



#1/y  
49  
AY

Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών

Τμήμα Αυτοματισμού

Πτυχιακή εργασία

Θέμα :

**"ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΚΑΙ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ"**



**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΜΙΧΑΛΗΣ ΠΑΠΟΥΤΣΙΔΑΚΗΣ**

**ΦΟΙΤΗΤΕΣ: ΣΤΕΡΓΙΟΥ ΜΑΡΚΟΣ Α.Μ: 36286**

**ΨΥΛΛΑΣ ΑΝΔΡΕΑΣ Α.Μ: 34498**





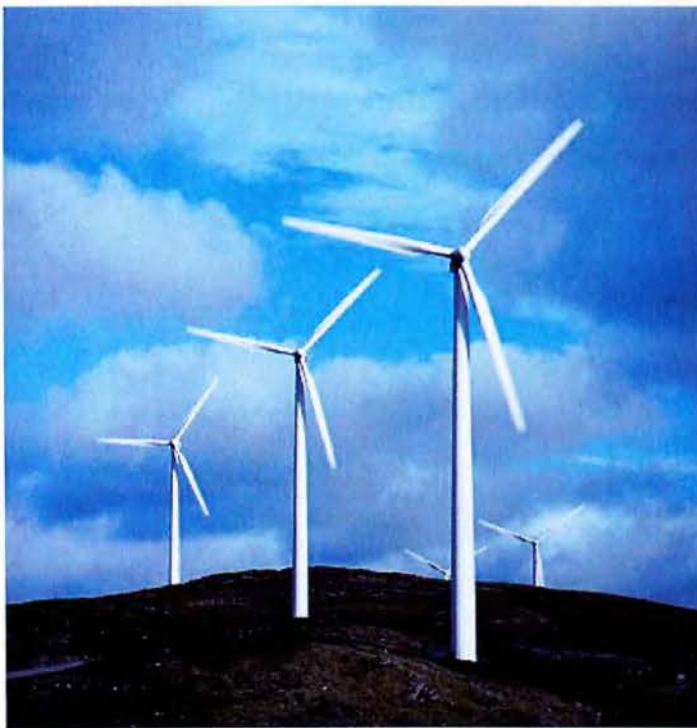
Faculty of Application Technology

Department of Automation (Eng.)

Final Year Project

Subject :

**"STUDY OF ELECTROMECHANICAL CIRCUITS AND WIND  
TURBINE CONTROL SYSTEMS"**



***SUPERVISOR : MICHALIS PAPOUTSIDAKIS***

***STUDENTS : STERGIU MARKOS R.N. : 36286***

***PSYLLAS ANDREAS R.N. : 34498***

AIGALEO , MAY 2012



Ευχαριστούμε τον επιβλέποντα καθηγητή μας, κ. Μιχάλη Παπουτσιδάκη  
για την πολύτιμη βοήθειά του στην εκπόνηση της πτυχιακής εργασίας.

## Πίνακας Περιεχομένων

### Κεφάλαιο 1

1.1 Εισαγωγή .....	3
1.2 Μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου .....	5
1.3 Η αιολική ενέργεια και το τεχνικά αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό...6	
1.4 Παραγωγή ενέργειας από τον άνεμο .....	13
1.4.1 Λειτουργία σταθερών στροφών-σταθερής συχνότητας .....	17
1.4.2 Λειτουργία μεταβλητών στροφών-σταθερής συχνότητας ...	20
1.5 Η δομή μιας ανεμογεννήτριας .....	24
1.5.1 Ο μηχανισμός περιστροφής της ανεμογεννήτριας .....	28

### Κεφάλαιο 2

Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου Ανεμογεννητριών .....	34
2.1 Pitch control (Αυτόματος έλεγχος μεταβολής της κλίσης των πτερύγιων) .....	35
2.2 Vestas V90(2Mw) .....	40
2.2.1 Συστήματα ελέγχου της ανεμογεννήτριας τεχνολογίας VESTAS V90(2Mw) .....	43
2.2.2 Vestas multi processor controller (VMP) .....	50

<b>2.3 Σύστημα Ελέγχου Ανεμογεννήτριας Μικρής Ισχύος .....</b>	<b>68</b>
<b>2.3.1 Λειτουργία Ελέγχου ΑΛΚΥΟΝΙΣ .....</b>	<b>69</b>
<b>2.3.2 Σύστημα ελέγχου με προγραμματιζόμενο λογικό ελεγκτή (PLC) .....</b>	<b>71</b>

### Κεφάλαιο 3

<b>3.1 Χρήση επιτυχιανσομέτρου για τον περιορισμό των διαταραχών που επηρεάζουν την σωστή λειτουργία της ανεμογεννήτριας .....</b>	<b>78</b>
<b>3.2 Οπτικοί αισθητήρες φορτίων τεχνολογίας FBG .....</b>	<b>88</b>

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### 1.1 Εισαγωγή

Οι άνεμοι παράγονται κυρίως από την άνιση θέρμανση της επιφάνειας της γης από τον ήλιο. Οι θάλασσες παρουσιάζουν μεγάλη θερμοχωρητικότητα αφού εκτός από την εξάτμιση, η θερμότητα μεταφέρεται προς το εσωτερικό των υδάτινων μαζών. Έτσι κατά τη διάρκεια της ημέρας ο αέρας πάνω από λίμνες και θάλασσες παραμένει σχετικά κρύος, σε σχέση με τον αέρα της στεριάς που θερμαίνεται περισσότερο. Έτσι έχουμε και μια μείωση της πυκνότητάς του, με αποτέλεσμα την ανύψωσή του και τα κρύα βαρύτερα στρώματα του αέρα που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας κινούνται για να πάρουν τη θέση τους πάνω από την ξηρά.

Με τον τρόπο αυτόν παράγονται τα τοπικά παραλιακά ρεύματα που κατά τη διάρκεια της νύχτας τα ρεύματα αυτά αντιστρέφονται επειδή η θερμοκρασία της ξηράς ελαττώνεται πολύ γρηγορότερα από αυτή του νερού και έτσι ο ψυχρότερος άρα και βαρύτερος αέρας της ξηράς κινείται προς τη θάλασσα όπου αναπληρώνει αυτόν που ανυψώνεται από την επιφάνειά της.

Παρόμοια τοπικά ρεύματα συμβαίνουν στις βουνοπλαγιές κατά τη διάρκεια της ημέρας όταν ο θερμός αέρας ανυψώνεται κατά μήκος των θερμών πλαγιών υπό την επίδραση του ήλιου. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, ο σχετικά κρύος αέρας των πλαγιών κινείται προς τις πεδιάδες. Κατά τον ίδιο τρόπο παράγονται και οι πλανητικοί άνεμοι λόγω της μεγαλύτερης θέρμανσης της επιφάνειας της γης κοντά στον ισημερινό απ' ό,τι στους πόλους. Επίσης έχουμε και τους εποχιακούς ανέμους, όπως οι Μουσσώνες, καθώς και τους ετήσιους ή Μελέμια.

Οι τελευταίοι έχουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον, αφού η παρουσία τους είναι πολύ συχνή στην περιοχή του Αιγαίου. Είναι άνεμοι του καλοκαιριού, βόρειο-βορειοανατολικοί μέχρι και βορειοδυτικής διεύθυνσης που αρχίζουν να πνέουν από τις αρχές του Μαΐου και εξασθενούν στα μέσα του Οκτωβρίου. Τη μεγαλύτερη ένταση και συχνότητα τη παρουσιάζουν από τα μέσα του Ιουλίου

έως τα μέσα του Σεπτεμβρίου, με μέγιστη ημερήσια διακύμανση τις απογευματινές ώρες, ενώ η ένταση τους ελαττώνεται τη νύχτα.

Στη γενική τους μορφή οι ανεμοκινητήρες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε άλλες πιο χρήσιμες μορφές ενέργειας, όπως θερμική, ηλεκτρική και φυσικά μηχανική. Ο άνεμος όμως, είναι μια ανεξέλεγκτη και χρονικά μεταβαλλόμενη σε όλες της, τις παραμέτρους πηγή ενέργειας. Η δέσμευση και χρησιμοποίηση της ενέργειας αυτής, είναι ως εκ τούτου μια πολύ δαπανηρή διαδικασία. Η σχεδίαση και η κατασκευή μιας αποδοτικής και παράλληλα οικονομικής ανεμομηχανής δεν είναι εύκολη δουλειά.

Παρόλα αυτά, οι σύγχρονες ανεμομηχανές (που η επιστημονική ονομασία τους είναι «συστήματα μετατροπής» της αιολικής ενέργειας, ή πιο απλά «ανεμοκινητήρες», ή όταν παράγουν ηλεκτρική ενέργεια «ανεμογεννήτριες»), χρησιμοποιώντας τα πρόσφατα επιτεύγματα στην τεχνολογία των υλικών, στη μηχανολογία, στην ηλεκτρονική και στην αεροδυναμική, έχουν ανεβάσει σε υψηλά επίπεδα την απόδοση τους, μειώνοντας συνεχώς το κόστος της παραγόμενης ενέργειας.

Η μελέτη ενός συστήματος ανεμογεννήτριας, περιλαμβάνει την αεροδυναμική σχεδίαση και τη μελέτη εφαρμογής, στην οποία περιλαμβάνονται η μηχανολογική μελέτη και σχεδίαση, η μελέτη του ηλεκτρολογικού συστήματος και τα ηλεκτρολογικά συστήματα ελέγχου και ασφαλείας. Η αεροδυναμική σχεδίαση αποτελεί προϋπόθεση για τον σχεδιασμό ενός συστήματος δέσμευσης και μετατροπής της ενέργειας του ανέμου, ενώ η ηλεκτρομηχανολογική μελέτη είναι το αμέσως επόμενο και αναγκαίο στάδιο για την υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος, κατά τον αποδοτικότερο και πλέον συμφέροντα τεχνοοικονομικό τρόπο [3].

## 1.2 Μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου

Η χαμηλότερη περιοχή της ατμόσφαιρας, στην οποία βρίσκονται και οι περισσότερες κατασκευές, ονομάζεται ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα. Εκεί, η κίνηση του ανέμου επιβραδύνεται από δυνάμεις τριβής και μεγάλα εμπόδια στην επιφάνεια της γης καθώς και από φαινόμενα που οφείλονται στο στροβιλισμό. Ο στροβιλισμός, ο οποίος μπορεί να είναι μηχανικής ή και θερμικής προέλευσης, προκαλεί απότομες μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων και πλατών, γνωστές ως ριπές .

Από μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου σε διάφορα ύψη από το έδαφος, διαπιστώνουμε ότι:

- η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται συναρτήσει του ύψους από το έδαφος.
- στην περιοχή υπάρχουν διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου, δηλαδή στροβιλισμός.
- ο στροβιλισμός διαδίδεται σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων.

Προκειμένου να διαχωριστούν οι μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου που οφείλονται στο στροβιλισμό από τις πιο αργές, που οφείλονται σε μακρομετεωρολογικά φαινόμενα, χρησιμοποιείται το μέγεθος της μέσης τιμής της ταχύτητας του ανέμου,  $V$ , που δίνεται από την εξίσωση 1.2.1 :

$$V = \frac{1}{T} \int_{t_0 - T/2}^{t_0 + T/2} v(t) dt \quad \text{Σχέση 1.2.1}$$

Όπου,  $v(t)$  : η στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου



T: το χρονικό διάστημα στο οποίο γίνεται η ολοκλήρωση ώστε να υπολογιστεί η μέση τιμή.

Η ενεργειακή φασματική κατανομή της ταχύτητας του ανέμου έχει δύο περιοχές. Η περιοχή χαμηλών συχνοτήτων του φάσματος αντιστοιχεί στα μακρομετεωρολογικά φαινόμενα. Σε αυτήν περιλαμβάνονται οι μεταβολές του ανέμου που οφείλονται σε αλλαγές του καιρού από μέρα σε μέρα έως εβδομάδα (συνοπτικές μεταβολές) και οι μεταβολές του ανέμου κατά τη διάρκεια της ημέρας που οφείλονται σε θερμοκρασιακές διαφορές ανάμεσα στη στεριά και τη θάλασσα (ημερήσιες μεταβολές).

Η πλευρά των υψηλών συχνοτήτων αντιστοιχεί στα μικρομετεωρολογικά φαινόμενα και οι μεταβολές οφείλονται στο στροβιλισμό. Ο στροβιλισμός παίζει σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό και στην απόδοση των ανεμογεννητριών, καθώς και στην ποιότητα της ηλεκτρικής ισχύος στο τροφοδοτούμενο δίκτυο [3].

### **1.3 Η αιολική ενέργεια και το τεχνικά αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό**

Ο υπολογισμός του τεχνικά αξιοποιήσιμου αιολικού δυναμικού είναι μια αρκετά πολύπλοκη διαδικασία ακόμα και αν ληφθεί υπόψη μόνο η διαθεσιμότητα του ανέμου και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιούμε. Η μέση μηνιαία ή ετήσια ταχύτητα ανέμου και ο βαθμός απόδοσης των ανεμογεννητριών δεν αρκούν για τον υπολογισμό. Είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε ακριβώς την μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου κατά την διάρκεια του έτους.

Πολλές φορές η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει του χρόνου παριστάνεται με την βοήθεια της κατανομής Weibull (σχήμα 1.3.1). Η συνάρτηση Weibull δίνεται από την εξίσωση 1.3.2 :

$$p(V) = \frac{K}{V} \left(\frac{V}{C}\right)^{K-1} e^{-\left(\frac{V}{C}\right)^K} \quad \text{Σχέση 1.3.2}$$

όπου

$p(V)$  : η συχνότητα εμφάνισης της ταχύτητας του ανέμου  $V$ .

$C$  : παράμετρος κλίμακας ή χαρακτηριστική ταχύτητα του ανέμου.

$K$  : παράμετρος μορφής.

Στο συγκεκριμένο σχήμα δεχόμαστε μια μέση ταχύτητα ανέμου 7m/sec ενώ επειδή χρησιμοποιείται παράμετρος μορφής 2 (μια συνηθισμένη τιμή για την Β.Δ. Ευρώπη), συμπίπτει με την κατανομή Rayleigh. Για τα νησιά του Αιγαίου η παράμετρος μορφής κυμαίνεται από 1,4 ως 2, ενώ σε ορισμένα νησιά παίρνει μικρότερες τιμές όπως 1,22 (Ηράκλειο). Όσο μικρότερη είναι η τιμή της παραμέτρου τόσο η κατανομή γίνεται πιο ομοιόμορφη και οι ταχύτητες κοντά στην μέση είναι συχνότερες. Για να σχηματιστεί η καμπύλη του σχήματος 1.3.1 απαιτείται πειραματικός προσδιορισμός της συχνότητας των ταχυτήτων του ανέμου και γνώση της μορφολογίας της περιοχής έτσι ώστε οι ταχύτητες να αναχθούν από το ύψος των μετεωρολογικών μετρήσεων στο ύψος του ρότορα της ανεμογεννήτριας. Αυτή η αναγωγή γίνεται με την βοήθεια της σχέσης 1.3.3 :

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^\alpha \quad \text{Σχέση 1.3.3, όπου } \alpha \text{ παράμετρος που αυξάνεται όσο}$$

πιο έντονη γίνεται η μορφολογία και η τραχύτητα του εδάφους.

Πίνακας 1.3.1 . Τυπικές τιμές της παραμέτρου  $\alpha$  :

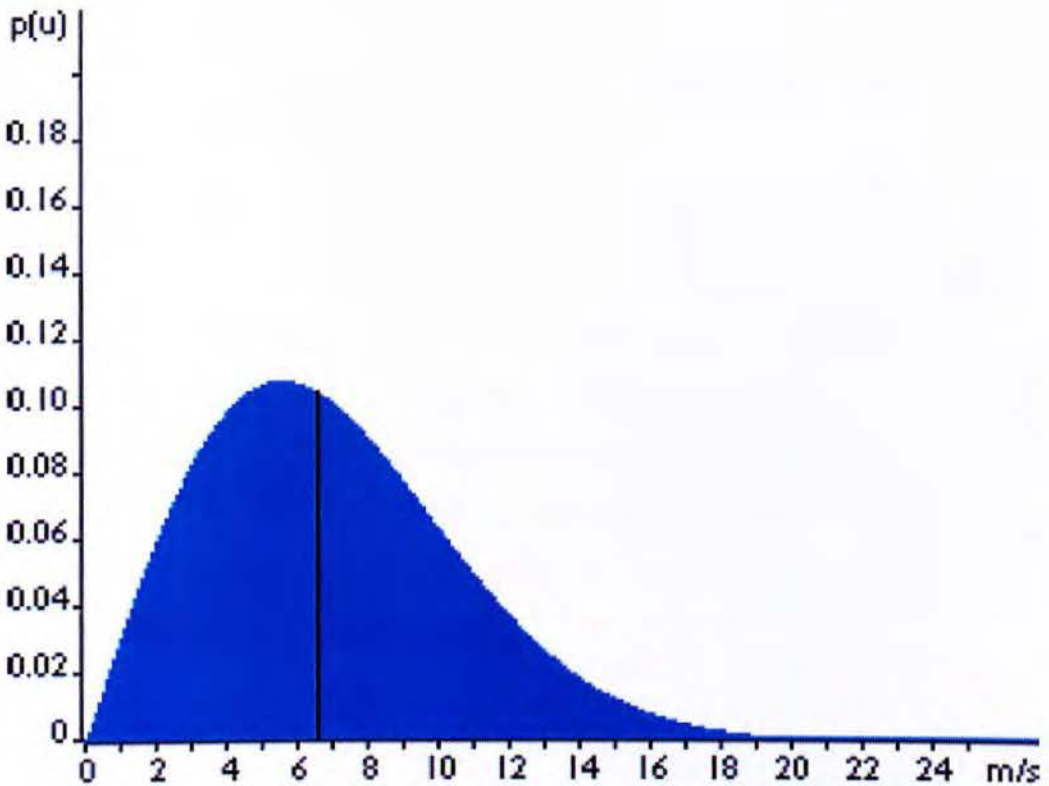
Άμμος	0.10
θερισμένο γρασίδι	0.13
ψηλό γρασίδι	0.19
προάστιο	0.32

Γενικά είναι προτιμότερο για το προσδιορισμό της ταχύτητας του ανέμου να χρησιμοποιηθούν πίνακες του ευρωπαϊκού αιολικού άτλαντα που εκφράζουν την ταχύτητα του ανέμου συναρτήσει του ύψους και της τραχύτητας του εδάφους για τις περιοχές που μας ενδιαφέρουν.

Η ισχύς του ανέμου ορισμένης ταχύτητας είναι:

$$P=0.5 \cdot \rho \cdot A \cdot u^3 \quad \text{Σχέση 1.3.4}$$

- $\rho$  είναι η πυκνότητα του αέρα
- $A$  είναι η επιφάνεια από όπου διέρχεται ο άνεμος
- $u$  είναι η ταχύτητα του ανέμου

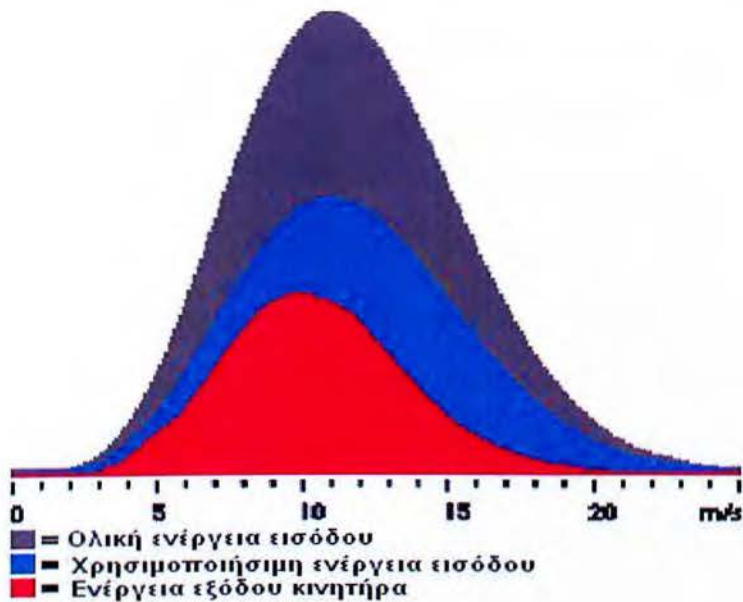


Σχήμα 1.3.1 . Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας ταχυτήτων ανέμου

Από το σχήμα 1.3.1 φαίνεται ότι οι υψηλές ταχύτητες του ανέμου σπανίζουν, αλλά η συνεισφορά τους στην παραγόμενη ενέργεια είναι πολύ μεγάλη (σχέση 1.3.4). Για τον υπολογισμό της αιολικής ισχύος δεν λαμβάνουμε υπόψη την μέση ταχύτητα αλλά πολλαπλασιάζουμε κάθε πιθανότητα μιας ορισμένης ταχύτητας ανέμου (από την Weibull) με την ισχύ που παράγεται σε αυτή την ταχύτητα. Έτσι σχηματίζεται η θεωρητική κατανομή της αιολικής ισχύος για κάθε ταχύτητα (σχήμα 1.3.2 , γκρι καμπύλη). Μια ανεμογεννήτρια δεν μπορεί να παραλάβει όλη αυτή την ισχύ γιατί τότε ο αέρας που θα περνούσε πίσω από την έλικα της ανεμογεννήτριας δεν θα απομακρύνονταν διότι θα είχε μηδενική κινητική ενέργεια στην έξοδο.

Έτσι, δεν θα παραλάμβανε καθόλου ενέργεια επειδή ο στάσιμος αέρας στην έξοδο δεν θα επέτρεπε να εισαχθεί νέος. Στην αντίθετη περίπτωση θα διέρχονταν ο αέρας χωρίς καμία αντίσταση και δεν θα παράγονταν έργο. Έχει αποδειχτεί ότι μια ιδανική ανεμογεννήτρια θα πρέπει να μειώσει την αρχική ταχύτητα του αέρα κατά τα 2/3 της. Επιπλέον σύμφωνα με τον νόμο του Albert Betz (1919): Η μέγιστη μηχανική ισχύς που μπορεί να παραχθεί από αιολική είναι ίση με 59,3% αυτής.

