λήμνος	6.0	5.2 (± 0.4)		386
Μήλος		6.3 (± 0.4)		550
Μυτιλήνη	5.2	5.0 (± 0.6)		291
Νάξος	7.0	7.2 (± 0.6)		787
Ναύπλιο		3.9 (± 0.7)		130
Ρόδος		5.3 (± 0.6)	5.7	366
Σάμος	6.0	6.3 (± 0.5)		511
Σκίρος	7.0	6.5 (± 0.8)		677
Σητεία		3.3 (± 0.5)		79
Χανιά		2.4 (± 0.8)		30
Χίος		4.0 (± 0.3)	6.2	524

Πίνακας 6.1α: Μέσες Ταχύτητες Ανέμου

α/α	Περιοχή	V (m/s) Περίοδος μετρήσεων
1	Άνδρος (Καλυβάρι)	9.7 (1981 - 90)
2	Τήνος (Αγ. Μαρίνα)	9.5 (1987 - 90)
3	Μύκονος (Φάρος)	10.8 ( 1983 - 90)
4	Κρήτη ( Άνω Μούλια)	8.1 (1981 - 83)
5	Λήμνος (Βούναρος)	8.1 (1986 - 90)
6	Λέσβος (Ματσινέλι)	8.7 ( 1987 - 90)
7	Χίος (Ποταμιά)	8.1 (1986 - 89)
8	Σάμος (Μαραθόκαμπος)	10.4 (1986 - 90)
9	Εύβοια (Αγ. Σπυρίδων)	9.2 ( 1989 - 90)
10	Κάρπαθος (Σπόα)	9.6 ( 1983 - 89)
11	Σκύρος (Ασπούς)	6.5(1987 - 89)
12	Σαμοθράκη (Αγ. Ανδρέας)	6.6 (1986 - 89)

**Πίνακας 6.1β: Μέση ετήσια Ταχύτητα Ανέμων (10m από το έδαφος)**

Για την περιοχή του νησιωτικού χώρου όπου υπάρχει υψηλό αιολικό δυναμικό, η παράμετρος κ είναι περίπου σταθερή και ίση με κ=2. Παραμετρική μελέτη αναφορικά με την επίδραση του κ στο ετήσιο δεσμευμένο αιολικό δυναμικό από ανεμοκινητήρα δείχνει ότι η παράμετρος αυτή έχει μικρή επίδραση και ότι τα ετήσια δεσμευόμενα αιολικά kWh στο ύψος των 10m δίνονται από τη σχέση:

$$E = 10.5 \cdot v^3 \text{ KWh /ετησίως /m}^2$$

Όπου V η μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου σε m/sec.

Με τη βοήθεια της παραπάνω σχέσης και με τις ισοταχείς καμπύλες, μπορεί να εκτιμηθεί το αιολικό δυναμικό που μπορεί να δεσμευτεί από Ανεμογεννήτριες σε μια περιοχή.

## 6.2 Προτάσεις αξιοποίησης της Αιολικής Ενέργειας στην Ελλάδα

Η επίλυση του προβλήματος παραγωγής άφθονης και φθηνής ηλεκτρικής ενέργειας είναι ζωτικής σημασίας για την οικονομική επιβίωση και ανάπτυξη των νησιών του Αρχιπελάγους αλλά και της χώρας μας συνολικά. Δεδομένης δε και της ιδιαίτερης εθνικής σημασίας της περιοχής του Αιγαίου, η ενίσχυση των τοπικών κοινωνιών ξεφεύγει από τα στενά χρηματοοικονομικά κριτήρια που πιθανόν να διέπουν αντίστοιχες ενεργειακές επενδύσεις σε

χώρες της Β. Ευρώπης. Στα πλαίσια αυτά η διευκόλυνση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ θα πρέπει να αποτελέσει πρώτη προτεραιότητα της Πολιτείας, η οποία θα πρέπει να προβεί σε ένα ολοκληρωμένο ενεργειακό σχεδιασμό των τοπικών νησιωτικών δικτύων, περιλαμβάνοντας σε αυτόν εκτός της αξιοποίησης της αιολικής και ηλιακής ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή και τη χρησιμοποίηση της βιομάζας, της γεωθεμίας χαμηλής ενθαλπίας και της ηλιακής ενέργειας για κάλυψη των αντιστοιχών θερμικών φορτίων.