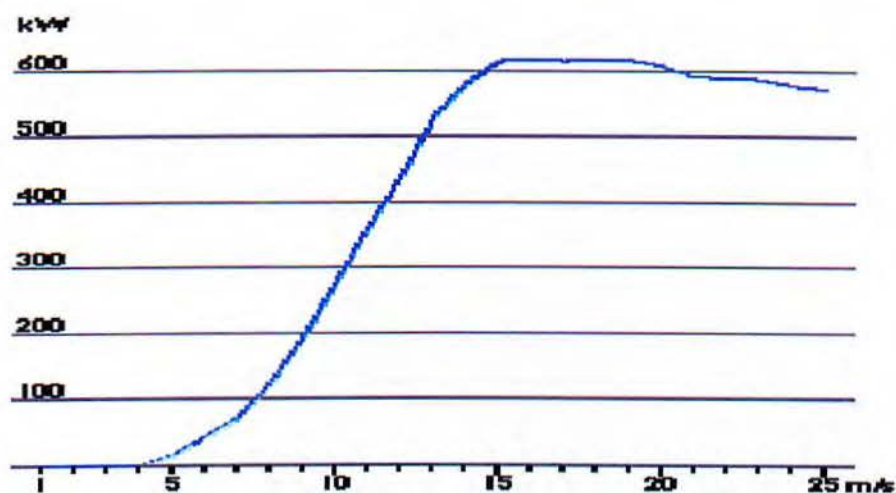
Όπως αναφέραμε, αν πολλαπλασιαστεί η ισχύς ανέμου για κάθε ταχύτητα (σχέση 1.3.4) με την αντίστοιχη πιθανότητα εμφάνισης αυτής της ταχύτητας (σχήμα 1.3.1) τότε προκύπτει η γκρι καμπύλη του σχήματος 1.3.2. Έτσι κάτω από την γκρι καμπύλη φαίνεται η θεωρητική ισχύς ανά  $m^2$  ροής αέρα (δεχόμενοι μια μέση ταχύτητα 7m/s και παράμετρο μορφής της Weibull 2). Η περιοχή κάτω από την μπλε καμπύλη αποτελεί το 59,3% της θεωρητικής, ενώ η κόκκινη περιοχή εκφράζει την πραγματική ηλεκτρική ισχύ που παράγεται από την ανεμογεννήτρια.



Σχήμα 1.3.2 . Συνάρτηση πυκνότητας ισχύος ανέμου και ανεμογεννήτρια

Συγκρίνοντας την μορφή των σχημάτων 1.3.1 και 1.3.2 συμπεραίνουμε ότι το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας από ανεμογεννήτρια κατά την διάρκεια ενός έτους παραλαμβάνεται σε ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της μέσης (γι' αυτό άλλωστε δεν μπορούμε να υπολογίσουμε το αιολικό δυναμικό από την μέση ταχύτητα).

Για να γίνει ο προσδιορισμός της κόκκινης περιοχής πρέπει να λάβουμε υπόψη την καμπύλη ισχύος (power curve) της ανεμογεννήτριας. Η καμπύλη αυτή καθορίζει την απόδοση της ανεμογεννήτριας συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου και είναι διαφορετική για κάθε ανεμογεννήτρια. Μια τυπική καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας 600 kW ιδανικής κατασκευής φαίνεται στο σχήμα 1.3.3 .



Σχήμα 1.3.3 . Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας

Για τον προσδιορισμό της μέσης ετήσιας ισχύς (σύμφωνα με την μέθοδο Cliff) πρέπει να πολλαπλασιαστούν οι αντίστοιχες τιμές των σχημάτων 1.3.1 και 1.3.3 που ισχύουν για κάθε ταχύτητα ανέμου και να αθροιστούν τα γινόμενα. Δηλαδή με το πολλαπλασιασμό της πιθανότητας εμφάνισης μιας ταχύτητας ανέμου (σχήμα 1.3.1) με την ισχύ που αποδίδει η ανεμογεννήτρια σε αυτή την ταχύτητα (σχήμα 1.3.3) προσδιορίζεται η συνεισφορά της κάθε ταχύτητας του ανέμου στην μέση ετήσια ισχύ της ανεμογεννήτριας. Στην συνέχεια το άθροισμα αυτών των γινομένων (μέση ετήσια ισχύς) πολλαπλασιάζεται με την διαθεσιμότητα της ανεμογεννήτριας και με τις 8760 ώρες του έτους. Η διαθεσιμότητα των σύγχρονων ανεμογεννητριών είναι τουλάχιστον 98%.

Επιπλέον πρέπει να λάβουμε υπόψη την μέση θερμοκρασία της περιοχής που εξετάζουμε, διότι κάθε καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας έχει υπολογιστεί για 15°C. Μια αύξηση της θερμοκρασίας θα οδηγούσε σε μείωση της πυκνότητας του αέρα άρα και της ισχύος της ανεμογεννήτριας διότι τότε μετατοπίζεται η καμπύλη 3 προς τα κάτω σύμφωνα με τη σχέση ισχύος της ανεμογεννήτριας :

$$P=0.5 \cdot \rho \cdot u^3 \cdot A \cdot C_f \quad \text{Σχέση 1.3.5}$$

-  $C_f$ : ένας συντελεστής άνωσης (χαρακτηριστικός για κάθε ανεμογεννήτρια)

-  $\rho$ : η πυκνότητα του αέρα

-  $A$ : η επιφάνεια από όπου διέρχεται ο άνεμος

-  $u$ : η ταχύτητα του ανέμου

Ο συντελεστής άνωσης ή συντελεστής αεροδυναμικής απόδοσης  $C_f$  εκφράζει το ποσοστό της ενέργειας που έχει ο άνεμος λίγο πριν τον ανεμοκινητήρα, το οποίο μετατρέπεται σε μηχανικό έργο στο δρομέα. Δίνεται από τη σχέση :

$$C_f = 4a(1-a)^2 \quad \text{Σχέση 1.3.6}$$

όπου  $a$  συντελεστής που ισούται με :

$$a = \frac{v_1 - v_0}{v_1} \quad \text{Σχέση 1.3.7}$$

$v_1, v_0$  : οι ταχύτητες του ανέμου αρκετά πριν και κοντά στο δρομέα

Παραγωγή του  $C_f$  ως προς  $a$  δίνει τη μέγιστη τιμή του η οποία είναι :

$$C_{pmax} = \frac{16}{27} = 59\% \quad \text{Σχέση 1.3.8}$$

Αυτό είναι το όριο του Betz που αναφέρθηκε παραπάνω. Ο συντελεστής  $C_f$  είναι συνάρτηση της γεωμετρίας των πτερυγίων και του λόγου ταχύτητας προς την ταχύτητα του αέρα,  $\lambda$ , που ορίζεται από την εξίσωση :

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad \text{Σχέση 1.3.9}$$

όπου

$\omega$  η γωνιακή ταχύτητα των πτερυγίων.

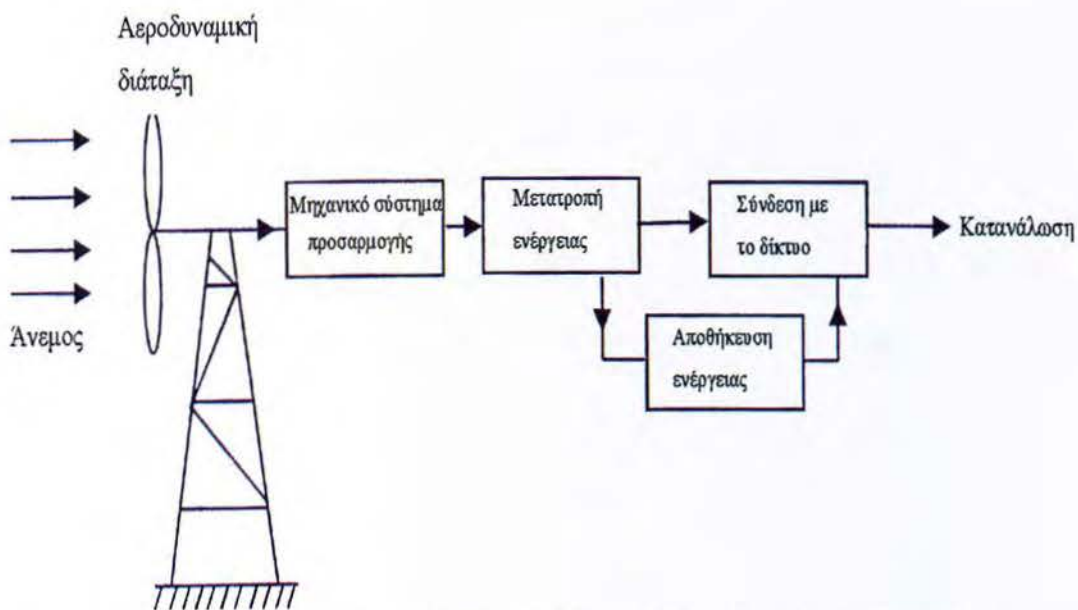
$R$  η ακτίνα των πτερυγίων.

V η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος του άξονα του δρομέα.

Το διάγραμμα 3 είναι δεδομένο από τον κατασκευαστή. Από την σχέση 1.3.3 ή το σχήμα 1.3.3 φαίνεται ότι είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε με μεγάλη ακρίβεια την ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή εγκατάστασης των ανεμογεννητριών. Επιπλέον είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η μέση ετήσια παραγόμενη ενέργεια μιας ανεμογεννήτριας συναρτήσει της μέσης ταχύτητας του ανέμου για διάφορες τιμές της παραμέτρου μορφής. Η καμπύλη αυτή εξάγεται με βάση την μέθοδο Cliff και συνήθως δίνεται μαζί με τα υπόλοιπα τεχνικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας [3].

## 1.4 Παραγωγή ενέργειας από τον άνεμο

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανεμογεννήτριες διαφοροποιείται σημαντικά από τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής. Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να αναφέρουμε τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται ένα σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο. Στο σχήμα 1.4.1 φαίνεται το block διάγραμμα ενός τέτοιου συστήματος καθώς και η ροή ενέργειας σε αυτό:



Σχήμα 1.4.1: Διάταξη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τον αέρα.



Η κινητική ενέργεια των αερίων μαζών μετατρέπεται σε μηχανικό έργο με την βοήθεια μιας αεροδυναμικής διάταξης, του ανεμοκινητήρα (A/K). Μεταξύ του ανεμοκινητήρα και της γεννήτριας, η οποία μετατρέπει το μηχανικό έργο σε ηλεκτρική ενέργεια, παρεμβάλλεται ένα μηχανικό σύστημα προσαρμογής. Στη συνέχεια, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται στην έξοδο της γεννήτριας, τροφοδοτείται στο δίκτυο, μέσω της χρησιμοποιούμενης συσκευής συνδέσεώς της με αυτό. Οι μεγάλες διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου με το χρόνο, οδηγούν σε ασυμφωνία μεταξύ ζήτησης και παραγωγής ενέργειας. Λύση στο πρόβλημα αυτό μπορεί να δοθεί με την χρήση συσκευών αποθήκευσης ενέργειας. Η αποθηκευμένη ενέργεια καλύπτει το ενεργειακό έλλειμμα, όταν η ισχύς της ανεμογεννήτριας πέφτει κάτω από ένα συγκεκριμένο επίπεδο.

Στα αιολικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας η μεταβλητότητα του ανέμου προκαλεί σημαντικές διακυμάνσεις στην ισχύ που απομαστεύεται από τον ανεμοκινητήρα, οι οποίες μεταφέρονται μέσω του μηχανικού συστήματος μετάδοσης στην έξοδο της γεννήτριας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα αφενός μεν να εμφανίζονται έντονες μηχανικές και ηλεκτρικές καταπονήσεις και αφετέρου να έχουμε μεγάλες ταλαντώσεις της ηλεκτρικής ισχύος στην έξοδο της ανεμογεννήτριας. Οι ταλαντώσεις αυτές αλλοιώνουν την ποιότητα της ισχύος, ενώ είναι δυνατό να επηρεάσουν την ευστάθεια του δικτύου στο οποίο είναι συνδεδεμένη η ανεμογεννήτρια. Στη δυναμική αυτών των φαινομένων συμμετέχουν εξίσου ο ανεμοκινητήρας, το μηχανικό σύστημα μετάδοσης της ισχύος, η γεννήτρια, τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου που μπορεί να υπάρχουν και το ηλεκτρικό δίκτυο.

Ο άνεμος, από μετεωρολογικής άποψης, είναι αέριες μάζες σε κίνηση. Ο αέρας έχει μάζα  $m$  η οποία όταν αποκτήσει ταχύτητα  $u_w$ , ο προκύπτων άνεμος έχει κινητική ενέργεια

$$1/2 \cdot m \cdot u_w^2 \quad \text{Σχέση 1.4.1}$$

Αν  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα που μεταβάλλεται με το ύψος και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες,  $u_w$  η ταχύτητα του ανέμου και  $A$  η επιφάνεια που σχηματίζουν τα πτερύγια όταν περιστρέφονται, τότε

$$m = \rho \cdot A \cdot u_w \quad \text{Σχέση 1.4.2}$$

θα είναι η μάζα αέρα που περνά στη μονάδα του χρόνου από τη συγκεκριμένη επιφάνεια. Συνεπώς, σύμφωνα με τη σχέση 1.4.1 η κινητική ενέργεια που περνά από την επιφάνεια στη μονάδα του χρόνου, δηλαδή η ισχύς θα είναι

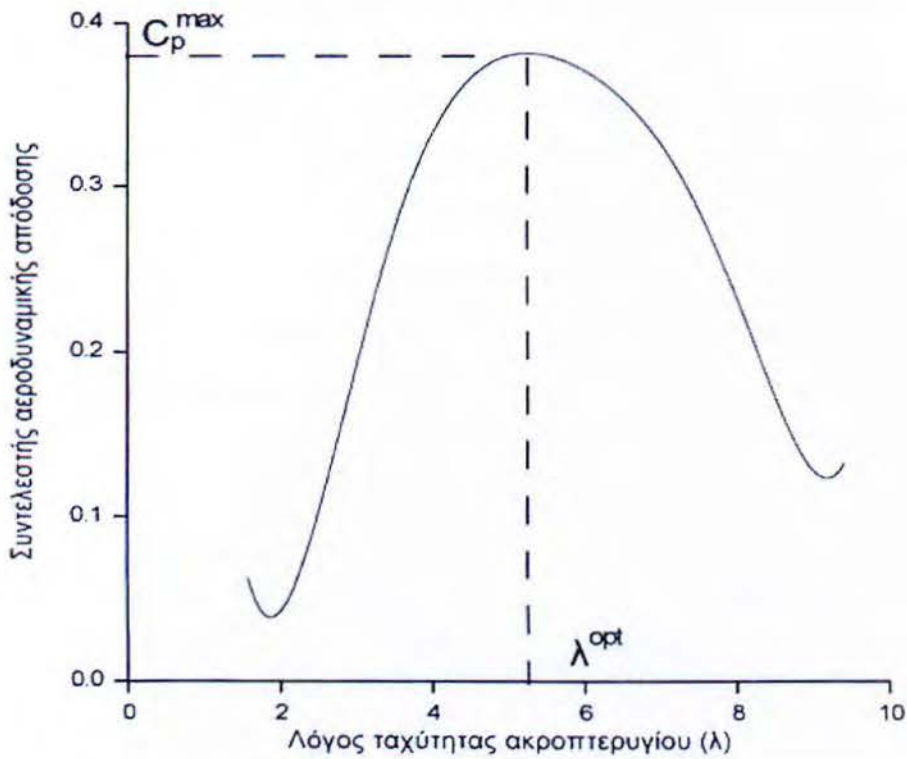
$$P_{\text{wind}} = 1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot u_w \cdot u_w^2 = 0.5 \rho \cdot u_w^3 A = 0.5 \cdot \rho \cdot u_w^3 \cdot \pi \cdot R^2 \quad \text{Σχέση 1.4.3}$$

όπου  $R$  η ακτίνα των πτερυγίων.

Αυτή είναι η ολική ισχύς που διαθέτει ο άνεμος όταν διαπερνά τα πτερύγια ενός ανεμοκινητήρα. Η μηχανική ισχύς που απομαστεύεται από τον ανεμοκινητήρα ( $P_{\text{WM}}$ ) είναι μόνο ένα κλάσμα αυτής της ισχύος, διότι αφενός μεν ο αέρας πρέπει να απομακρύνεται από τον ανεμοκινητήρα με κάποια ταχύτητα, αφετέρου δε τα πτερύγια του  $A/K$  προκαλούν εκτροπή μέρους του αέρα το οποίο τα παρακάμπτει χωρίς να τα διαπεράσει. Τα μεγέθη  $P_{\text{wind}}$  και  $P_{\text{WM}}$  συνδέονται μεταξύ τους μέσω του συντελεστή αεροδυναμικής ισχύος  $C_f$  ο οποίος αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος για κάθε  $A/K$ :

$$P_{\text{WM}} = C_f \cdot P_{\text{wind}} = 0.5 \cdot \rho \cdot C_f \cdot u_w^3 \cdot \pi R^2 \quad \text{Σχέση 1.4.4}$$

Στο σχήμα 1.4.2 δίνεται μια τυπική καμπύλη του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος  $C_f(\lambda)$  θεωρώντας την κλίση των πτερυγίων σταθερή. Όπως φαίνεται από το σχήμα μόνο για μία τιμή του λόγου  $\lambda$  ο συντελεστής αεροδυναμικής ισχύος αποκτά τη μέγιστη τιμή του, η οποία είναι βέβαια μικρότερη από το όριο του Betz.



Σχήμα 1.4.2: Συντελεστής αεροδυναμικής απόδοσης συναρτήσει του λόγου  $\lambda$ .

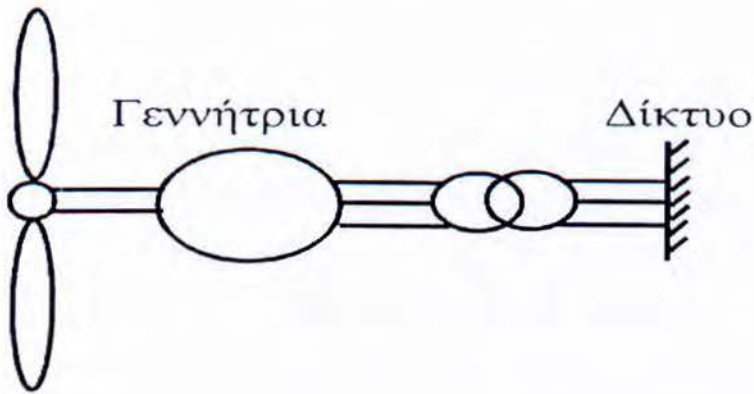
Με τη βοήθεια του σχήματος 1.4.2 θα περιγραφούν στη συνέχεια οι δύο βασικές μέθοδοι λειτουργίας των συστημάτων μετατροπής της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική, οι οποίες είναι:

- Μέθοδος σταθερών στροφών – σταθερής συχνότητας (ΣΣΣΣ)
- Μέθοδος μεταβλητών στροφών – σταθερής συχνότητας (ΜΣΣΣ)

Οι πρώτες ανεμογεννήτριες που εγκαταστάθηκαν λειτουργούσαν σύμφωνα με τη μέθοδο σταθερών στροφών – σταθερής συχνότητας. Αργότερα διαπιστώθηκε ότι το σύστημα μεταβλητών στροφών – σταθερής συχνότητας προσφέρει περισσότερα πλεονεκτήματα και για το λόγο αυτό καθιερώθηκε [2].

### 1.4.1 Λειτουργία σταθερών στροφών-σταθερής συχνότητας

Στη λειτουργία σταθερών στροφών ο δρομέας του ανεμοκινητήριου συστήματος στρέφεται με σχεδόν σταθερή ταχύτητα, ανεξάρτητα από την ταχύτητα του ανέμου. Η σύνδεση της ανεμογεννήτριας με το δίκτυο γίνεται απευθείας, με τη χρήση ενός μετασχηματιστή προσαρμογής της τάσης εξόδου της Α/Γ στην τάση του δικτύου με το οποίο αυτή συνδέεται. Ένα σχηματικό διάγραμμα της λειτουργίας αυτής φαίνεται στο σχήμα 1.4.3:



Σχήμα 1.4.3: Λειτουργία σταθερών στροφών – σταθερής συχνότητας.

Η γεννήτρια του αιολικού συστήματος μπορεί να είναι είτε σύγχρονη είτε ασύγχρονη. Στην περίπτωση σύγχρονης γεννήτριας οι στροφές είναι σταθερές και εξαρτώνται από τη συχνότητα του δικτύου, ενώ στην περίπτωση χρησιμοποίησης ασύγχρονης γεννήτριας οι στροφές είναι σχεδόν σταθερές, αφού εξαιτίας της ολίσθησης μεταβάλλονται σε ένα μικρό εύρος τιμών.

Τα συστήματα ΣΣΣΣ παρουσιάζουν προβλήματα που οφείλονται στην απευθείας σύνδεσή τους με το δίκτυο. Για παράδειγμα, όταν χρησιμοποιείται σύγχρονη γεννήτρια όπως στην περίπτωση μας, η μανδάλωση της ταχύτητας σε μία συγκεκριμένη τιμή έχει ως αποτέλεσμα απότομες μεταβολές της ισχύος του ανέμου να μεταφέρονται απ' ευθείας στο δίκτυο. Επιπλέον, εάν η μεταβαλλόμενη αεροδυναμική ροπή περιέχει αρμονικές συνιστώσες, που βρίσκονται κοντά στις συχνότητες συντονισμού του μηχανικού συστήματος μετάδοσης της ισχύος, θα εμφανιστούν έντονες ταλαντώσεις σ' αυτό αλλά και στην ισχύ εξόδου της γεννήτριας. Από την άλλη πλευρά, η χρησιμοποίηση

ασύγχρονης γεννήτριας η οποία επιτρέπει τη μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας σε ένα περιορισμένο εύρος έχει σαν αποτέλεσμα την εξομάλυνση των διακυμάνσεων της ισχύος στην έξοδό της. Το μειονέκτημά της είναι ότι σε αντίθεση με την σύγχρονη γεννήτρια απορροφά άεργο ισχύ, πράγμα που σημαίνει ότι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποκλειστική τροφοδότηση δικτύων.