Παράλληλα η ΔΕΗ θα πρέπει να στραφεί αποτελεσματικά στην κατακόρυφη αύξηση της τεχνικής διαθεσιμότητας των αιολικών της μηχανών, ώστε να πλησιάσει τα διεθνή πρότυπα, αποσύροντας ταυτόχρονα και τυχόν παλαιές και προβληματικές μηχανές από τα νησιωτικά δίκτυα, ώστε να ελευθερωθούν επιπλέον θέσεις για ίδρυση νέων αιολικών πάρκων με σύγχρονες και περισσότερο αποδοτικές μηχανές. Επιπλέον η Πολιτεία θα πρέπει να διερευνήσει τις δυνατότητες της ΔΕΗ για επέκταση των αιολικών της σταθμών (πρακτικά αδύνατη χωρίς σοβαρή ενίσχυση του τεχνικού και επιστημονικού προσωπικού της επιχείρησης), δεδομένης της απογοητευτικής μέχρι σήμερα πορείας των εγκατεστημένων αιολικών μηχανών, αν και η ΔΕΗ διέθετε μέχρι πρότινος το μονοπώλιο στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ταυτόχρονα η Πολιτεία θα πρέπει να διερευνήσει τυχόν ευθύνες για τη σημαντική απώλεια επενδεδυμένων κεφαλαίων, αλλά και για τη μειωμένη εισροή ενέργειας από την κακή κατάσταση των αιολικών μονάδων. Τέλος στα πλαίσια ενός γενικότερου ενεργειακού σχεδιασμού των νησιωτικών αναγκών θα πρέπει να επανεξετασθεί και να επανακαθορισθεί το ανώτατο όριο διείσδυσης της αιολικής ισχύος στα τοπικά αυτόνομα δίκτυα. Είναι πλέον καιρός να αρχίσει η Πολιτεία και η ΔΕΗ να εξετάζουν σοβαρά την περίπτωση δημιουργίας Αναστρέψιμων Υδροηλεκτρικών Σταθμών που θα τροφοδοτούνται με ΑΠΕ, ώστε να επιτευχθεί σταδιακά η ενεργειακή ανεξαρτησία των νησιωτικών οικονομιών.

Για την ενίσχυση τέλος του εθνικού αιολικού προγράμματος και τη δραστηριοποίηση των ιδιωτών επενδυτών, είναι αρχικά απαραίτητο να εκκαθαρισθεί ο κατάλογος των υποψηφίων για ίδρυση ανεξάρτητων αιολικών πάρκων του ΥΠ. ΑΝ. από τυχόν αδρανείς και μη ενδιαφερομένους ουσιαστικά επενδυτές, ενεργοποιώντας το νομικό περιορισμό της διετούς ισχύος των παρεχομένων αδειών. Παράλληλα θα πρέπει να επιταχυνθεί η διαδικασία απορρόφησης των παρεχομένων επιδοτήσεων για τη δημιουργία σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ, επιβάλλοντας ορισμένα περιοριστικά μέτρα στο χρονικό διάστημα απορρόφησης των παρεχομένων πιστώσεων. Για την περαιτέρω ενίσχυση της προσπάθειας αυτής θα πρέπει να διευκολυνθεί ουσιαστικά

ηδιαδικασία έκδοσης των αδειών ίδρυσης και λειτουργίας ηλεκτροπαραγωγών σταθμών από ΑΠΕ, ελέγχοντας και τις τυχόν ομάδες πίεσης που δημιουργούνται στις αρμόδιες υπηρεσίες των εμπλεκόμενων φορέων του Δημοσίου. Τέλος, εφόσον η Ελληνική Πολιτεία είναι αποφασισμένη για την ενίσχυση της αποκεντρωμένης ανάπτυξης και της ενεργής συμμετοχής της στα ευρωπαϊκά σχέδια για μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα και τον περιορισμό της έντασης του φαινομένου του θερμοκηπίου, η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας ιδιαίτερα στα μικρά νησιωτικά δίκτυα θα πρέπει να αναπροσαρμοσθεί σε ρεαλιστικά επίπεδα. Η νέα προσφερόμενη τιμή πρέπει να λαμβάνει υπ' όψιν της το πραγματικό κόστος λειτουργίας των μικρών τοπικών ΑΣΠ και όχι το μέσο οριακό κόστος της επιχείρησης, ενώ ταυτόχρονα θα πρέπει επιτέλους να ποσοτικοποιηθεί και να συνυπολογισθεί στην τελική τιμή της ενέργειας και το εξωτερικό ή το κοινωνικό κόστος χρήσης ενέργειας, που επιβαρύνει το σύνολο των κατοίκων της χώρας μας.