Το μεγαλύτερο όμως μειονέκτημα της λειτουργίας ΣΣΣΣ είναι άλλο. Στη λειτουργία με σταθερές στροφές, έχοντας δηλαδή  $\Omega_{WM}=ct$ , ο λόγος ακροπτερυγίου, όπως προκύπτει από τη σχέση 1.3.9, θα είναι αντιστρόφως ανάλογος της ταχύτητας του ανέμου. Αυτό σημαίνει πως μόνο για μία ταχύτητα ανέμου ο λόγος  $\lambda$  θα παίρνει τη βέλτιστη τιμή  $\lambda_{opt}$  για την οποία  $C_p=C_{p,max}$  (σχήμα 1.4.2). Η λειτουργία ΣΣΣΣ συνεπάγεται, λοιπόν, την ελλιπή εκμετάλλευση του ανεμοκινητήρα για τις περισσότερες ταχύτητες ανέμου, γεγονός που οδηγεί σε δραστική μείωση του συντελεστή απόδοσης τέτοιων συστημάτων.

Ως συμπλήρωση του βασικού σχήματος 1.4.2 δίδεται παρακάτω, στο σχήμα 1.4.4, η τυπική μορφή των καμπυλών της αεροδυναμικής ισχύος του δρομέα της ανεμογεννήτριας PWM συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του  $\Omega_{WM}$ , με παράμετρο την ταχύτητα του ανέμου  $u_w$ .

Όπως φαίνεται από το σχήμα 1.4.4, όταν η ταχύτητα του δρομέα είναι σταθερή, π.χ.  $N_s$ , μόνο για μία ταχύτητα ανέμου (12m/s) η ισχύς που απομαστεύεται από τον άνεμο είναι η μέγιστη δυνατή. Για όλες τις υπόλοιπες ταχύτητες ανέμου η ισχύς που παίρνουμε από τον άνεμο είναι εμφανώς μικρότερη της μέγιστης δυνατής, οδηγώντας έτσι στη μείωση της απόδοσης των συστημάτων που λειτουργούν με σταθερές στροφές περιστροφής (λειτουργία ΣΣΣΣ).



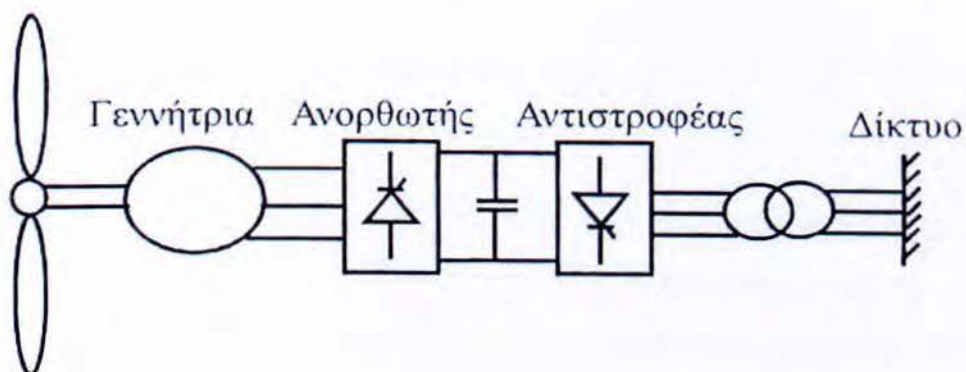
Σχήμα 1.4.4: Καμπύλες αεροδυναμικής ισχύος – στροφών του δρομέα, με παράμετρο την ταχύτητα του ανέμου και βέλτιστη καμπύλη λειτουργίας.

Ο έλεγχος των συστημάτων ΣΣΣΣ βασίζεται στην υλοποίηση παθητικών και ενεργητικών τεχνικών ελέγχου. Παθητικές τεχνικές ελέγχου είναι αυτές που βασίζονται στα φυσικά χαρακτηριστικά του ανεμοκινητήρα. Μια τέτοια τεχνική είναι ο έλεγχος "stall", όπου η ρύθμιση της ισχύος στα επιθυμητά επίπεδα γίνεται μέσω της αύξησης της δύναμης τριβής στα πτερύγια (απώλεια προσανατολισμού). Αντίθετα ο ενεργητικός έλεγχος στηρίζεται στην τροποποίηση της λειτουργικής κατάστασης του Α/Κ, άρα ουσιαστικά στη δυνατότητα τροποποίησης των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών του (pitch control).

Συμπερασματικά, το σύστημα σταθερών στροφών – σταθερής συχνότητας παρουσιάζει το πλεονέκτημα της εξαιρετικής απλότητας και αξιοπιστίας και των μηδενικών αναγκών συντήρησης, γεγονός που συνέβαλε στην καθιέρωσή του σε μια εποχή όπου η αξιοπιστία ήταν το βασικότερο από τα προς επίλυση προβλήματα των ανεμογεννητριών. Ταυτόχρονα, όμως, το σχήμα αυτό χαρακτηρίζεται από μια σειρά από καθοριστικά μειονεκτήματα: αυξημένη μεταβλητότητα της ροπής και της ισχύος εξόδου, ταλαντώσεις του μηχανικού συστήματος και λειτουργία του συστήματος σε υποβέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος [2].

### 1.4.2 Λειτουργία μεταβλητών στροφών-σταθερής συχνότητας

Λύση σε πολλά από τα παραπάνω προβλήματα μπορεί να δώσει η λειτουργία ΜΣΣΣ, όπου η ταχύτητα του δρομέα της ανεμογεννήτριας μεταβάλλεται κατά ελεγχόμενο τρόπο, ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Για το σκοπό αυτό και τη σύνδεση της ηλεκτρικής γεννήτριας στο δίκτυο σταθερής συχνότητας έχουν προταθεί παλαιότερα διάφορες μέθοδοι με χρήση υδραυλικών συστημάτων ή κιβωτίων ταχυτήτων μεταβαλλόμενου λόγου, αλλά ο πλέον κατάλληλος τρόπος, για λόγους απωλειών, αξιοπιστίας και αναγκών συντήρησης, είναι με τη χρήση μετατροπέα συχνότητας. Με τον τρόπο αυτό η ταχύτητα περιστροφής αποδεσμεύεται από τη σταθερή συχνότητα του δικτύου και είναι δυνατή η μεταβολή της εντός ευρέων ορίων. Στο σχήμα 1.4.5 δίνεται το διάγραμμα ενός τέτοιου συστήματος.



Σχήμα 1.4.5: Λειτουργία μεταβλητών στροφών – σταθερής συχνότητας.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.4.5, στην έξοδο της γεννήτριας συνδέεται ένας τριφασικός ανορθωτής ελεγχόμενος ή μη, που μετατρέπει τα εναλλασσόμενα ηλεκτρικά μεγέθη της ανεμογεννήτριας σε συνεχή. Η σύνδεση στο δίκτυο γίνεται μέσω ενός αντιστροφέα, ο οποίος μετατρέπει τα συνεχή ηλεκτρικά μεγέθη σε εναλλασσόμενα, συχνότητας ίδιας με αυτήν του δικτύου. Οι μετατροπείς αυτοί μπορούν να αποτελούνται είτε από θυρίστορ, είτε από ημιαγωγικά στοιχεία ελεγχόμενης έναυσης και σβέσης, όπως θυρίστορ με πύλη σβέσης (GTO, θυρίστορ) ή τρανζίστορ μονωμένης πύλης (IGBT). Αυτός ο τρόπος σύνδεσης αποσκοπεί κυρίως στην μεγιστοποίηση της ισχύος που απομαστεύεται από τον άνεμο, μεταβάλλοντας κατάλληλα την γωνιακή

ταχύτητα της ανεμογεννήτριας, μέσω του ηλεκτρονικού ελέγχου της διασύνδεσης ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ.

Ο βασικός λόγος που οδήγησε στην εισαγωγή της λειτουργίας μεταβλητών στροφών ήταν η βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης του συστήματος, η οποία είναι μειωμένη στη λειτουργία σταθερών στροφών. Στη λειτουργία μεταβλητών στροφών στόχος είναι η αλλαγή της ταχύτητας του δρομέα ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου, έτσι ώστε το σημείο λειτουργίας να βρίσκεται πάντοτε στην κορυφή των αντίστοιχων καμπυλών, ή διαφορετικά να βρίσκεται πάνω στην καμπύλη μέγιστης αποδιδόμενης ισχύς, όπως φαίνεται από το Σχήμα 1.4.4. Αυτό θα συμβαίνει όταν η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα μεταβάλλεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\lambda_{opt} = \frac{\text{ταχύτητα ακροπτερυγίου}}{\text{ταχύτητα ανέμου}} = \frac{\Omega_{WM} R}{U_w} \rightarrow \Omega_{WM} = \frac{\lambda_{opt}}{R} U_w \quad (1.4.6)$$

όπου  $\lambda$  ο λόγος ακροπτερυγίου (tip-speed ratio) και  $u_w$  η ταχύτητα του ανέμου.

Πρέπει πάντως να τονιστεί ότι η αύξηση της απόδοσης σε σχέση με τη λειτουργία σταθερών στροφών είναι πολύ μικρότερη της αναμενόμενης από τις στατικές καμπύλες ισχύος, διότι σε δυναμικές συνθήκες ο δρομέας, λόγω αδράνειας, μπορεί να παρακολουθεί μόνο τις αργές μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου και άρα βρίσκεται συνεχώς σε μη-βέλτιστη κατάσταση λειτουργίας. Σε πολύ υψηλές ταχύτητες ανέμου, όπου η αεροδυναμική ισχύς και η ροπή έχουν φτάσει τις ονομαστικές τους τιμές η ταχύτητα του δρομέα διατηρείται γενικά σταθερή στη μέγιστη τιμή της. Σε αυτή την περιοχή ο περιορισμός της ισχύος του δρομέα πραγματοποιείται είτε από το σύστημα μεταβολής της κλίσης των πτερυγίων είτε με εκμετάλλευση των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών τους.

Το βασικότερο ίσως πλεονέκτημα της λειτουργίας μεταβλητών στροφών είναι η εξομάλυνση της μεταβλητότητας των μηχανικών ροπών, η απόσβεση των συντονισμών του μηχανικού συστήματος μετάδοσης της κίνησης και ο περιορισμός των μέγιστων φορτίων (αιχμών της ροπής, π.χ. για



ριπές του ανέμου). Άμεση συνέπεια αυτών είναι ο περιορισμός των καταπονήσεων και άρα η αύξηση της αναμενόμενης διάρκειας ζωής των μηχανικών συνιστωσών και η δυνατότητα μείωσης του μεγέθους τους, με θετική επίπτωση στο βάρος και το κόστος της κατασκευής (περιορισμός του over-engineering της όλης κατασκευής).

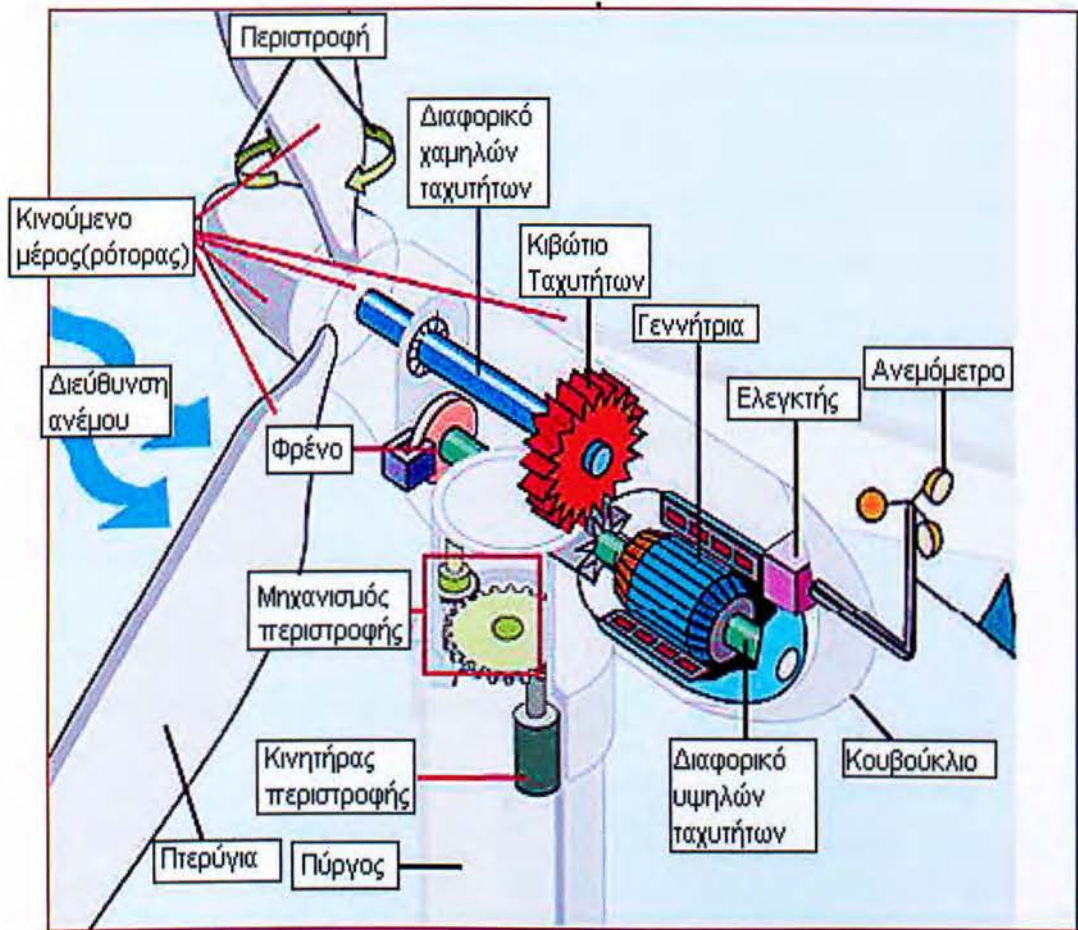
Επιτρέποντας στις στροφές της ανεμογεννήτριας να μεταβάλλονται, διακυμάνσεις της ισχύος από την πλευρά του ανέμου δεν εμφανίζονται κατευθείαν στην γεννήτρια, αφού τα στρεφόμενα μέρη του συστήματος λειτουργούν τώρα ως σφόνδυλος, ο οποίος αποθηκεύει ή δίνει ενέργεια, σε μια αύξηση ή μείωση της ταχύτητας του ανέμου. Έτσι, ως τελικό αποτέλεσμα, εκτός από τη μεγαλύτερη απομάστευση ισχύος από τον άνεμο, έχουμε καλύτερη ποιότητα ισχύος που προσδίδεται στο δίκτυο. Επίσης, ανάλογα με τον τύπο των χρησιμοποιούμενων μετατροπών ισχύος, σε ορισμένες περιπτώσεις είναι επίσης δυνατός ο έλεγχος και της άεργου ισχύος εξόδου, με λειτουργία της ανεμογεννήτριας υπό μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα είναι τα χαμηλότερα επίπεδα θορύβου λόγω λειτουργίας σε μειωμένες στροφές. Η χρήση των μετατροπών ισχύος παρέχει ακόμα τη δυνατότητα ηλεκτρικής πέδησης σχεδόν μέχρι μηδενικής ταχύτητας (ανάλογα με το είδος των μετατροπών) μειώνοντας τη φθορά των μηχανικών συστημάτων πέδησης, ενώ επίσης ο έλεγχος των υπερφορτίσεων της μηχανής είναι πολύ πιο αποτελεσματικός, αφού ελέγχεται άμεσα το ρεύμα και η ροπή της γεννήτριας. Η λειτουργία της ανεμογεννήτριας σε μειωμένη ταχύτητα έχει ως αποτέλεσμα και τη μείωση των απωλειών ισχύος του συστήματος μετάδοσης της κίνησης, η οποία όμως αντισταθμίζεται από τις απώλειες των μετατροπών ισχύος, σε ποσοστό που εξαρτάται από το είδος των χρησιμοποιούμενων μετατροπών. Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι ότι η λειτουργία με μεταβλητό αριθμό στροφών παρέχει τη δυνατότητα μείωσης της ισχύος εξόδου σε ώρες χαμηλού φορτίου. Αυτή η δυνατότητα είναι σημαντική, γιατί έτσι αποφεύγεται η αποσύνδεση της ανεμογεννήτριας από το δίκτυο. Να αναφέρουμε τέλος ότι στα ΜΣΣΣ είναι εύκολο να προσαρμοστούν συστήματα τηλεχειρισμού λόγω της δυνατότητας ενεργοποίησης (με ασύρματο ή ενσύρματο τρόπο) των υποσυστημάτων που σχετίζονται με την μεταβολή των

γωνιών έναυσης των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος. Συμπερασματικά, η λειτουργία μεταβλητών στροφών με τη χρήση κατάλληλων μετατροπών ισχύος περιορίζει τον μη-ελεγχόμενο χαρακτήρα της ανεμογεννήτριας ως πηγής ισχύος και καθιστά ευκολότερη την ενσωμάτωσή της στα υπάρχοντα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

Πέραν των πολλών πλεονεκτημάτων των ανεμογεννητριών με λειτουργία μεταβλητών στροφών υπάρχουν και αρκετά μειονεκτήματα. Το πρώτο μειονέκτημα σχετίζεται με την αυξημένη πολυπλοκότητα του συστήματος λόγω του μετατροπέα συχνότητας. Ταυτόχρονα, ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη διαμόρφωση του ηλεκτρικού μέρους, ενδεχομένως να χρησιμοποιείται σύγχρονη γεννήτρια ή μηχανή επαγωγής δακτυλιοφόρου δρομέα, αντί για την απλή γεννήτρια κλωβού, με αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους, του βάρους και των αναγκών συντήρησης. Εξαιτίας της ύπαρξης ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος υπάρχουν διακοπτικά φαινόμενα, τα οποία οδηγούν σε αύξηση των ανώτερων αρμονικών που εγχέονται στο δίκτυο. Συνεπώς είναι απαραίτητη η εγκατάσταση ογκωδών φίλτρων για τον περιορισμό των ανώτερων αρμονικών. Τα προβλήματα αυτά είναι ιδιαίτερα έντονα για τους συμβατικούς εξαπαλμικούς μετατροπείς γέφυρας, οι οποίοι χαρακτηρίζονται επιπλέον από την αυξημένη κατανάλωση έργου ισχύος. Με την χρήση μετατροπών ελεγχόμενων με τη μέθοδο PWM σε διακοπτικές συχνότητες της τάξης των λίγων kHz (που είναι εφικτές με τη χρήση MOSFETs) τα προβλήματα των αρμονικών περιορίζονται σημαντικά, αφού μεταφέρονται σε υψηλότερες συχνότητες απαιτώντας έτσι μικρότερα φίλτρα.

Τα πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα των συστημάτων μεταβλητών στροφών οδήγησαν στην καθιέρωσή τους. Για τους μετατροπείς με ηλεκτρονικά ισχύος μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα εναλλακτικά σχήματα, ανάλογα με τον τύπο της χρησιμοποιούμενης γεννήτριας [2].

## 1.5 Η δομή μιας ανεμογεννήτριας



Σχ.1.5.1 . Βασικά δομικά στοιχεία ανεμογεννήτριας.

Τα βασικά δομικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας που απεικονίζεται στο σχ.1.5.1 είναι τα εξής :

**1. Κουβούκλιο:** Το κουβούκλιο περιέχει όλα τα βασικά στοιχεία της ανεμογεννήτριας, συμπεριλαμβανομένου του κιβωτίου ταχυτήτων, και της ηλεκτρικής γεννήτριας. Πρόσβαση στο εσωτερικό της ανεμογεννήτριας επιτρέπεται μέσω του πύργου. Αριστερά από το κουβούκλιο φαίνονται στο Σχ.1.5.1 τα κινούμενα μέρη της ανεμογεννήτριας (τα πτερύγια και η κεφαλή).

**2. Πτερύγια:** Τα πτερύγια 'συλλαμβάνουν' τον αέρα και μεταφέρουν την ισχύ του στην κεφαλή του ρότορα. Σε μια μοντέρνα ανεμογεννήτρια 1000 kw κάθε πτερύγιο έχει μήκος 27 m και είναι σχεδιασμένο περίπου όπως ένα φτερό αεροπλάνου [3]. Για τη κατασκευή τους χρησιμοποιούνται ελαφρά κράματα μετάλλων, ενισχυμένος πολυεστέρας και ξύλο ποτισμένο με ειδικές ρητίνες. Η συνολική συμπεριφορά μιας πτερωτής βελτιώνετε χρησιμοποιώντας πτερωτές μεταβλητού βήματος. Η μεταβολή του βήματος (Pitch) οδηγεί στην περιστροφή του πτερυγίου γύρω από τον διαμήκη άξονα του, έτσι γίνεται η μεταβολή της γωνίας προσβολής του από τον άνεμο. Με την τεχνική αυτή διατηρείτε σταθερά η ταχύτητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας, η βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής απόδοσης των πτερυγίων, ο έλεγχος της παραγόμενης ισχύος και ο περιορισμός των δυνάμεων που καταπονούν τα πτερύγια [1].

**3. Κεφαλή:** Η κεφαλή του ρότορα είναι συνδεδεμένη με το διαφορικό χαμηλής ταχύτητας της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 1.5.2 Κουβούκλιο ανεμογεννήτριας

**4. Διαφορικό χαμηλών ταχυτήτων:** Το διαφορικό χαμηλών ταχυτήτων συνδέει την κεφαλή του ρότορα με το κιβώτιο ταχυτήτων. Σε ανεμογεννήτρια 1000 kW ο ρότορας περιστρέφεται σχετικά αργά, περίπου 19

με 30 περιστροφές ανά λεπτό (rpm). Το διαφορικό περιέχει σωλήνες για το υδραυλικό σύστημα ώστε να μπορεί να λειτουργήσει το αεροδυναμικό φρένο [3].

**5. Κιβώτιο ταχυτήτων:** Τα γρανάζια συνδέουν τον άξονα χαμηλής ταχύτητας με τον άξονα υψηλής ταχύτητας και αυξάνουν τις ταχύτητες περιστροφής από περίπου 30 έως 60 περιστροφές το λεπτό (rpm= περιστροφή ανά λεπτό) σε 1000 έως 1800 περιστροφές το λεπτό, που είναι η ταχύτητα περιστροφής που οι περισσότερες ανεμογεννήτριες απαιτούν ώστε να παραγάγουν ηλεκτρισμό. Το σύστημα κίνησης περιλαμβάνει επίσης υδραυλικό ή μηχανικό φρένο και ελαστικούς συνδέσμους απορρόφησης ταλαντώσεων. Το μηχανικό φρένο της ανεμογεννήτριας τοποθετείτε είτε στον άξονα υψηλής ταχύτητας περιστροφής οπότε απαιτείται μικρή σχετικά δύναμη ροπής πέδησης, αλλά δεν προστατεύεται η πτερωτή από απώλεια φορτίου ή θραύση του συστήματος μετάδοσης κίνησης, είτε στον άξονα χαμηλής ταχύτητας περιστροφής. Στην τελευταία περίπτωση λόγω της μεγάλης ροπής πέδησης απαιτείται φρένο αυξημένων διαστάσεων, βάρους και κόστους. Στην περίπτωση όμως αυτή προστατεύεται καλύτερα η πτερωτή και το κιβώτιο μετάδοσης, γι' αυτό και αποτελεί τη βέλτιστη τεχνικά λύση [1].

**6. Διαφορικό υψηλών ταχυτήτων:** Το διαφορικό υψηλών ταχυτήτων περιστρέφεται περίπου με 1500 στροφές ανά λεπτό (rpm) και οδηγεί την ηλεκτρική γεννήτρια. Το διαφορικό είναι εξοπλισμένο με ένα δισκόφρενο σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Το μηχανικό φρένο χρησιμοποιείται σε περίπτωση που το αεροδυναμικό φρένο υποστεί βλάβη ή η ανεμογεννήτρια επισκευάζεται [3].

**7. Ηλεκτρική γεννήτρια:** Ο μηχανισμός αυτός παράγει την ηλεκτρική ενέργεια όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί το κατώφλι για την έναρξη παραγωγής ισχύος [7]. Για την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιούνται κυρίως σύγχρονες και ασύγχρονες γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος και σπανίως ηλεκτρικές γεννήτριες

συνεχούς ρεύματος. Η απλότητα στην κατασκευή και η ευκολία με την οποία συνδέεται στο δίκτυο η ασύγχρονη γεννήτρια, είναι το πλεονέκτημα της. Όμως η ανάγκη να παίρνει ρεύμα μαγνήτισης από το δίκτυο δημιουργεί προβλήματα όταν η ισχύς της ανεμογεννήτριας είναι συγκρίσιμη με την ισχύ του ηλεκτρικού δικτύου [1]. Στις τελευταίες ανεμογεννήτριες η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς είναι μεταξύ 600 και 3000 kw.

**8. Μηχανισμός περιστροφής:** Ο μηχανισμός περιστροφής χρησιμοποιεί ηλεκτρικές μηχανές (κινητήρας περιστροφής) για να στρέφει το κουβούκλιο απέναντι στον άνεμο. Ο μηχανισμός περιστροφής ελέγχεται από ηλεκτρονικό ελεγκτή ο οποίος αντιλαμβάνεται τη διεύθυνση του ανέμου χρησιμοποιώντας τον ανεμοδείκτη.

**9. Ηλεκτρονικός ελεγκτής:** Περιέχει ένα υπολογιστή που παρακολουθεί διαρκώς την κατάσταση της ανεμογεννήτριας και ελέγχει τον μηχανισμό περιστροφής. Σε κάθε περίπτωση επιπλοκής, π.χ. υπερθέρμανση του κιβωτίου ταχυτήτων ή της γεννήτριας, σταματά αυτόματα την ανεμογεννήτρια και καλεί τον υπολογιστή του ελεγκτή της ανεμογεννήτριας μέσω μιας τηλεφωνικής σύνδεσης.

**10. Ανεμόμετρο & ανεμοδείκτης:** Το ανεμόμετρο και ο ανεμοδείκτης χρησιμοποιούνται για να μετρούν την ένταση και τη διεύθυνση του ανέμου. Τα ηλεκτρικά σήματα του ανεμόμετρου χρησιμοποιούνται από τον ηλεκτρονικό ελεγκτή της ανεμογεννήτριας για να αρχίσει την λειτουργία της όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει μια ελάχιστη τιμή. Ο υπολογιστής σταματά τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας αυτόματα αν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί ένα ανώτατο όριο προκειμένου να προστατεύσει την ανεμογεννήτρια και το περιβάλλον αυτής. Τα σήματα του ανεμοδείκτη χρησιμοποιούνται από τον ηλεκτρονικό ελεγκτή της ανεμογεννήτριας για να στρέφει αυτήν απέναντι στον άνεμο, μέσω του μηχανισμού περιστροφής.

**11. Πύργος:** Ο πύργος της ανεμογεννήτριας στηρίζει το κουβούκλιο και τα κινούμενα μέρη της. Γενικά είναι πλεονέκτημα ο πύργος να είναι ψηλός,

αφού οι ταχύτητες του ανέμου αυξάνονται όσο απομακρύνεται από το έδαφος. Μια σύγχρονη ανεμογεννήτρια 1000 kw θα έχει ένα πύργο μεταξύ 50 και 80 μέτρων (το ύψος ενός κτιρίου 17 έως 27 ορόφων) [3]. Αυτός που έχει επικρατήσει είναι ο σωληνωτός πύργος στήριξης, καθώς στο εσωτερικό του πύργου γίνεται στέγαση μερικών οργάνων της ανεμογεννήτριας και βέβαια εκεί υπάρχει μια εσωτερική σκάλα ή και ασανσέρ πρόσβασης στο κουβούκλιο όπου και βρίσκεται η καρδιά της μηχανής [1].

**12. Μονάδα ψύξης:** Η μονάδα ψύξης περιέχει ένα ηλεκτρικό ανεμιστήρα που χρησιμοποιείται για να ψύχει την ηλεκτρική γεννήτρια. Επιπλέον περιέχει μια μονάδα ψύξης με λάδι η οποία χρησιμοποιείται για να ψύχει το λάδι στο κιβώτιο ταχυτήτων. Μερικές ανεμογεννήτριες έχουν υδρόψυκτες γεννήτριες.

**13. Υδραυλικό σύστημα:** Το υδραυλικό σύστημα χρησιμοποιείται για να επαναφέρει τα αεροδυναμικά φρένα της ανεμογεννήτριας [3].

## **Μορφή πτερυγίων**

Τα πτερύγια σε μεγάλες ανεμογεννήτριες περιστρέφονται κατά μήκος του άξονά τους. Το πτερύγιο δέχεται τον άνεμο κατά μήκος του υπό διαφορετικές γωνίες. Η γωνία πρόσπτωσης αυξάνεται προς τη βάση του πτερυγίου. Οι πολύ μεγάλες γωνίες δεν έχουν το επιθυμητό αποτέλεσμα. Προκειμένου να υπάρχει ενιαία γωνία πρόσπτωσης κατά μήκος του πτερυγίου, το πτερύγιο έχει μορφή περιστροφική [3].

### **1.5.1 Ο μηχανισμός περιστροφής της ανεμογεννήτριας**

Ο μηχανισμός περιστροφής της ανεμογεννήτριας χρησιμοποιείται για να στρέφει το δρομέα της ανεμογεννήτριας απέναντι στον αέρα. Η ανεμογεννήτρια λέγεται ότι έχει σφάλμα περιστροφής, αν ο δρομέας δεν είναι

κάθετος στη διεύθυνση του ανέμου. Το σφάλμα περιστροφής συνεπάγεται ότι θα αξιοποιείται από την ανεμογεννήτρια μικρότερο μέρος της ενέργειας του ανέμου. Αν όμως αυτό ήταν το μόνο που συνέβαινε, τότε ο έλεγχος περιστροφής θα ήταν ένας εξαιρετικός τρόπος ελέγχου της ισχύος εισόδου στο ρότορα της ανεμογεννήτριας. Εκείνο το μέρος του ρότορα, όμως, που βρίσκεται πλησιέστερα στη διεύθυνση από την οποία φυσάει θα δέχεται μεγαλύτερη δύναμη απ' ό,τι το υπόλοιπο μέρος του ρότορα. Απ' τη μια αυτό συνεπάγεται ότι ο ρότορας θα έχει την τάση να στρέφεται απέναντι στον αέρα αυτόματα. Απ' την άλλη, σημαίνει ότι τα πτερύγια θα γέρνουν μπρος και πίσω σε μια ταλαντωτική κίνηση σε κάθε περιστροφή του ρότορα. Οι ανεμογεννήτριες που λειτουργούν με σφάλμα περιστροφής δέχονται μεγαλύτερα φορτία κόπωσης απ' ό,τι ανεμογεννήτριες που είναι στραμμένες σε μια διεύθυνση κάθετη στον αέρα [3].

### **Κιβώτια ταχυτήτων**

Η ενέργεια της περιστροφής του δρομέα της ανεμογεννήτριας μεταφέρεται στην γεννήτρια μέσω του άξονα χαμηλών ταχυτήτων, του κιβωτίου ταχυτήτων και του άξονα υψηλών ταχυτήτων. Στην περίπτωση που γινόταν χρήση μιας ηλεκτρικής τριφασικής γεννήτριας, απευθείας συνδεδεμένης με το τριφασικό δίκτυο η οποία είχε ένα, δύο, ή τρία ζεύγη πόλων, τότε η γεννήτρια αυτή θα έπρεπε να περιστρέφεται από 1000 ως 3000 στροφές ανά λεπτό. Αν υποθεθεί ότι ο ρότορας της ανεμογεννήτριας έχει διάμετρο 43 μέτρα τότε θα έπρεπε να περιστρέφεται με δυο φορές την ταχύτητα του ήχου. Ένα ακόμη ενδεχόμενο είναι να κατασκευαστεί μια αργόστροφη γεννήτρια με πολλά ζεύγη πόλων. Αν όμως η γεννήτρια αυτή συνδεόταν απευθείας με το δίκτυο, θα έπρεπε να έχει 100 ζεύγη πόλων για να φτάνει μια αξιοπρεπή ταχύτητα των 30 στροφών ανά λεπτό. Ένα ακόμα πρόβλημα είναι ότι η μάζα του ρότορα πρέπει να είναι ανάλογη στο μέγεθος της ροπής το οποίο δέχεται. Έτσι λοιπόν μια απευθείας οδηγούμενη γεννήτρια θα έπρεπε να είναι σε κάθε περίπτωση βαριά, γεγονός που σημαίνει υψηλό κόστος. Η πρακτική λύση είναι η χρήση ενός κιβωτίου ταχυτήτων.





Σχήμα 1.5.3 Κιβώτιο ταχυτήτων ανεμογεννήτριας κατά την κατασκευή του.

Το κιβώτιο ταχυτήτων σε μια ανεμογεννήτρια δεν «αλλάζει» ταχύτητες. Συνήθως έχει ένα λόγο ταχυτήτων ανάμεσα στην περιστροφή του δρομέα και της γεννήτριας. Για μια μηχανή 600 ή 750kW, ο λόγος ταχυτήτων είναι περίπου 1 προς 50 [3].

### Πύργοι στήριξης

Οι πύργοι των ανεμογεννητριών στηρίζουν το κουβούκλιο και τον ρότορα, μπορεί να είναι είτε χαλύβδινοι σωληνοειδείς πύργοι είτε δικτυωτοί πύργοι [3].

**Χαλύβδινοι σωληνοειδείς πύργοι:** Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες έχουν τέτοιου είδους πύργους, είναι κωνικοί, η διάμετρός τους δηλαδή αυξάνει προς τη βάση, προκειμένου να είναι ευσταθείς και να μειωθεί το χρησιμοποιούμενο υλικό [3].



Σχήμα 1.5.4 Ανεμογεννήτριες με χαλύβδινους σωληνοειδείς πύργους

**Δικτυωτοί πύργοι:** Οι πύργοι αυτοί κατασκευάζονται με χαλύβδινα δικτυώματα. Το βασικό πλεονέκτημά τους είναι το μειωμένο κόστος, αφού απαιτεί το μισό υλικό απ' ό,τι ο προηγούμενος. Το βασικό μειονέκτημά τους είναι η εμφάνισή τους. Για αισθητικούς λόγους οι πύργοι αυτοί έχουν εκλείψει [3].



Σχήμα 1.5.5 Ανεμογεννήτρια με δικτυωτό πύργο

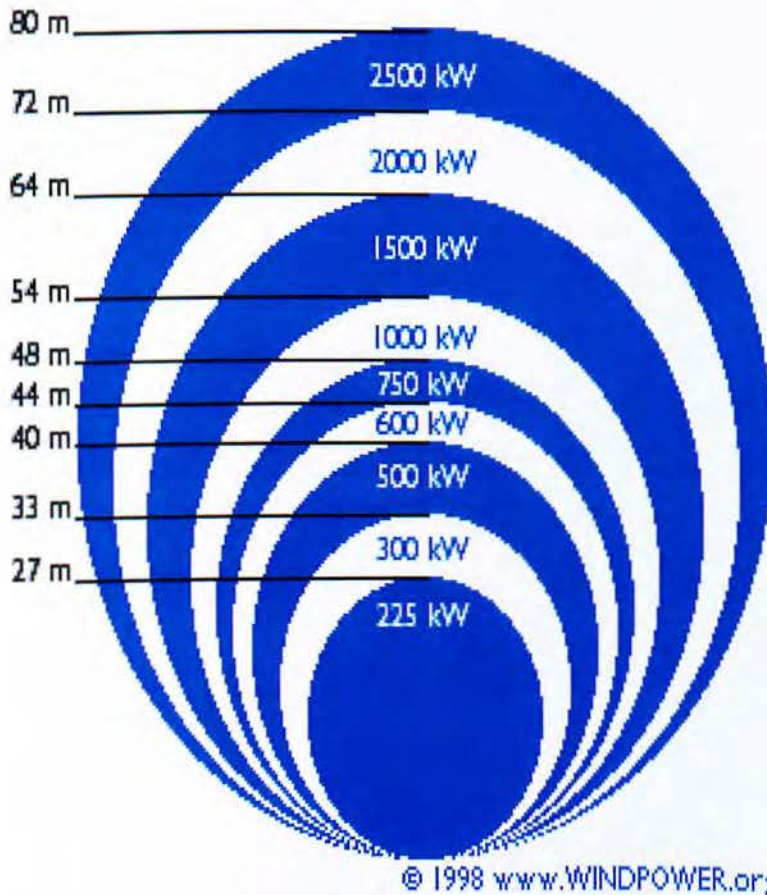
## Το μέγεθος των ανεμογεννητριών

Η ισχύς εξόδου αυξάνεται όσο αυξάνει η επιφάνεια που καλύπτει ο δρομέας της ανεμογεννήτριας.

Όταν ένας αγρότης αναφέρεται στην έκταση που καλλιεργεί, θα περιγράψει την έκταση που καλλιεργεί σε τετραγωνικά μέτρα, σε στρέμματα. Με μια ανεμογεννήτρια είναι περίπου το ίδιο, μόνο που στην καλλιέργεια η επιφάνεια αναφέρεται σε οριζόντιο επίπεδο ενώ στην Α/Γ σε κάθετο.

Η επιφάνεια του δίσκου που καλύπτει ο ρότορας, καθώς και η ταχύτητα του ανέμου, φυσικά, καθορίζει την ενέργεια που παράγει η ανεμογεννήτρια.

Το παρακάτω σχήμα 1.5.6 δίνει μια εικόνα των συνήθων μεγεθών των ανεμογεννητριών: Μια τυπική ανεμογεννήτρια 600kW θα έχει διάμετρο ρότορα 44m. Αν διπλασιαστεί η διάμετρος του ρότορα, τετραπλασιάζεται η επιφάνεια που καλύπτει. Αυτό σημαίνει ότι τετραπλασιάζεται και η ισχύς εξόδου.



Σχήμα 1.5.6

Η διάμετρος του ρότορα μπορεί να διαφέρει λίγο από τα μεγέθη που δίνονται στο σχήμα, γιατί αρκετοί κατασκευαστές προσαρμόζουν τις μηχανές τους στις αιολικές συνθήκες κάθε περιοχής: Μια μεγάλη ανεμογεννήτρια, απαιτεί περισσότερη ισχύ (ισχυρότερους ανέμους) για να περιστραφεί. Αν λοιπόν εγκατασταθεί μια ανεμογεννήτρια σε μια περιοχή με χαμηλό αιολικό δυναμικό θα μεγιστοποιηθεί η ετήσια ενεργειακή παραγωγή αν για δεδομένο μέγεθος του ρότορα χρησιμοποιηθεί μια μικρότερη γεννήτρια (ή αντίστροφα για δεδομένη ισχύ γεννήτριας χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερος δρομέας). Για μηχανή 600 kW το μέγεθος του ρότορα μπορεί να κυμαίνεται από 39m ως 48m. Ο λόγος για τον οποίο θα αυξηθεί η παραγωγή ενέργειας από μια σχετικά μικρότερη μηχανή σε περιοχές με χαμηλό αιολικό δυναμικό είναι ότι η ανεμογεννήτρια θα δουλεύει για περισσότερες ώρες κατά τη διάρκεια του χρόνου [3].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### **Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου Ανεμογεννητριών**

Κάθε αυτόματος έλεγχος γίνεται από έναν μικροεπεξεργαστή, ο οποίος έχει την δυνατότητα να ρυθμίζει την ανεμογεννήτρια όταν αυτή λειτουργεί σε κανονικές συνθήκες αλλά και σε συνθήκες κινδύνου όπου ενεργοποιείτε, όταν αναγνωριστεί ένα σφάλμα, εκτελώντας όλες τις σχετικές λειτουργίες ασφαλείας με ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα. Ο έλεγχος περιστροφής λειτουργεί σε όλες τις ταχύτητες ανέμου, που είναι μεγαλύτερες από την ταχύτητα (άνεμου) έναρξης λειτουργίας. Η διεύθυνση του ανέμου μετρείται με τον ανεμοδείκτη, που είναι τοποθετημένος στο ύψος της πλήμνης. Η άτρακτος περιστρέφεται από τους δύο ηλεκτροκινητήρες προσανεμισμού.

- **Αυτόματη Έναρξη Λειτουργίας**

Σε διαστήματα τριών λεπτών γίνεται μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου, εάν η τιμή της είναι κάτω από τα όρια ο αισθητήρας του συστήματος ελέγχου δεν δείχνει κάποιο σφάλμα στα εξαρτήματα και έτσι μπορεί να αρχίσει η αυτόματη διαδικασία έναρξης λειτουργίας. Η παράγωγή της ανεμογεννήτριας ξεκινά αυτόματα από την στιγμή όπου η ταχύτητα του ανέμου θα έχει φτάσει στην χαμηλότερη τιμή του εύρους.

- **Μείωση - Απόρριψη ισχύος**

Η μείωση ή η απόρριψη παραγωγής από την γεννήτρια, υλοποιείται με την ρύθμιση της γωνίας προσβολής των πτερυγίων, μέσω του συστήματος αυτόματου ελέγχου και ρυθμίσεως.

- **Ανιχνευτής Ταλάντωσης**

Ο ανιχνευτής ταλάντωσης αναγνωρίζει μεγάλες ταλαντώσεις της ατράκτου και ενεργοποιεί τη διαδικασία άμεσης παύσης λειτουργίας με γρήγορη ρύθμιση της γωνίας των πτερυγίων [1].