Στην αντίθετη περίπτωση ο δείκτης ενεργειακής αυτάρκειας της χώρας μας θα παραμείνει στα χαμηλά επίπεδα του 25%, η οικονομία των νησιών μας θα συνεχίζει να συρρικνώνεται, ο πληθυσμός του Αρχιπελάγους θα μειώνεται διαρκώς ανοίγοντας το δρόμο σε κακόβουλες διεκδικήσεις, η ΔΕΗ θα συνεχίζει να σπαταλά το λιγοστό εγχώριο λιγνίτη επιβαρύνοντας ταυτόχρονα το περιβάλλον και η οικονομία μας θα εξαρτάται πλήρως από τις διακυμάνσεις του πετρελαίου και του φυσικού αερίου στη διεθνή αγορά, ενώ η ροή ενέργειας προς τη χώρα μας θα ελέγχεται από πλήθος τρίτων χωρών εκτός της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Είναι συνεπώς χρονικά επιτακτικό η Ελληνική Κοινωνία να επιλέξει σήμερα τον τρόπο που θα καλύψει τις ενεργειακές της ανάγκες για το άμεσο μέλλον και είναι απολύτως απαραίτητο να υποστηρίξει στη συνέχεια με συνέπεια και επιμονή την επιλογή της αυτή.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7**

### **ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ**

#### **7.1 Εισαγωγή**

Η οικονομική βιωσιμότητα μιας αιολικής ενεργειακής μονάδας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες οι κυριότεροι των οποίων είναι:

- το κόστος αγοράς του Α/Κ
- το κόστος γης – υποδομής

- το αιολικό δυναμικό της περιοχής
- συντελεστής χωρητικότητας της μηχανής
- το κόστος της kwh που παράγεται από συμβατικούς ενεργειακούς σταθμούς
- η διάρκεια ζωής του Α/Κ
- το κόστος χρήματος

και άλλοι μικρότερης σημασίας παράγοντες. Όλοι οι παραπάνω οικονομικοί παράγοντες εμπλέκονται κατά τη διαδικασία ελέγχου της οικονομικής βιωσιμότητας της επένδυσης σε αιολικό ενεργειακό σταθμό, γεγονός που επιβάλλει την αναγκαία σοβαρότητα στην οικονομική μελέτη.

Πολλοί από τους παραπάνω οικονομικούς παράγοντες έχουν μεγαλύτερο ή μικρότερο περιθώριο αβεβαιότητας και ως εκ τούτου η σταθμιστική τους επίδραση στη οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη.

Στη συνέχεια εξετάζονται, κατ' ανάγκη σύντομα μέσα στα πλαίσια ενός γενικού βιβλίου, ξεχωριστά κάθε οικονομικός παράγοντας από τους παραπάνω και παρουσιάζεται μια απλή σχετικά μεθοδολογία ελέγχου της οικονομικής βιωσιμότητας της επένδυσης. Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι γίνεται εκτεταμένη χρήση στατιστικών στοιχείων με βάση τους ανεμοκινητήρες που βρίσκονται σε λειτουργία τόσο στην Ευρώπη όσο και στην Αμερική.

## 7.2 Κόστος ανεμοκινητήρα

Το κόστος πώλησης ενός ανεμοκινητήρα εξαρτάται κυρίως από την τυποποίησης κατασκευής της μηχανής και το πλήθος των μηχανών που κατασκευάζονται και πωλούνται. Δεν είναι ασυνήθης η περίπτωση μείωσης του κατασκευαστικού κόστους του ανεμοκινητήρα στο 1/4 του κόστους κατασκευής της πρωτοτύπου μονάδας μετά από παραγωγή-τυποποίηση της πρώτης εκατοντάδας ανεμοκινητήρων. Ειδικότερα η στατιστική επεξεργασία του κόστους ανεμοκινητήρων στην αγορά της Καλιφόρνιας όπου διαπιστώνεται ότι το κόστος Α/Κ ανά KW ισχύος ενώ το 1981 ήταν 3100 δολάρια, το 1987 είχε πέσει στα 1.100\$ με τάση περαιτέρω μείωσης. Η μείωση αυτή του κόστους των ανεμοκινητήρων προήλθε από την τυποποίηση της κατασκευής και την αύξηση των πωλήσεων Α/Κ. , φαίνεται ότι ο αριθμός των εγκαταστημένων ανεμοκινητήρων που το 1981 ήταν μόλις 1500 μονάδες ενώ το 1988 οι συνολικές εγκαταστημένες μονάδες ανεμοκινητήρων μόνο στην Καλιφόρνια είχαν φθάσει τις 15.605 με συνολική εγκαταστημένη ισχύ 1370 MW . Η τάση μείωσης της τιμής κόστους του ανεμοκινητήρα οδηγεί σε μια εκτίμηση των \$1000/KW, ενώ σήμερα



συντηρητικού υπολογισμοί κόστους θα επέτρεπαν την παραδοχή ενός κόστους 1400\$KWονομαστικής ισχύος ανεμοκινητήρα.

### 7.3 Κόστος γης και υποδομής

Οι τιμές κόστους ανεμοκινητήρα που αναφέρθηκαν προηγούμενα είναι τιμή ανεμοκινητήρα παραδομένου στο εργοστάσιο κατασκευής του.

Το κόστος του εγκαταστημένου ανεμοκινητήρα επιβαρύνεται με το κόστος μεταφοράς του, συναρμολόγησης του, αγοράς ή ενοικίασης της γης. Επίσης πολλές φορές σημαντικό μέρος του κόστους αποτελεί η δημιουργία της κατάλληλης υποδομής απαραίτητης για τη μεταφορά, εγκατάσταση και λειτουργία του ανεμοκινητήρα, όπως η διάνοιξη δρόμων ικανών να επιτρέπουν την κίνηση μεγάλων γερανών για τη μεταφορά του πύργου, των πτερυγίων ή του κουβουκλίου του ανεμοκινητήρα. Επίσης έργα πολιτικού μηχανικού απαιτούνται για τη θεμελίωση του ανεμοκινητήρα, τη διαμόρφωση του χώρου για τη θεμελίωση του καθώς επίσης και για την εγκατάσταση του οικίσκου, όπου πρόκειται να τοποθετηθούν για μεγάλες μηχανές, τα όργανα παρακολούθησης του αιολικού σταθμού. Σημαντικό μερίδιο στη διαμόρφωση του τελικού κόστους έχει ο ηλεκτρικός υποσταθμός καθώς και οι γραμμές μεταφοράς. Τέλος δεν θα πρέπει να διαφεύγει της προσοχής και η συμβολή στο κόστος, της σε ορισμένες θέσεις βέβαια, απαραίτητης αντικεραυνικής προστασίας του ανεμοκινητήρα.

Όλα τα παραπάνω έξοδα επιβαρύνουν το αρχικό κόστος του ανεμοκινητήρα.

Όλοι οι ανεμοκινητήρες σήμερα σχεδιάζονται για διάρκεια ζωής τουλάχιστον 20 ετών και ίσως και 30. Με την τεχνολογική βελτίωση των υλικών, τη μεγαλύτερη αντοχή των σε κόπωση, τη βελτίωση των μηχανουργικών επεξεργασιών, την αύξηση των γνώσεων σχετικά με την αλληλεπίδραση ανέμου και αιολικής μηχανής σε συνδυασμό με τη χρήση κωδίκων ηλεκτρονικού υπολογισμού που επιτρέπουν την ακριβή γνώση των φορτίων σε μεταβαλλόμενες ανεμολογικές συνθήκες, είναι περισσότερο από σίγουρο ότι οι αιολικές μηχανές θα επιτύχουν διάρκεια ζωής μεγαλύτερη από 20 έτη.

Δεδομένου ότι η διάρκεια ζωής του ανεμοκινητήρα έχει άμεση επίδραση στην οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης η παραδοχή ως διάρκεια ζωής του ανεμοκινητήρα 20 έτη αποτελεί συντηρητική εκτίμηση.