## **2.1 Pitch control (Αυτόματος έλεγχος μεταβολής της κλίσης των πτερυγίων)**

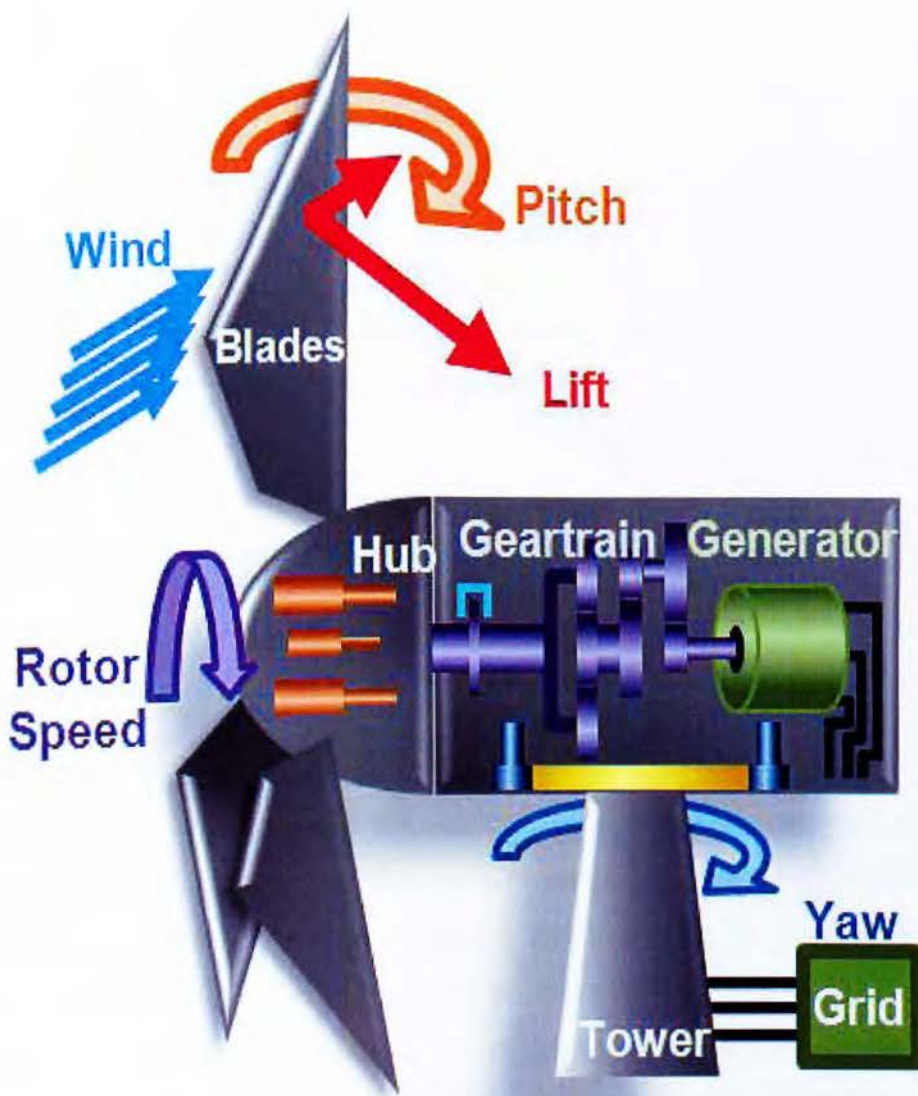
Σε περίπτωση ισχυρών ανέμων είναι απαραίτητο μέρος της επιπλέον ενεργείας του ανέμου να «θυσιάσετε» προκειμένου να προφυλαχτεί ο εξοπλισμός της ανεμογεννήτριας.

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

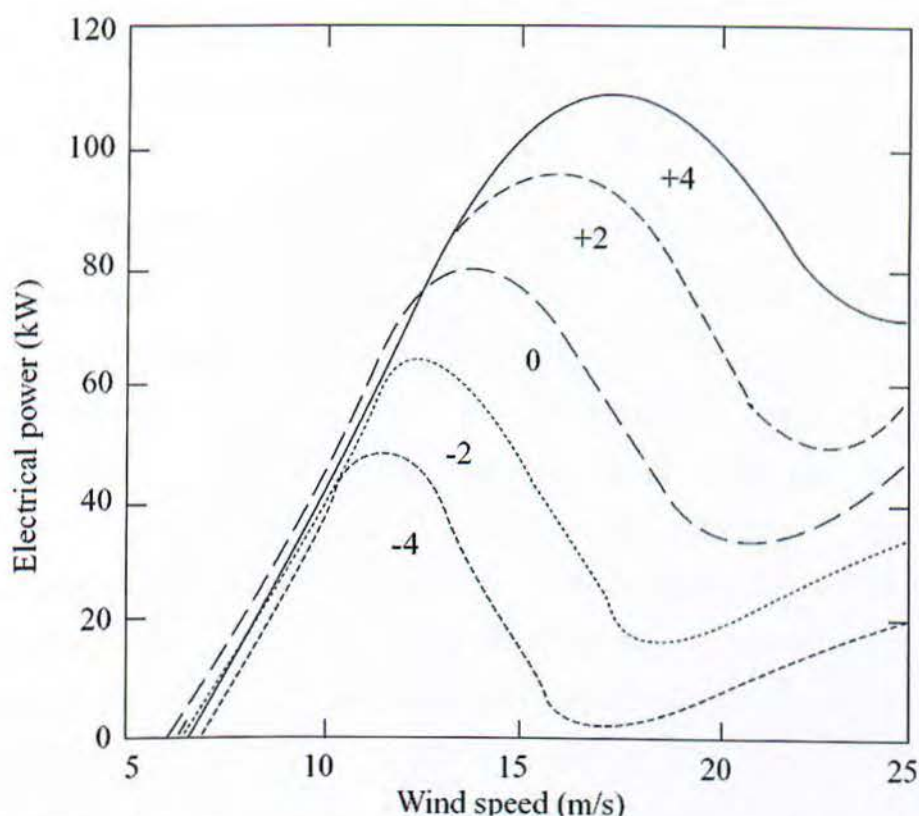
Στις ανεμογεννήτριες με ελεγχόμενο βήμα έλικα, ο ηλεκτρονικός ελεγκτής ελέγχει την έξοδο τους αρκετές φορές το δευτερόλεπτο. Όταν η έξοδος γίνει αρκετά μεγάλη, στέλνει εντολή στο μηχανισμό περιστροφής του πτερυγίου ο οποίος αμέσως στρέφει τα πτερύγια προς τον αέρα. Γι' αυτό τα πτερύγια πρέπει να είναι σε θέση να περιστρέφονται κατά μήκος του άξονα τους. Κατά τη διάρκεια κανονικής λειτουργίας τα πτερύγια θα στρέφονται με μια γωνία μιας μοίρας τη φορά ενώ ταυτόχρονα θα στρέφεται και ο δρομέας. Ο σχεδιασμός τέτοιου είδους ανεμογεννητριών απαιτεί έξυπνη μηχανική ώστε τα πτερύγια να στρέφονται ακριβώς στην απαιτούμενη γωνία. Ο έλεγχος αυτός κάθε φορά που αλλάζει διεύθυνση ο αέρας στρέφει τα πτερύγια μερικές μοίρες ώστε να διατηρεί τη γωνία πρόσπτωσης ιδανική για να μεγιστοποιεί την έξοδο.

Μια παράμετρος που επηρεάζει την έξοδο ισχύος είναι η γωνία της μεταβολής της κλίσης των πτερυγίων (*pitch angle*). Ο σχεδιασμός των πτερυγίων σχεδόν πάντοτε είναι σπειροειδής, αλλά τα πτερύγια μπορούν να τοποθετηθούν σε πλήρη *pitch* γωνία. Μικρές μεταβολές στην *pitch* γωνία

μπορεί να έχουν δραματικές επιπτώσεις στην έξοδο ισχύος. Θετική ρύθμιση της *pitch* γωνίας αυξάνει την *pitch* γωνία σχεδιασμού και έτσι ελαττώνει τη γωνία επίπτωσης. Αντίθετα, αρνητική ρύθμιση της *pitch* γωνίας αυξάνει τη γωνία επίπτωσης και μπορεί να προκαλέσει καθυστέρηση. Ο δρομέας μιας ανεμογεννήτριας που έχει σχεδιαστεί για λειτουργία σε δεδομένες συνθήκες ανέμου, μπορεί να γίνει κατάλληλος για άλλες συνθήκες με κατάλληλες προσαρμογές στην *pitch* γωνία και στην ταχύτητα περιστροφής [1].



Σχήμα 2.1.1 .Εικονική περιγραφή λειτουργίας του συστήματος Pitch.



Σχήμα 2.1.2. Επίδραση της ρύθμισης της γωνίας μεταβολής της κλίσης των πτερυγίων στην εξαγόμενη ισχύ .

Η ρύθμιση ισχύος μπορεί να επιτευχθεί με δυο τρόπους :

### 1. Pitching to feather – Passive stall (παθητική επιβράδυνση).

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



«φτερό» (feather), μείωση της γωνίας πρόσπτωσης, μείωση της ροπής άρα και μείωση της δύναμης ανύψωσης στα πτερύγια.

## 2. Pitching to stall - Active stall (ενεργός επιβράδυνση).

Προκειμένου να επιτύχουν μια αρκετά μεγάλη ροπή (περιστροφική δύναμη) σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, οι μηχανές συχνά θα προγραμματίζονται να περιστρέφουν τα πτερύγια τους όπως μια ανεμογεννήτρια με ελεγχόμενο βήμα έλικα σε χαμηλές ταχύτητες. Αν όμως η μηχανή τείνει να υπερφορτωθεί, η μηχανή με ελεγχόμενη ενεργητική καθυστέρηση θα στρέψει τα πτερύγια της σε αντίστροφη διεύθυνση από ότι μια μηχανή με ελεγχόμενο βήμα έλικα. Με άλλα λόγια, θα αυξήσει τη γωνία πρόσπτωσης του ανέμου στα πτερύγια προκειμένου τα πτερύγια να επιβραδυνθούν, κατ' αυτόν τον τρόπο σπαταλά την επιπλέον ενέργεια του ανέμου. Συνεπώς, μια μείωση στο *pitch*, π.χ. γυρίζοντας την κύρια λεπίδα κόντρα στον άνεμο, ελαττώνει τη ροπή μέσω της αύξησης της γωνίας πρόσπτωσης προσεγγίζοντας την επιβράδυνση, όπου ξεκινάει να ελαττώνεται η ανύψωση και το σύρσιμο αυξάνεται.

Παρόλο που το *Pitching to feather* είναι πιο συνηθισμένη μέθοδος, κάποιες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν *pitching to stall*.

- Το *Pitching to feather* απαιτεί πολύ περισσότερη δυναμική δραστηριότητα μεταβολής της κλίσης από το *pitching to stall* ενώ ένα μεγάλο μέρος των πτερυγίων επιβραδύνεται, πολύ μικρές κινήσεις μεταβολής της κλίσης επαρκούν για να ελεγχθεί η ροπή.

- Το *pitching to stall* επιφέρει μια σημαντικά μεγαλύτερη ώθηση φορτίου εξαιτίας του αυξανόμενου συρσίματος. Από την άλλη, η ώθηση είναι πολύ πιο σταθερή όταν τα πτερύγια επιβραδύνονται, συνεπώς τα καταχρηστικά φορτία της ώθησης θα είναι μικρότερα. Ένα επιπλέον πρόβλημα με το *pitching to stall* είναι ότι η κλίση της καμπύλης ανύψωσης στην αρχή της περιοχής επιβράδυνσης είναι αρνητική, έτσι ο συντελεστής ανύψωσης μειώνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης. Αυτό επιδρά στην αρνητική αεροδυναμική απόσβεση, που μπορεί να επιδράσει στην

αστάθεια των στρεφόμενων πτερυγίων. Αυτό είναι επίσης πρόβλημα για τις ανεμογεννήτριες που ελέγχεται η επιβράδυνση τους με ρυθμισμένο *pitch*.

Χαμηλότερα από τη ρύθμιση της ταχύτητας του ανέμου, η ανεμογεννήτρια απλά θα προσπαθεί να παράγει όση περισσότερη ισχύ είναι δυνατό, συνεπώς γενικά δεν υπάρχει ανάγκη να μεταβάλλεται η γωνία μεταβολής κλίσης. Τα αεροδυναμικά φορτία, χαμηλότερα από τη ρύθμιση της ταχύτητας του ανέμου, είναι γενικά χαμηλότερα σε σχέση με πριν τη ρύθμιση, οπότε πάλι δεν υπάρχει λόγος να χρησιμοποιηθεί το *pitch control*.

Εντούτοις, για ρυθμισμένης ταχύτητας ανεμογεννήτριες, η επιθυμητή γωνία κλίσης για αεροδυναμική αποδοτικότητα ποικίλλει ελαφρά με την ταχύτητα του ανέμου. Συνεπώς, σε μερικές ανεμογεννήτριες, η γωνία μεταβολής της κλίσης μεταβάλλεται αργά κάποιες μοίρες κάτω από τη ρυθμισμένη, σαν απάντηση σε «βαρύ» ανεμόμετρο ή σήμα εξόδου ισχύος.

Πάνω από τη ρυθμισμένη ταχύτητα του ανέμου, το *pitch control* προμηθεύει ένα πολύ αποτελεσματικό μέσο ρύθμισης της αεροδυναμικής ισχύος και των φορτίων που παράγονται από το δρομέα, έτσι που δεν υπάρχουν όρια στο σχεδιασμό. Για να πετύχουμε καλή ρύθμιση, το *pitch control* πρέπει να αποκρίνεται πολύ γρήγορα στις μεταβαλλόμενες συνθήκες.

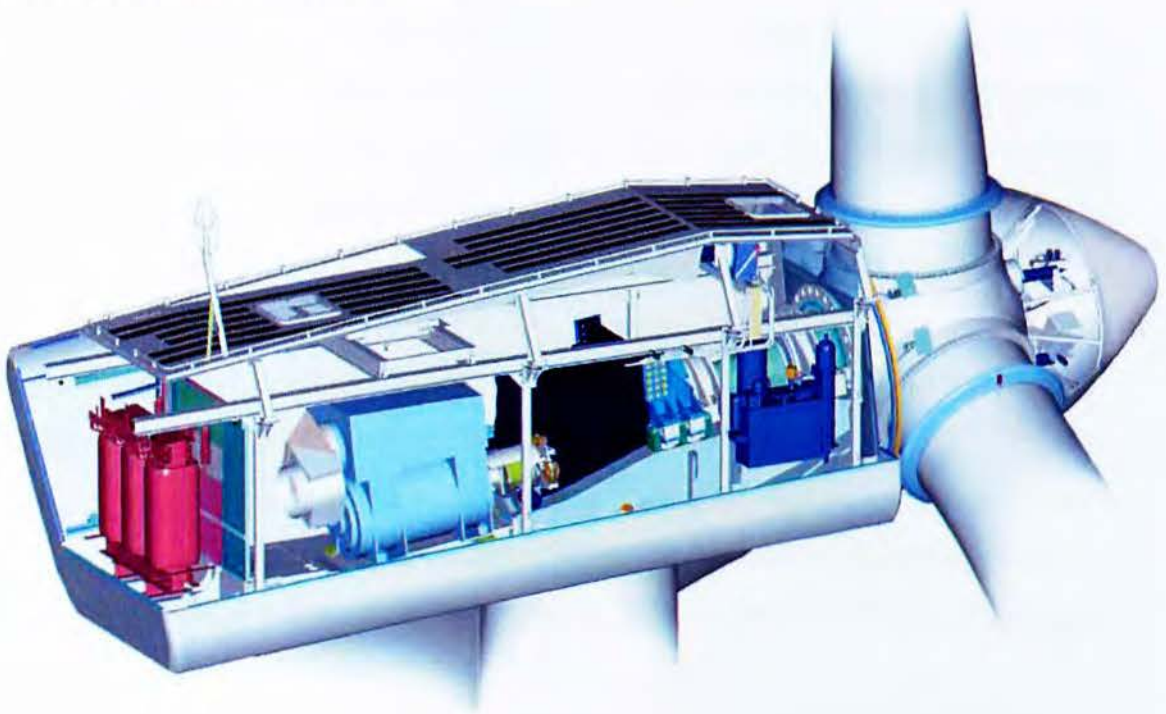
Αυτή η εφαρμογή υψηλού ενεργού ελέγχου απαιτεί πολύ προσεκτικό σχεδιασμό καθώς έχει ισχυρή αλληλεπίδραση με τη δυναμική απόκριση της ανεμογεννήτριας.

Μια από τις πιο ισχυρές αλληλεπιδράσεις είναι με τη δυναμική συμπεριφορά του πύργου. Καθώς μεταβάλλεται η κλίση των πτερυγίων για τη ρύθμιση της αεροδυναμικής ροπής, η αεροδυναμική ώθηση στο δρομέα μεταβάλλεται σημαντικά, και αυτό τροφοδοτεί παλμό στον πύργο. Καθώς ο άνεμος αυξάνει, η γωνία μεταβολής της κλίσης αυξάνει για να διατηρήσει σταθερή τη ροπή, αλλά ο δρομέας τείνει να τη μειώσει. Αυτό επιτρέπει στην απόκλιση του πύργου που είναι κόντρα στον άνεμο να μειωθεί και καθώς η κορυφή του πύργου μετακινείται ευνοϊκά στον άνεμο η σχετική ταχύτητα του ανέμου που φαίνεται από το δρομέα αυξάνεται. Η αεροδυναμική ροπή αυξάνεται περισσότερο, προκαλώντας περισσότερη μεταβολή στην κλίση των πτερυγίων. Αν το κέρδος του *pitch controller* είναι τόσο υψηλό, αυτή η θετική ανάδραση μπορεί να προκαλέσει αστάθεια. Έτσι είναι καθοριστικό να

λάβουμε υπόψη τη δυναμική συμπεριφορά του πύργου κατά το σχεδιασμό ενός *pitch controller*. Οι περισσότερες από τις ανεμογεννήτριες που ελέγχονται με *pitch controller* χρησιμοποιούν *pitch control* πλήρους ανοίγματος, στο οποίο ο προσανατολισμός του *pitch* είναι προς το κέντρο.

Είναι επίσης δυνατό, αν και όχι συνηθισμένο, να πετύχουμε αεροδυναμικό έλεγχο κάνοντας *pitching* μόνο στα άκρα των πτερυγίων, ή με χρήση *ailerons*, *flaps*, *air jets* ή άλλες συσκευές που να τροποποιούν τις αεροδυναμικές ιδιότητες. Αυτές οι μέθοδοι έχουν ως αποτέλεσμα τα περισσότερα από τα πτερύγια να επιβραδύνονται σε υψηλούς ανέμους [1].

## 2.2 VESTAS V90 ( 2Mw )



### Βασικά χαρακτηριστικά.

1. Η ανεμογεννήτρια V90 (2MW) χρησιμοποιεί την τεχνική μεταβλητού βήματος αντίθετη στον άνεμο, με σύστημα αυτοματισμού για το προσανατολισμό του ρότορα στη διεύθυνση πνοής του ανέμου και ο ρότορας έχει τρία φτερά.

2. Η διάμετρος του ρότορα είναι 90 μέτρα και λειτουργεί χρησιμοποιώντας το σύστημα OptiSpeed™. Αυτό το χαρακτηριστικό γνώρισμα επιτρέπει στο ρότορα να λειτουργεί με μεταβλητή ταχύτητα (rpm).

3. Είναι εξοπλισμένη με το ειδικό σύστημα της YE5TA5 OptiTip®, το οποίο ρυθμίζει το βήμα των φτερών. Με το OptiTip®, η γωνία των φτερών είναι συνεχώς ρυθμισμένη έτσι ώστε τα φτερά να βρίσκονται πάντα στη βέλτιστη γωνία σε σχέση με τον αέρα. Αυτό βελτιστοποιεί την παραγωγή ισχύος και τα επίπεδα θορύβου.

4. Ο κύριος άξονας (main shaft) μεταβιβάζει την ενέργεια στη γεννήτρια μέσω του κιβωτίου ταχυτήτων. Το κιβώτιο ταχυτήτων είναι ένα συνδυασμένο πλανητικό και ελικοειδές κιβώτιο ταχυτήτων. Από το κιβώτιο ταχυτήτων η ενέργεια μεταβιβάζεται στη γεννήτρια μέσω ενός συνδέσμου (composite) φτιαγμένο από συνθετικά υλικά.

5. Η γεννήτρια είναι μια ειδική ασύγχρονη γεννήτρια 4-πόλων. Στις υψηλές ταχύτητες αέρα το OptiSpeed™ και το ρυθμιζόμενο σύστημα του βήματος OptiTip® των φτερών κρατούν την ισχύ στο ονομαστικό, ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία και την πυκνότητα του αέρα. Στις χαμηλότερες ταχύτητες αέρα το σύστημα OptiTip® και το OptiSpeed™ βελτιστοποιούν την παραγωγή ισχύος με την επιλογή των βέλτιστων στροφών και της γωνίας του βήματος των φτερών.

6. Ένα υδραυλικό σύστημα δισκοφρένου είναι τοποθετημένο στον άξονα της υψηλής ταχύτητας του κιβωτίου ταχυτήτων.

7. Όλες οι λειτουργίες της ανεμογεννήτριας επιτηρούνται και ελέγχονται από διάφορες μονάδες ελέγχου βασισμένες σε μικροεπεξεργαστές. Αυτό το σύστημα ελέγχου τοποθετείται στη nacelle. Οι αλλαγές στο βήμα του φτερού πραγματοποιείτε από ένα

8. υδραυλικό σύστημα, το οποίο επιτρέπει στα φτερά να περιστραφούν κατά 95°. Αυτό το σύστημα (υδραυλικό) παρέχει επίσης την πίεση για το σύστημα φρένων.

9. Δύο ηλεκτρικά συγκροτήματα γριναζιών (yaw gear) περιστρέφονται ταυτόχρονα σε ένα μεγάλο οδοντωτό δαχτυλίδι (yaw ring) το οποίο είναι τοποθετημένο στην κορυφή του πύργου με αποτέλεσμα να περιστρέφεται η άτρακτος.

10. Το κέλυφος της ατράκτου (nacelle) είναι φτιαγμένο από ενισχυμένο fiber glass το οποίο προστατεύει όλα τα συστατικά στη nacelle από τη βροχή, χιόνι, σκόνη, κ.λ.π. Η πρόσβαση στη nacelle γίνεται από τον πύργο μέσω ενός κεντρικού ανοίγματος.