### 7.4 Διάρκεια ζωής του ανεμοκινητήρα

Όλοι οι ανεμοκινητήρες σήμερα σχεδιάζονται για διάρκεια ζωής τουλάχιστον 20 ετών και ίσως και 30. Με την τεχνολογική βελτίωση των υλικών, τη μεγαλύτερη αντοχή των σε

κόπωση, τη βελτίωση των μηχανουργικών επεξεργασιών, τη ναύξηση των γνώσεων σχετικά με την αλληλεπίδραση ανέμου και αιολικής μηχανής σε συνδυασμό με τη χρήση κωδικών ηλεκτρονικού υπολογιστή που επιτρέπουν την ακριβή γνώση των φορτίων σε μεταβαλλόμενες ανεμολογικές συνθήκες, είναι σίγουρο ότι οι αιολικές μηχανές θα επιτύχουν διάρκεια ζωής μεγαλύτερη από 20 έτη.

Δεδομένου ότι η διάρκεια ζωής του ανεμοκινητήρα έχει άμεση επίδραση στην οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης η παραδοχή ως διάρκεια ζωής του ανεμοκινητήρα 20 έτη αποτελεί συντηρητική εκτίμηση

### **7.5 Κόστος συντήρησης και λειτουργίας A/K**

Ο ανεμοκινητήρας έχει πολύ λίγα ετήσια λειτουργικά έξοδα καθώς και έξοδα συντήρησης. Έτσι το κόστος αυτό είναι χαμηλό και μπορεί «τυπικά να μηδενισθεί» με την τεχνολογική βελτίωση των μηχανών και την οργάνωση των συνεργείων συντήρησης.

Από στατιστικά λειτουργικά στοιχεία κόστους ανεμοκινητήρων κυρίως της Καλιφόρνια προκύπτει ότι το μέσο λειτουργίας και συντήρησης των ανεμοκινητήρων είναι περίπου 0.02 \$/Kwh, ενώ λόγω βελτίωσης της τεχνολογίας των μηχανών και των συνεργείων συντήρησης η διαθεσιμότητα των ανεμοκινητήρων ( $\Delta M$ ) έχει, τουλάχιστον στην Καλιφόρνια, ξεπεράσει το 95% ( $\Delta M = 0.95$ ).

Στατιστικά στοιχεία ανάγουν το κόστος λειτουργίας και συντήρησης του A/K (σε ετήσια βάση) σε 2% του κόστους αρχικής επένδυσης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Γ. Μπεργελές: «Ανεμοκινητήρες» εκδόσεις Συμεών, 2005
2. Α.Σ. Αλεξιάκης: «Αιολική ενέργεια» εκδόσεις Σιδέρης, 2002
3. Θ. Ζαχαρίας: «Ήπιες μορφές ενέργειας Ι και ΙΙ», εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών
4. Εγκυκλοπαίδεια «Το περισκόπιο της επιστήμης», 2002
5. Σταύρος Παπαθανασίου, Λέκτορας Ε.Μ.Π. «Διαμόρφωση του ηλεκτρικού συστήματος των ανεμογεννητριών»
6. Thomas P. Fuglseth: «Modeling a 2,5 MW direct driven wind turbine with permanent magnet generator»
7. General Electric Wind Turbine special specifications
8. Thomas Krogh: «HAWC load simulation of generic 5MW offshore wind turbine model», 2004

### ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ INTERNET

1. [WWW.AVECO.GR](http://WWW.AVECO.GR)
2. [WWW.WIND-ENERGY-THE-FACTS.ORG](http://WWW.WIND-ENERGY-THE-FACTS.ORG)
3. [WWW.MORPHIC.SE](http://WWW.MORPHIC.SE)
4. [WWW.BUILDINGS.GR/ENERCON](http://WWW.BUILDINGS.GR/ENERCON)
5. [WWW.NORDEX-ONLINE.COM](http://WWW.NORDEX-ONLINE.COM)
6. [WWW.VESTAS.COM](http://WWW.VESTAS.COM)
7. [WWW.WIND-WORKS.COM](http://WWW.WIND-WORKS.COM)
8. [WWW.NI.COM](http://WWW.NI.COM)
9. [WWW.WINDMEUP.COM](http://WWW.WINDMEUP.COM)