11. Μέσα στη nacelle υπάρχει ένας γερανός ανυψωτικής δύναμης 250 κλ

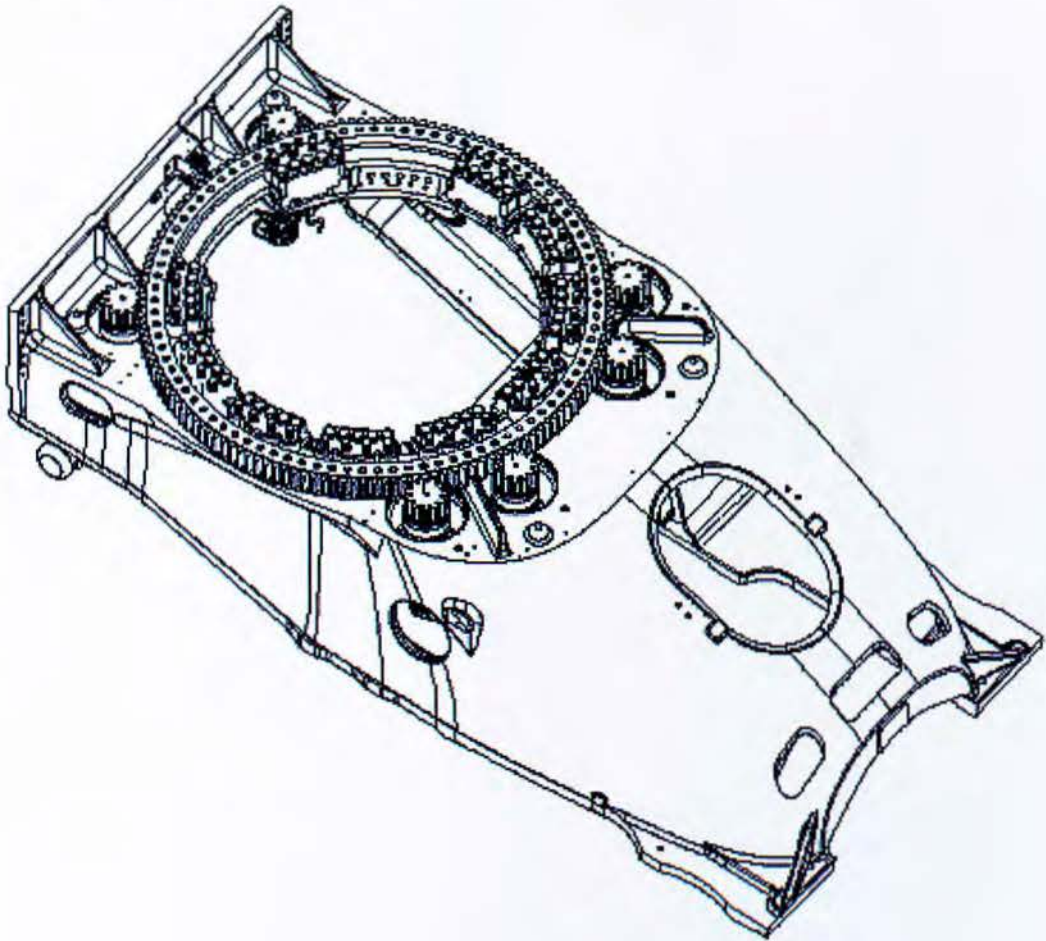
12. . Ο πύργος είναι σωληνοειδής, από χάλυβα, χρωματισμένος [1].

## 2.2.1 Συστήματα ελέγχου της ανεμογεννήτριας τεχνολογίας VESTAS V90(2Mw).

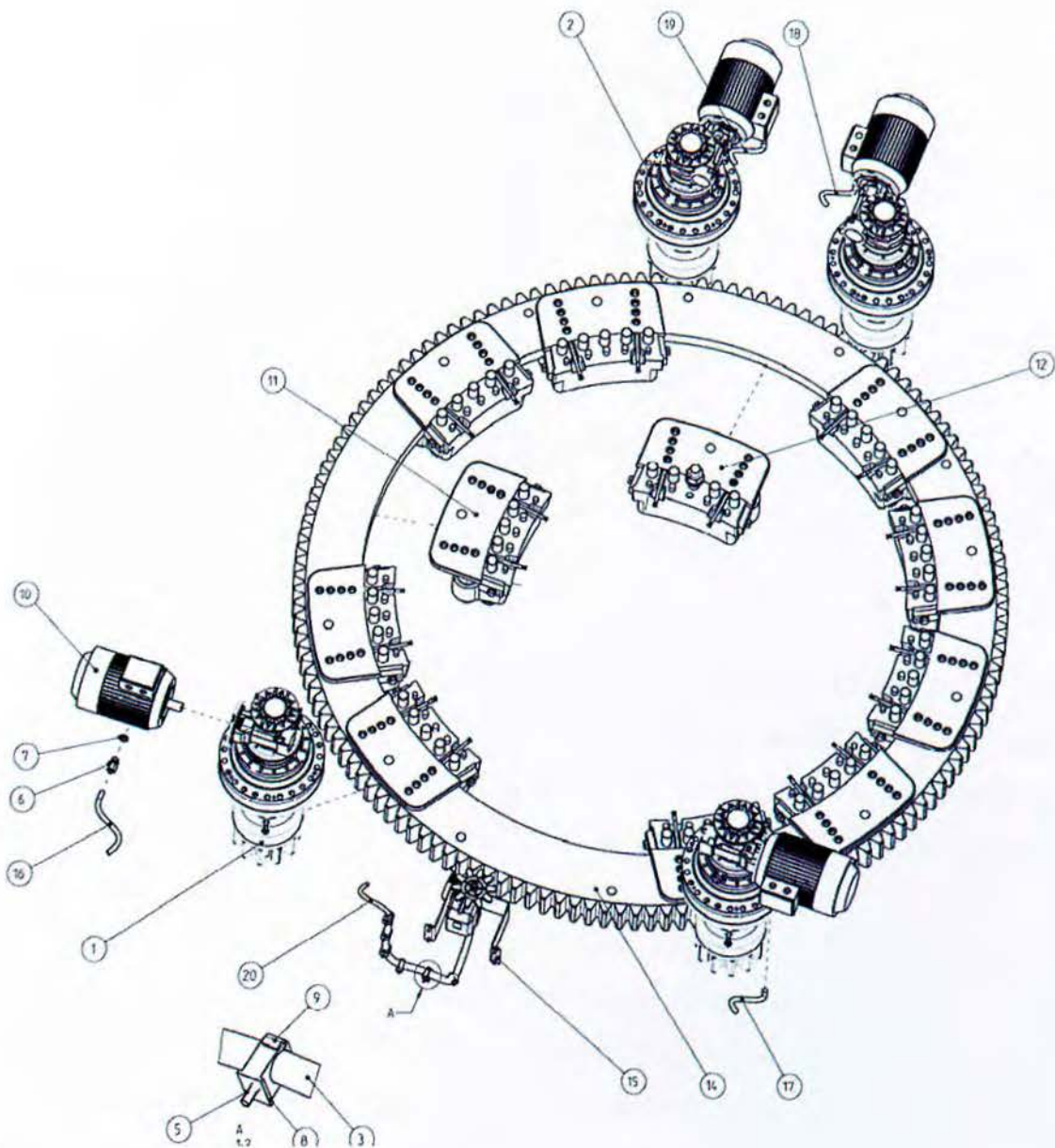
### Σύστημα προσανατολισμού (yaw system).

Το yaw system έχει τρεις λειτουργίες :

1. Κρατά το ατρακτίδιο της ανεμογεννήτριας σε θέση πάνω από τον πύργο.
2. Επιτρέπει στο ατρακτίδιο της ανεμογεννήτριας να περιστραφεί στον πύργο.
3. Διαβιβάζει τις δυνάμεις από το στρόβιλο στον πύργο.

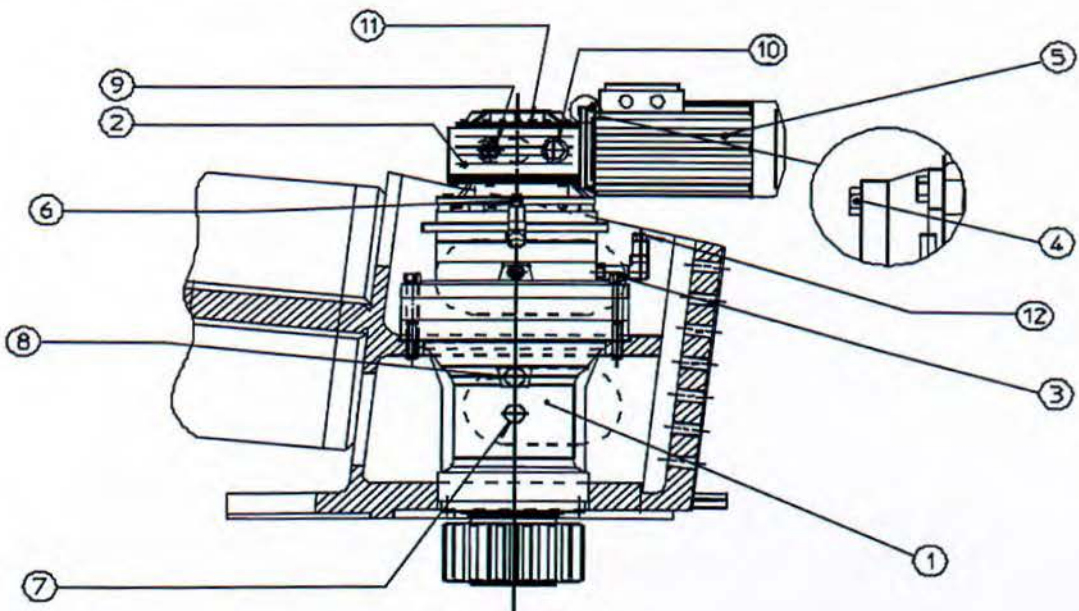


Σχήμα 2.2.1 Σύστημα Προσανατολισμού.



- |                         |                          |
|-------------------------|--------------------------|
| 1. Yaw gear, right      | 2. Yaw gear. Left        |
| 3. 1.5 m FLEX HOSE      | 4. Grease shell stamina  |
| 5. HEX.SOC.H.SCR.M      | 6. Fitting Polyamid      |
| 7. LOCKNUT POLYAMID     | 8. HOLDER                |
| 9. CAP FOR HOSE CLAMP   | 10. MOT. M2ARS100LC-6    |
| 11. YAW BEAM            | 12. YAW BEAM CENTER      |
| 13. ACCESSOR YAW MODULE | 14. YAW TOP V80 MACHINED |
| 15. YAW CONTROL MOUNTED | 16. CABLE                |
| 17. CABLE               | 18. CABLE                |
| 19. CABLE               | 20. CABLE                |

Η άτρακτος (nacelle) τοποθετείται πάνω σε μια πλάκα σαν δαχτυλίδι η οποία σφίγγεται στον πύργο.



Σχήμα 2.2.2

Τα yaw gear χρησιμοποιούνται για τον αυτόματο προσανατολισμό της άτρακτου στον άνεμο τα οποία και συγκρατούν την άτρακτο με τα ηλεκτρικά φρένα που έχουν οι ηλεκτροκινητήρες έτσι ώστε να μην περιστραφεί η άτρακτος. Οι ηλεκτροκινητήρες είναι ασύγχρονοι, οδηγούνται από δύο ρελλέ και το καθένα έχει και από ένα βοηθητικό ρελλέ.

Το ένα ρελλέ είναι για δεξιά παρέκκλιση και το άλλο για αριστερά. Ο κάθε ηλεκτροκινητήρας προστατεύεται από ένα θερμικό και είναι εξοπλισμένος με φρένο. Ο ελεγκτής παίρνει τις πληροφορίες της διεύθυνσης του ανέμου από το ανεμόμετρο και δίνει την εντολή στους ηλεκτροκινητήρες μέσω του βοηθητικού ρελλέ. Ο αυτόματος προσανατολισμός απενεργοποιείται όταν η ταχύτητα του αέρα είναι μικρότερη από 2,5 m/sec [1].

### **Αισθητήρας μέτρησης διεύθυνσης και ταχύτητας αέρα.**

Στην V90 χρησιμοποιείται ένας συνδυασμένος αισθητήρας αέρα που μετρά την ταχύτητα και την διεύθυνση του αέρα. Η διεύθυνση του αέρα είναι μέτρο σχετικό με τη θέση της nacelle.



Ο αισθητήρας είναι χωρίς κινούμενα μέρη και η μέτρηση είναι βασισμένη στις υπερηχητικές αρχές.

Το Ultrasonic Anemometer 2D έχει ως σκοπό να μετρήσει την διεύθυνση και την ταχύτητα του αέρα σε δύο διαστάσεις. Έχει την ικανότητα να παίρνει τιμές πάρα πολύ γρήγορα με αποτέλεσμα να μπορεί να μετράει και τα κάστ.

Το ανεμόμετρο αυτό είναι εξοπλισμένο με μια αντίσταση θέρμανσης έτσι ώστε το όργανο να μην επηρεάζεται από έντονα καιρικά φαινόμενα όπως χιόνια, πάγος και έντονη βροχή.

### **Τρόπος λειτουργίας :**

Το ανεμόμετρο αποτελείται από 4 υπερηχητικούς μετασχηματιστές ανά 2 ζευγάρια οι οποίοι ο ένας είναι απέναντι από τον άλλο σε μια απόσταση 200 χιλιοστών. Έτσι διαμορφώνονται δύο πορείες μέτρησης κάθετες μεταξύ τους. Οι μετασχηματιστές ενεργούν και οι δύο ανά ζευγάρι σαν ακουστικές συσκευές αλλά και σαν ακουστικοί δέκτες. Οι αντίστοιχες πορείες μέτρησης και η κατεύθυνση μέτρησης τους επιλέγονται μέσω του ηλεκτρονικού ελέγχου. Όταν ξεκινάει η μέτρηση πραγματοποιείται μια ακολουθία μετρήσεων μέσα σε 20 msec σε 20 °C. Η ακολουθία αυτή αποτελείται από 8 μεμονωμένες μετρήσεις και στις 4 κατευθύνσεις οι οποίες περιστρέφονται δεξιόστροφα.

- A) Από τη δύση στην Ανατολή.
- B) Από τον Βορρά στο Νότο και
- D) Από την Ανατολή στη Δύση.



### 2.2.3 FT Wind Sensor

Το FT702LT είναι ένας στερεάς κατάστασης μετεωρολογικός αισθητήρας, ο οποίος χρησιμοποιεί την κατοχυρωμένη με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας ακουστική τεχνική αντίληψης ροών αέρος αντήχησης για να μετρηθεί ακριβώς και η ταχύτητα ανέμου και η κατεύθυνση.

Το FT702LT έχει σχεδιαστεί συγκεκριμένα για τις εφαρμογές ελέγχου ανεμογεννητριών. Δεν χρειάζεται καμία κανονική συντήρηση, και είναι ικανός να λειτουργήσει σε δύσκολες συνθήκες περιβάλλοντος όπως στις παράκτιες και επιρρεπείς στον πάγο περιοχές, το FT702LT παρέχει τους κατασκευαστές ανεμογεννητριών και τους χειριστές με μια τέτοια εγκατάσταση να ξεχνούν τα προβλήματα που αφορούν την αντίληψη του αέρα.

Χωρίς τα κινούμενα μέρη που υποβιβάζουν την λειτουργία, μειώνονται οι δαπανηρές επισκέψεις για συντήρηση καθώς και ο χρόνος διακοπής της λειτουργίας των ανεμογεννητριών. Το FT702LT έχει εγκαθιστάμενο ένα ιδιαίτερα αποτελεσματικό θερμοστατικά ελεγχόμενο full-body σύστημα θέρμανσης. Μια θερμάστρα τριών στοιχείων (ένα στοιχείο που βρίσκεται στην κορυφή του αισθητήρα και δύο στο κατώτατο σημείο) χρησιμοποιείται για να

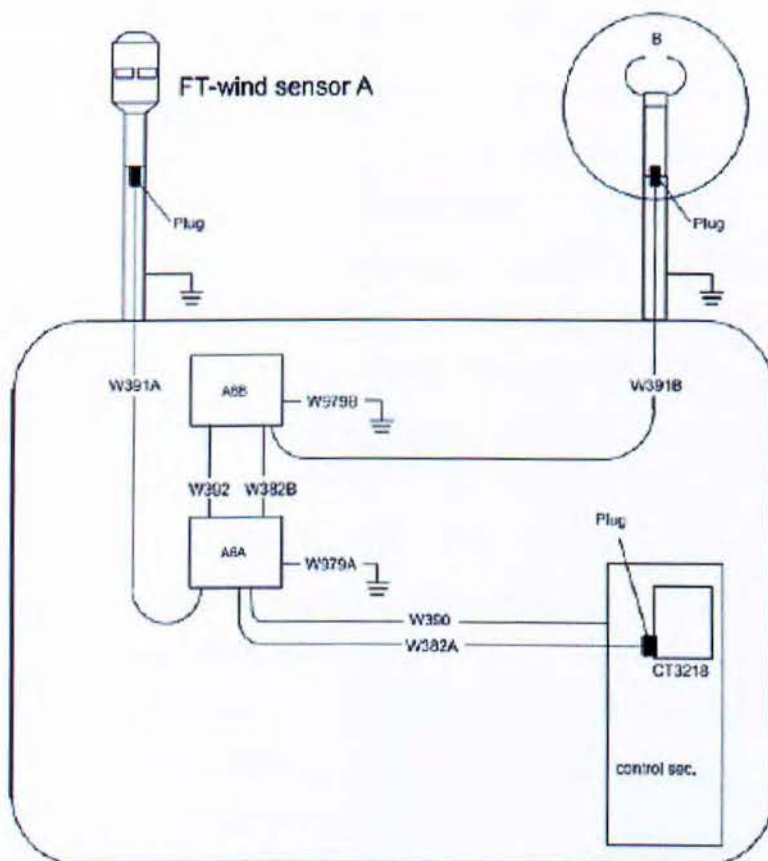
"Μελέτη ηλεκτρομηχανικού κυκλώματος και συστημάτων ελέγχου ανεμογεννήτριας"

εξασφαλίσει ότι η θέρμανση κατανέμεται ομοιόμορφα την ολόκληρη περιοχή επιφάνειας [1].

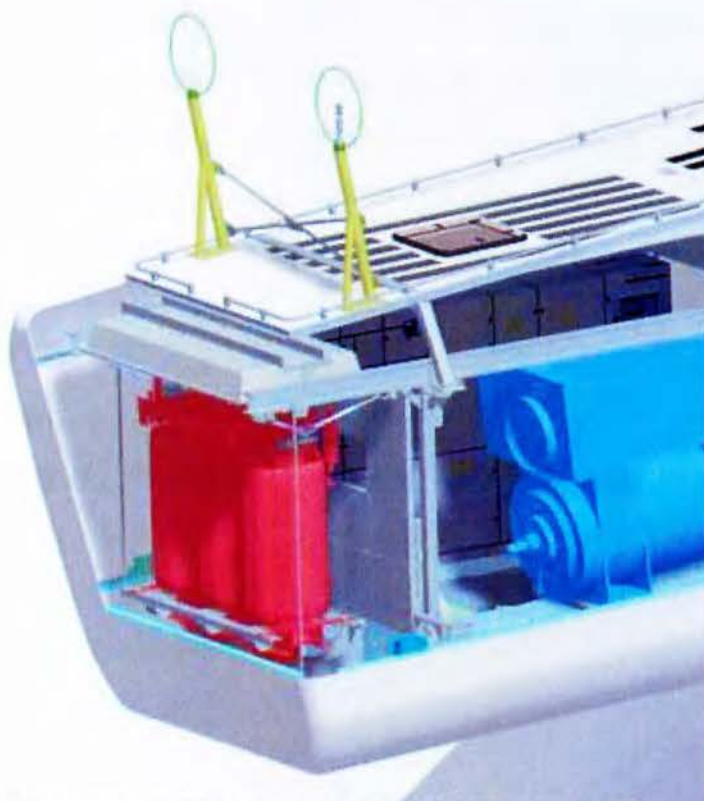


Σχήμα 2.2.4

"Μελέτη ηλεκτρομηχανικού κυκλώματος και συστημάτων ελέγχου ανεμογεννήτριας"



Σχήμα 2.2.5 Διάγραμμα σύνδεσης του αισθητήρα FT με την μονάδα έλεγχου.



Σχήμα 2.2.6 3d γράφημα τοποθέτησης αισθητήρα FT και Ultrasonic Anemometer 2D στην ατράκτου της ανεμογεννήτριας.

### 2.2.2 Vestas multi processor controller (VMP)

Ο συγκεκριμένος controller επιτηρεί και ελέγχει όλες τις λειτουργίες στην ανεμογεννήτρια, προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι η απόδοση του στροβίλου είναι η βέλτιστη με οποιαδήποτε ταχύτητα αέρα. Έχει την δυνατότητα να σταματά την λειτουργία της μηχανής εάν ανιχνεύσει κάποιο σφάλμα. Πρόκειται ουσιαστικά για το σύνολο τριών controller οι όποιοι επικοινωνούν μεταξύ τους, ανατάσσοντας πληροφορίες μέσω οπτικής ίνας.

**Ground controller**, ο οποίος βρίσκεται στο κάτω μέρος του πύργου, και ελέγχει τους κύριους διακόπτες. Από αυτόν ένας χειριστής μπορεί να λειτουργήσει την Α/Γ και να δει όλα τα στοιχεία της (σφάλματα, προειδοποιήσεις λειτουργία, σήματα αισθητήρων, κατάσταση κύριων και βοηθητικών συστατικών κλπ.).

**Converter controller** ο οποίος βρίσκεται στην nacelle φροντίζει την παρέμβαση και τη διακοπή της γεννήτριας, τη μέτρηση του ρεύματος, της τάσης και τον έλεγχο του μετατροπέα.

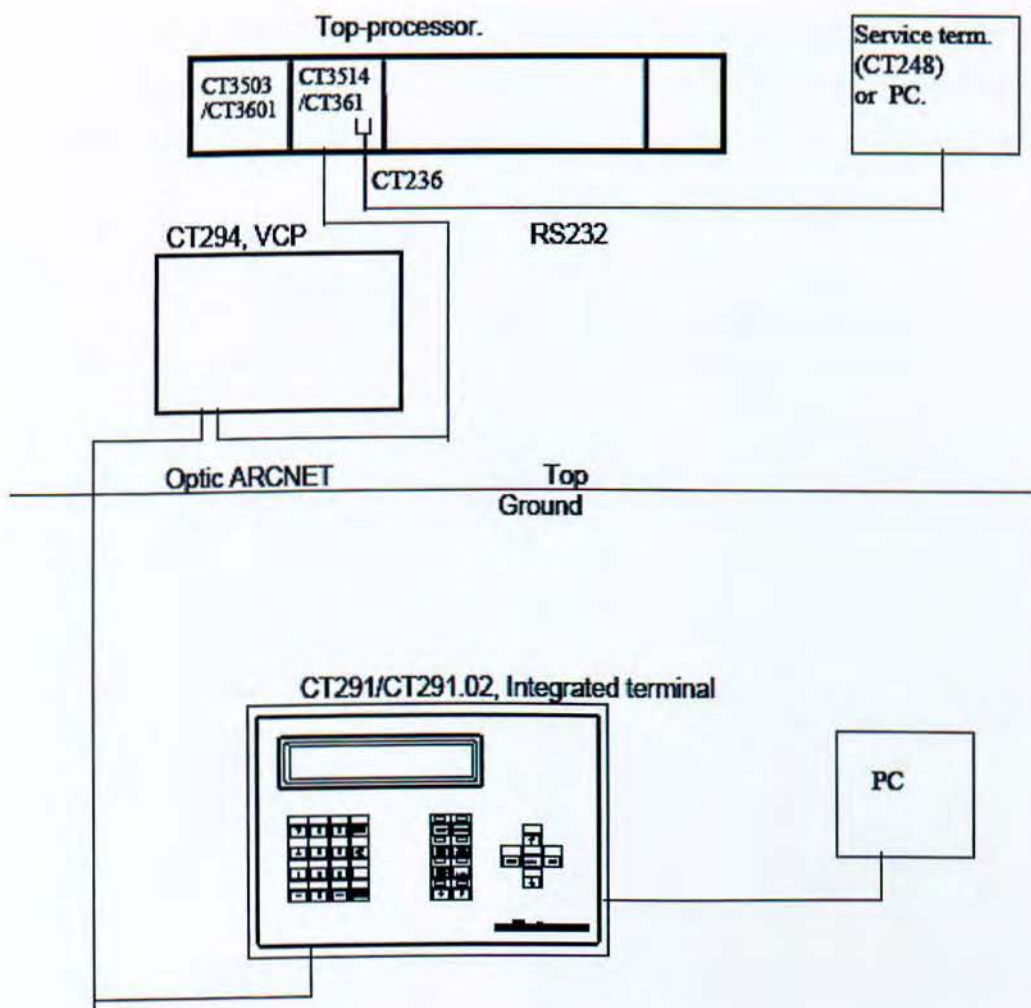
**Top Controller** ο οποίος βρίσκεται στην nacelle και φροντίζει τη λειτουργία της μηχανής π.χ. θερμοκρασίες, έλεγχος του βήματος και της ταχύτητας, έλεγχος της παρέκκλισης από την διεύθυνση του αέρα κλπ. Μπορεί να συνδεθεί με ένα φορητό controller με display και μπορεί να ελέγχεται η Α/Γ από κάποιον όταν βρίσκεται στη nacelle δηλ. όταν ένας χειριστής θέλει να εξετάσει τα στοιχεία από την Α/Γ, ή θέλει να ξεκινήσει ή να σταματήσει την Α/Γ ενώ βρίσκεται μέσα στην άτρακτο [1].

#### Συλλογή δεδομένων

Ο **Vestas Multi Processor Controller (VMP)** συλλέγει πληροφορίες για την απόδοση της ανεμογεννήτριας και στοιχεία που έχουν να κάνουν με:

- Ταχύτητα ρότορα και γεννήτριας
- Ταχύτητα και διεύθυνση αέρα
- Υδραυλική πίεση
- Θερμοκρασίες
- Παραγωγή ενέργειας
- Βήμα κλπ.

Όλες οι πληροφορίες για τα παραπάνω στοιχεία αποθηκεύονται σε αρχεία καταγραφής από τα οποία μπορούμε να δούμε και να αναλύσουμε τα λάθη στην Α/Γ και να τα επιλύσουμε.



Σχήμα 2.2.7 Σχέδιο που αναπαριστά την επικοινωνία μεταξύ του top και ground controller.

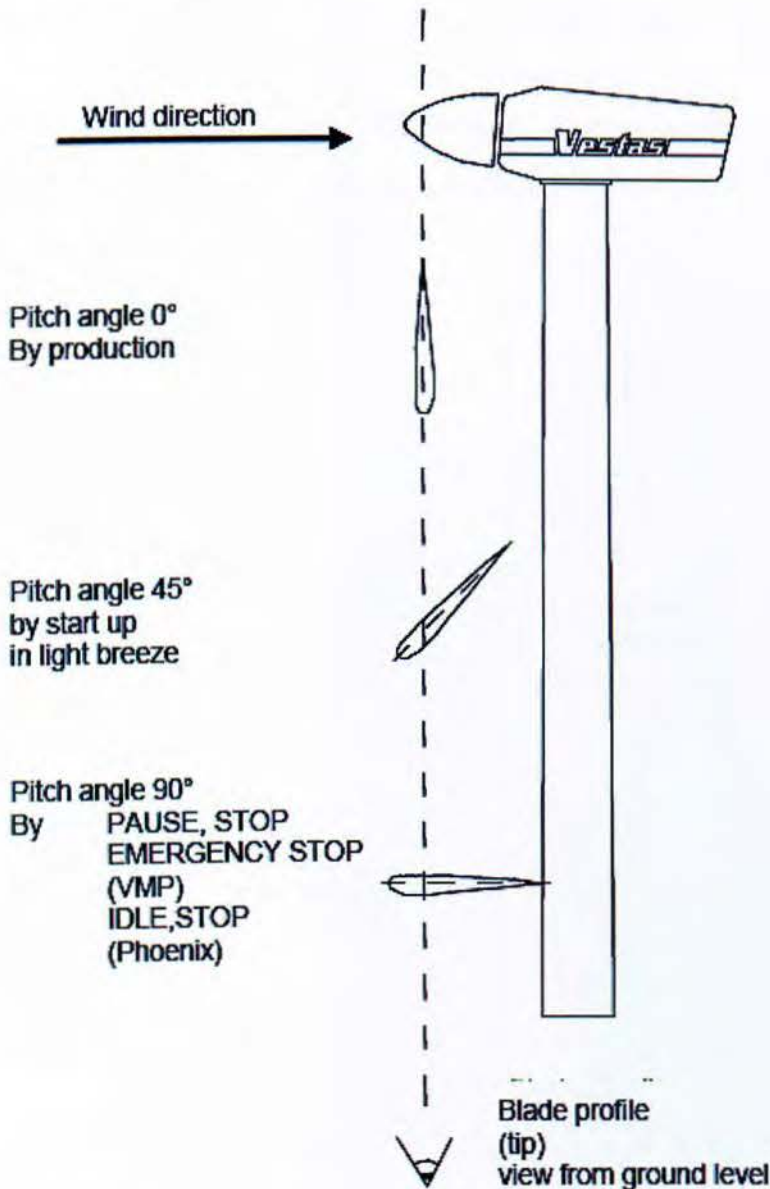
### Σύστημα παραμέτρων

Το λογισμικό στο σύστημα Vestas Multi Processor Controller (VMP) είναι φτιαγμένο έτσι ώστε όλες οι μεταβλητές να μπορούν να τεθούν χωριστά με διάφορες παραμέτρους. Οι παράμετροι αυτοί καθορίζουν τα όρια όπως τιμές βαθμολόγησης για το ανεμόμετρο, για την υδραυλική πίεση, τον συγχρονισμό της Α/Γ με το δίκτυο κ.λπ.

### Έλεγχος της Α/Γ με OptiTip

Όταν η Α/Γ είναι σε κατάσταση Pause, Stop, ή Emergency stop τα φτερά είναι σε μια θέση  $90^\circ$  από τον αέρα.

Όταν η Α/Γ είναι σε κατάσταση Run η Α/Γ είναι σε παραγωγή και τα φτερά είναι σε μια θέση κοντά στο 0 η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με την ταχύτητα του αέρα και αυτό ελέγχεται από τα συστήματα ελέγχου OptiTip και OptiSpeed από τον VMP controller.



Σχήμα 2.2.8: Η θέση του βήματος στις διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας

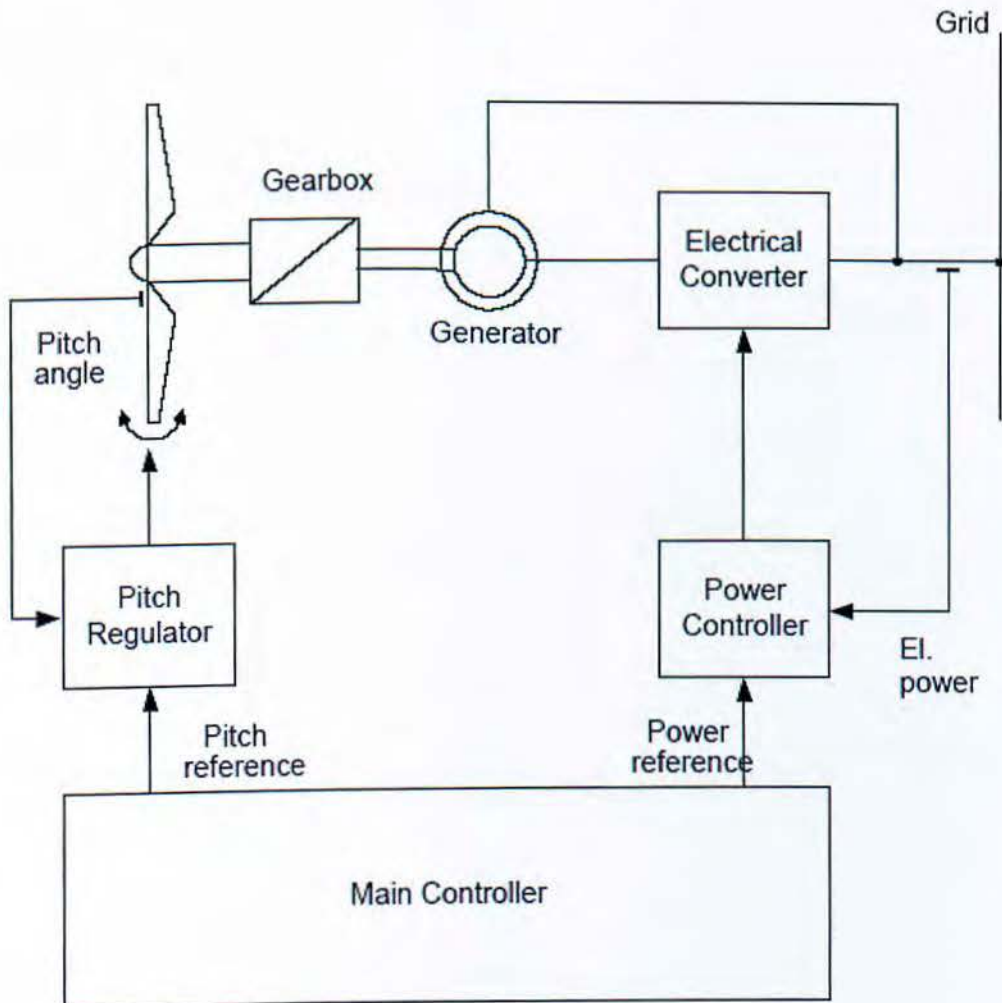
### Γενική διαμόρφωση έλεγχου

Στο σχήμα 2.2.9 παρουσιάζεται το θεωρητικό σύστημα ελέγχου. Οι λειτουργίες ελέγχου διαιρούνται σε 3 μπλοκ :

1. Κύριο ελεγκτή (main controller): Διαχειρίζεται τις γενικές λειτουργίες ελέγχου και παράγει τις τιμές αναφοράς για την γωνία του βήματος, και για την παραχθείσα ηλεκτρική ισχύς.

2. Ρυθμιστής βήματος (Pitch Regulator): Ρυθμίζει την γωνία του βήματος σύμφωνα με την τιμή αναφοράς που έχει πάρει από τον κύριο ελεγκτή.

3. Ελεγκτής ισχύος (Power Controller): Ρυθμίζει την παραχθείσα ηλεκτρική ισχύ που παραδίδεται στο δίκτυο σύμφωνα με την τιμή αναφοράς που έχει πάρει από τον κύριο ελεγκτή.



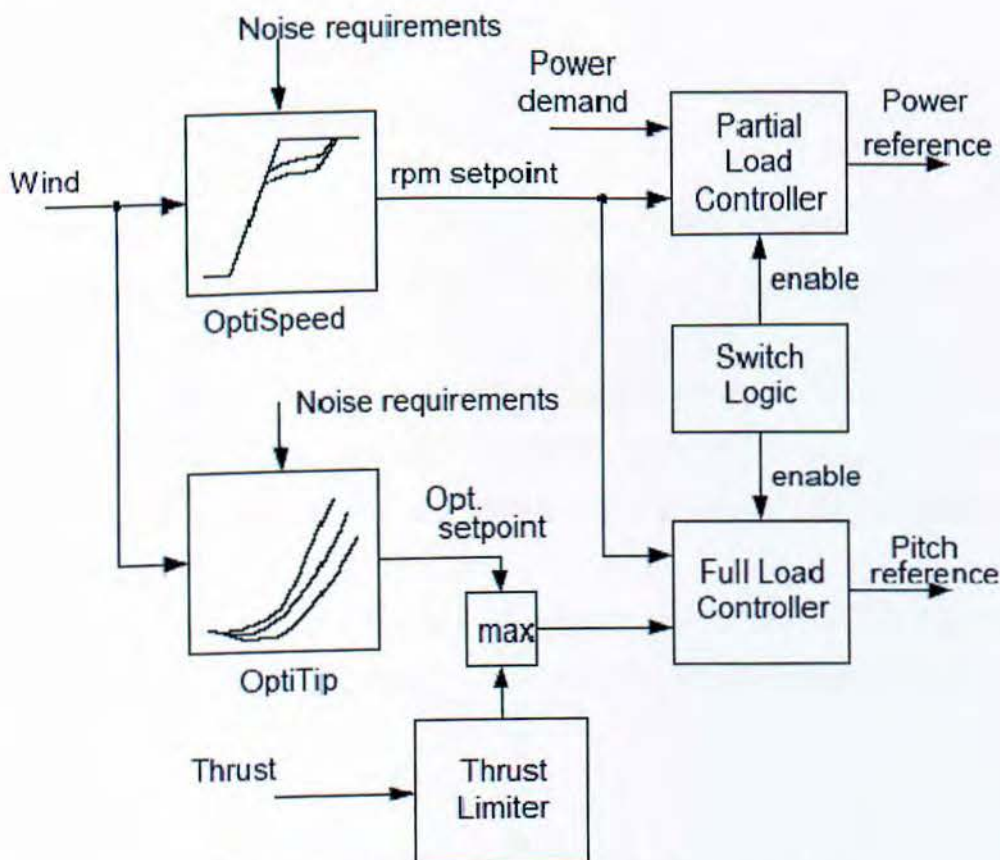
Σχήμα 2.2.9: Γενική διαμόρφωση ελέγχου



## Κύριος ελεγκτής

Ο κύριος ελεγκτής περιέχει τους γενικούς βρόγχους ελέγχου και τους περισσότερους από τους αλγόριθμους επίβλεψης. Ο στόχος του είναι να εξασφαλίσει ότι ο στρόβιλος ικανοποιεί οποιαδήποτε στιγμή τις ακόλουθες απαιτήσεις απόδοσης: α) Μεγιστοποίηση της παραχθήσας ενέργειας β) Περιορισμός των μηχανικών φορτίων. γ) Περιορισμός του ακουστικού θορύβου. δ) Διατήρηση της ποιότητας ισχύος.

Το σχήμα 2.2.10 παρουσιάζει το μπλοκ διάγραμμα του κύριου ελεγκτή και πιο πολύ ουσιαστικές λειτουργίες. Στην αριστερή πλευρά υπάρχουν δύο μπλοκ αποκαλούμενα OptiSpeed και OptiTip που χρησιμοποιούνται για να υπολογίσουν τη βέλτιστη περιστροφή ανά λεπτό και τη γωνία του βήματος τα οποία εξαρτώνται από την ταχύτητα του αέρα. Το βέλτιστο set point ορίζεται ως το λειτουργικό σημείο όπου ο στρόβιλος παράγει τη μέγιστη ηλεκτρική ισχύς, που κρατά το θόρυβο κάτω από το επιτρεπόμενο επίπεδο [1].



Σχήμα 2.2.10: Κύρια δομή του κύριου ελεγκτή

Τα μπλοκ δεξιά είναι αρμόδια για τον έλεγχο της A/Γ στον καθορισμένο set point εξασφαλίζοντας ότι η ηλεκτρική ισχύς περιορίζεται στην απαιτούμενη ισχύ. Εάν η ταχύτητα του αέρα αυξηθεί επάνω από ένα ορισμένο επίπεδο η γωνία του βήματος θα αυξηθεί πάνω από το βέλτιστο set point. Στην περίπτωση που όταν η απαιτούμενη ισχύς είναι ίση με την εκτιμημένη ισχύς αυτή η ταχύτητα του αέρα ονομάζεται 'εκτιμημένη ταχύτητα αέρα'.

Με ταχύτητα αέρα κάτω από την εκτιμημένη ταχύτητα αέρα η A/Γ δεν είναι ικανή να παράγει την εκτιμημένη ισχύ. Σε αυτήν την περίπτωση οι λογικοί διακόπτες θα ενεργοποιήσουν τον ελεγκτή φορτίων, και η A/Γ θα παράγει ηλεκτρική ενέργεια με την βέλτιστη αποδοτικότητα. Εάν η ταχύτητα αέρα είναι επάνω από τη εκτιμημένη ταχύτητα αέρα ο ελεγκτής φορτίων ενεργοποιεί και περιορίζει την ισχύ στην εκτιμημένη ισχύ.

### **Σύνδεση αστέρα - τρίγωνο**

Προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η αποδοτικότητα της γεννήτριας ο στάτης μπορεί να συνδεθεί σε δύο διαφορετικές συνδέσεις:

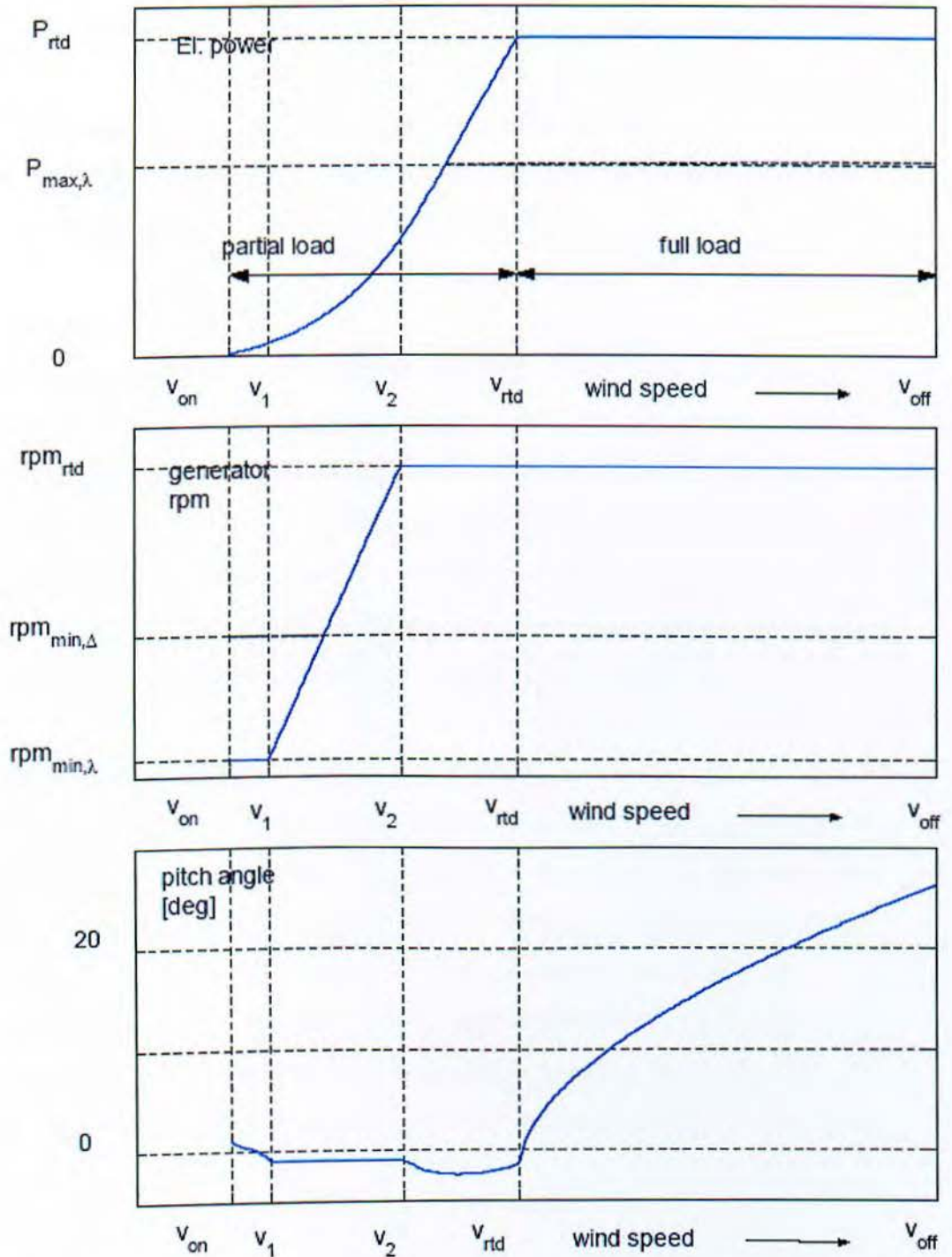
#### **1. Σύνδεση Αστέρα (λ)**

#### **2. Σύνδεση Τριγώνου (Δ)**

Στη σύνδεση αστέρα οι στροφές της γεννήτριας μπορούν να καλύψουν ολόκληρη την περιοχή από το  $rpm_{min}$  στο  $rpm_{rd}$  ενώ η ισχύς της γεννήτριας περιορίζεται σε  $P_{max}$ .

Στη σύνδεση τριγώνου η ισχύς είναι απεριόριστη ενώ οι στροφές περιορίζονται έτσι ώστε να μην υπερβούν από το  $rpm_{min\Delta}$ . Το σύστημα ελέγχου επιλέγει τη σύνδεση του στάτη αν είναι σε αστέρα ή τρίγωνο και εξαρτάται από την ταχύτητα του αέρα.

Για την αλλαγή από αστέρα σε τρίγωνο και το αντίθετο η παραγωγή μηδενίζεται και ξανασυγχρονίζεται η γεννήτρια και μπαίνει ξανά σε παραγωγή.



Σχήμα 2.2.11: Καμπύλες σε κατάσταση λειτουργίας, για την ισχύ, τις στροφές της γεννήτριας, και τη γωνία του βήματος εξαρτώμενες από την ταχύτητα του αέρα. Υποτίθεται ότι η Α/Γ λειτουργεί με τη μέγιστη απαίτηση ισχύος και χωρίς μείωση θορύβου.

### **Εξωτερικός έλεγχος ισχύος**

Είναι δυνατό να ελεγχθεί η παραγωγή ισχύος μέσω Remote control system ή με τη ρύθμιση μιας παραμέτρου. Σε αυτήν την περίπτωση, το σύστημα ελέγχου θα ερμηνεύσει τη δεδομένη απαίτηση ισχύος δεδομένου ότι «πλήρες φορτίο», δηλ. ο ελεγκτής θα μετατραπεί σε πλήρη λειτουργία φορτίων εάν η απαιτούμενη ισχύς επιτυγχάνεται.

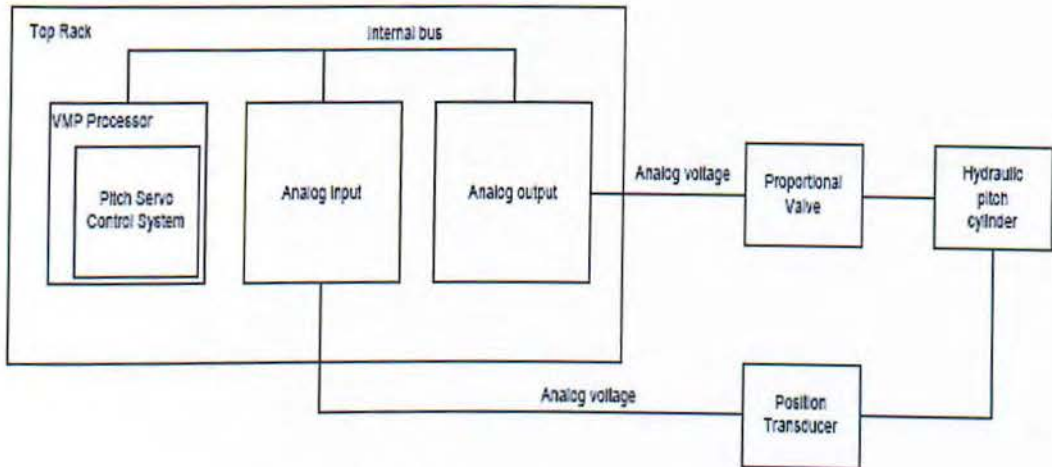
### **Περιοριστής ώθησης**

Η λειτουργία του περιοριστή ώθησης είναι να περιοριστεί η αεροδυναμική ώθηση σε μια σταθερή μέγιστη αξία. Σε αυτόν τον σκοπό, ο ελεγκτής υπολογίζει την ώθηση του ρότορα από τις μετρήσεις της ισχύος, τις στροφές της γεννήτριας και της γωνίας του βήματος και υπολογίζει μια γωνία βήματος που εξασφαλίζει ότι η ώθηση είναι κάτω από το διευκρινισμένο όριο. Ο περιοριστής ώθησης ενεργοποιείται κυρίως στην υψηλή αναταραχή προκειμένου να αποφευχθούν τα μέγιστα φορτία στα φτερά και τον πύργο.

### **Ρυθμιστής βήματος**

Οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν ένα σύστημα ελέγχου και ρύθμισης του βήματος με σερβομηχανισμό. Το σύστημα ρύθμισης του βήματος είναι ένας βρόγχος που ελέγχει το βήμα για να ακολουθήσει μια δεδομένη αναφορά όσο το δυνατόν γρηγορότερα διατηρώντας την ικανοποιητική απόσβεση.

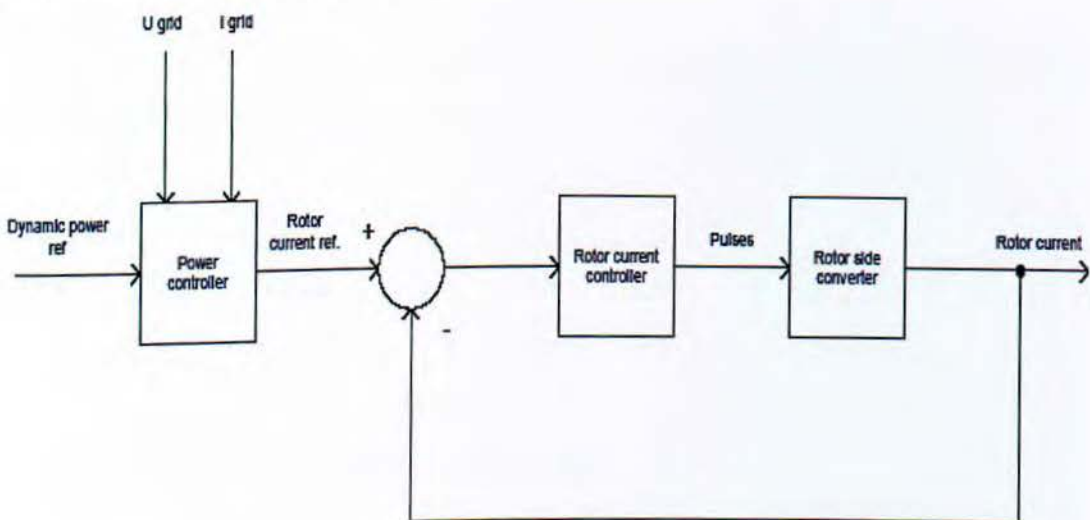
Ο ρυθμιστής βήματος είναι μη γραμμικός controller αντισταθμίζοντας τη νεκρή ζώνη και οι περιορισμοί στην αναλογική βαλβίδα. Η μετατροπή της θέσης του εμβόλου επιτυγχάνεται από τον VMP controller κοντά στη γραμμική προσέγγιση [1].



Σχήμα 2.2.12: Σύστημα ρύθμισης βήματος

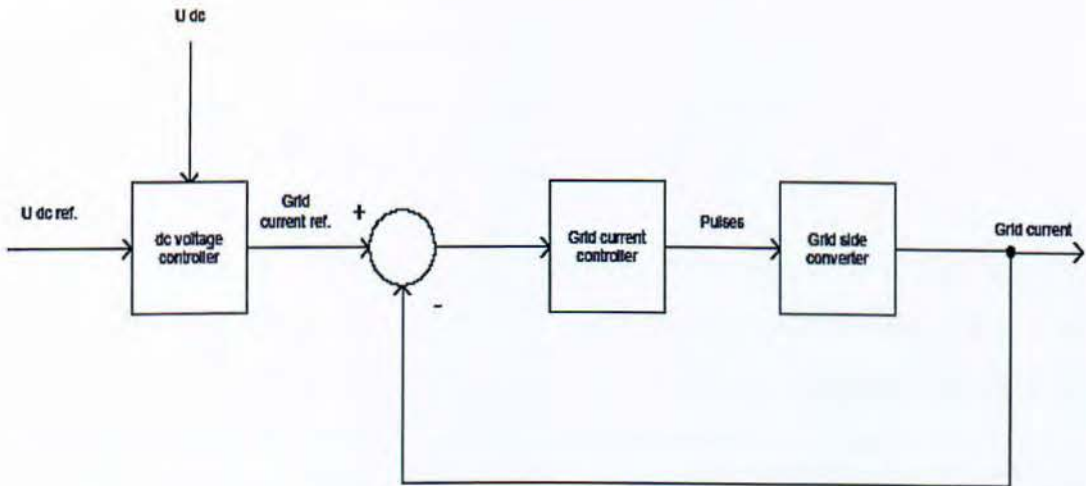
### Έλεγχος ισχύος και μετατροπείας ισχύος

Ο ελεγκτής ισχύος βασίζεται σε έναν μετατροπέα συχνότητας στο κύκλωμα του ρότορα της γεννήτριας επιτρέποντας στην ανεμογεννήτρια να μεταβάλλονται οι στροφές της γεννήτριας από + 30% μέχρι και - 50% γύρω από τη σύγχρονη ταχύτητα, χωρίς επιρροή στην ποιότητα ισχύος. Ο ελεγκτής ισχύος στο μετατροπέα συχνότητας λαμβάνει μια αναφορά ισχύος από τον ελεγκτή VMP και διατηρεί αυτό το επίπεδο ισχύος με τη βοήθεια ενός γρήγορου βρόχου ελέγχου ρεύματος.



Σχήμα 2.2.13: Ελεγκτής ισχύος / μετατροπείας ρότορα

Ο μετατροπέας συχνότητας αποτελείται από έναν μετατροπέα στον ρότορα και έναν δευτερεύοντα μετατροπέα δικτύου. Ο δευτερεύων μετατροπέας δικτύου δεν είναι, εντούτοις, ένα μέρος του συστήματος ελέγχου ισχύος δεδομένου ότι ο κύριος στόχος του είναι να διατηρήσει μια σταθερή τάση στο dc link.



Σχήμα 2.2.14: Το σύστημα μέσα από το οποίο βρίσκεται ο μετατροπέας δικτύου.

### Μείωση της παραγωγής που προκαλείτε από υψηλές θερμοκρασίες.

Μείωση της παραγωγής μπορεί να προκληθεί από υψηλή θερμοκρασία σε ένα από τα ακόλουθα συστατικά:

- Γεννήτρια
- Λάδι σασμάν
- Ρουλεμάν σασμάν
- Κορυφαίος ελεγκτής
- Αντιψυκτικό υγρό (IGBT)
- Θερμοκρασία μετασχηματιστών [1]

## **VESTAS CONVERTER SYSTEM (VCS)**

Το σύστημα VCS είναι αυτό που επιτρέπει στην γεννήτρια να λειτουργεί με μεταβλητές στροφές και να συμπεριφέρεται σαν σύγχρονη γεννήτρια. Η γεννήτρια συνδέεται με το δίκτυο 690 V στο στάτη και ο ρότορας τροφοδοτείται με το ρεύμα διέγερσης από τον μετατροπέα μέσω των δακτυλιδιών ολίσθησης.

Η γεννήτρια μπορεί να συνδεθεί σε αστέρα ή σε τρίγωνο. Συνδέεται σε αστέρα εάν η συνολική ισχύς είναι χαμηλή δηλ. σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, και σε τρίγωνο σε υψηλή συνολική ισχύς δηλ. υψηλές ταχύτητες ανέμου. Το πλεονέκτημα στη σύνδεση σε αστέρα είναι ότι οι απώλειες στον μετατροπέα και στην γεννήτρια μειώνονται.

Ο μετατροπέας συχνότητας συνδέεται με το δίκτυο στα 690 V μέσω μιας ασφάλειας, αλλά τα ηλεκτρονικά ισχύος του μετατροπέα δεν είναι σχεδιασμένα για 690 V, επομένως υπάρχει ένας αυτομετασχηματιστής (T550) από 690V σε 480V ο οποίος έχει ενσωματωμένο τσόκ.

Ο μετατροπέας είναι ένας μετατροπέας 4 τεταρτημορίων ο οποίος έχει την δυνατότητα να παρέχει ρεύμα σε οποιαδήποτε κατεύθυνση και τη συχνότητα από την πλευρά του δικτύου (grid inverter) και από την πλευρά του ρότορα (rotor inverter) οι οποίοι είναι εξοπλισμένοι με πυκνωτές (DC Link C561).

Όλα τα ηλεκτρονικά ισχύος στον μετατροπέα συχνότητας (VCS) ελέγχονται από την VCP (Vestas Converter Processor).

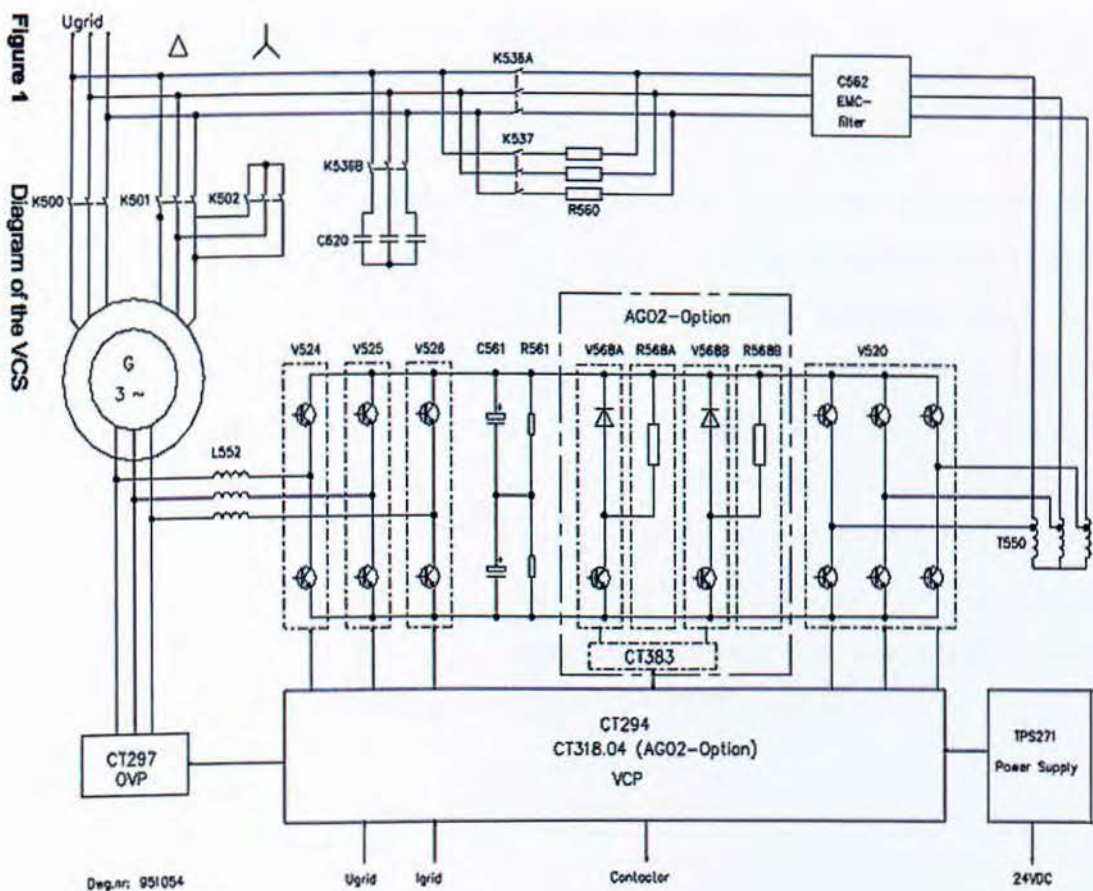
Όταν ξεκινάει η διαδικασία συγχρονισμού φορτίζονται οι πυκνωτές του DC-LINK μέσω του κλειστού ρελλέ K537 και των αντιστάσεων R560. Όταν η τάση φθάσει στο 90% της τελικής τιμής το K537 ανοίγει και ταυτόχρονα κλείνουν τα ρελλέ K537A και K537B οπότε ενεργοποιείτε grid inverter V520 και η τάση στους πυκνωτές του DC-Link προσαρμόζεται στα 800 V DC.

Τα συστατικά V520 και V524-V526 είναι ιδιαίτερα ηλεκτρονικά ισχύος και ονομάζονται Skippack τα οποία περιέχουν τα IGBTs τους οδηγούς, τα μετρητικά της θερμοκρασίας, της τάσης και του ρεύματος στο DC-Link. Τα Skippack μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές και το αντίστροφο.

Ο μετατροπέας παράγει αρμονικές στο δίκτυο γι' αυτό υπάρχουν οι

πυκνωτές C620 όπου κόβουν τις αρμονικές από το δίκτυο. Για την μείωση των ρευμάτων υψηλής συχνότητας υπάρχει το φίλτρο C562. Προκειμένου να συνδεθεί η γεννήτρια με το δίκτυο πρέπει πρώτα ο ρότορας να μαγνητιστεί. Αυτό το φροντίζει η VCP μέσω των inverters η οποία ελέγχει τους όρους συγχρονισμού της γεννήτριας με το δίκτυο και όταν αυτοί ικανοποιούνται κλείνουν τα κεντρικά ρελλέ και συνδέεται η γεννήτρια με το δίκτυο.

Το ρεύμα στον ρότορα της γεννήτριας μπορεί να είναι ανεξάρτητο από τους όρους του δικτύου επομένως μπορεί να επιλεγθεί μια επιθυμητή γωνία φάσεων και έτσι να έχουμε και παραγωγή άεργης ισχύος .



Σχήμα 2.2.15 Γράφημα του συστήματος Vestas Converter System.

Με αύξηση του ρεύματος στο ρότορα έχουμε αντιστάθμιση ενώ με μείωση έχουμε χωρητικά φορτία από την γεννήτρια.



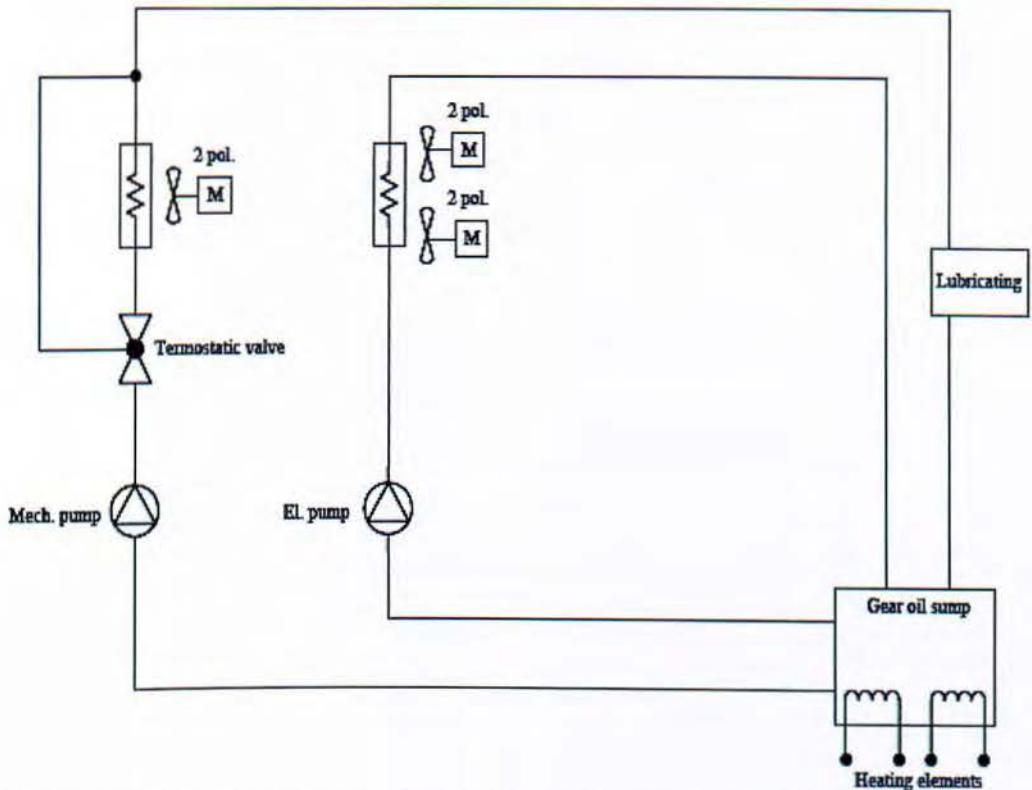
Στο ρότορα τοποθετείτε μια προστασία από υπερτάσεις όπου προστατεύει τον μετατροπέα από τις υψηλές τάσεις που μπορεί να δημιουργηθούν από τον ρότορα. Σε περίπτωση υπέρτασης στο ρότορα η γεννήτρια και ο μετατροπέας αποσυνδέονται από το δίκτυο. Η OVP (Over Voltage Protection) μπορεί να ενεργοποιηθεί είτε από εντολή της VCP είτε από εσωτερική μέτρηση της τάσης. Η VCP ελέγχει περισσότερο τον μετατροπέα. Μετράει την τάση και το ρεύμα δικτύου, τη συνολική ισχύς, και επικοινωνεί με τους controller [1].

## **Έλεγχος Θερμοκρασίας**

### **1. Έλεγχος θερμοκρασίας λαδιού σασμάν**

#### **Ψύξη λαδιού**

Για την ψύξη του λαδιού του σασμάν υπάρχει ένα ψυγείο με δύο ανεμιστήρες (χαμηλή και υψηλή ταχύτητα). Όταν η θερμοκρασία λαδιού υπερβαίνει τους 45 °C η θερμοστατική βαλβίδα ανοίγει σταδιακά μέχρι τους 60 °C όπου και είναι πλήρως ανοικτή και είναι κλειστή η παράκαμψη από το ψυγείο και το λάδι οδηγείται όλο στο ψυγείο. Η ηλεκτρική αντλία αναλαμβάνει στους 59 °C και σταματάει τη λειτουργία της στους 55 °C. Ο πρώτος ανεμιστήρας ξεκινάει στους 60 °C και σταματάει στους 55 °C. Ο δεύτερος ξεκινάει στους 70 °C και σταματάει στους 65 °C. Όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει τους 80 °C η ανεμογεννήτρια θα μπει σε κατάσταση και θα στείλει ένα σφάλμα για την υψηλή θερμοκρασία στο λάδι του σασμάν.



Σχήμα 2.2.16 Διάγραμμα συστήματος ψύξης και θέρμανσης λαδιού σασμάν.

### Θέρμανση λαδιού σασμάν

Εάν η θερμοκρασία στο λάδι του σασμάν πέσει κάτω από τους  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  τότε το λάδι ζεσταίνεται με την λειτουργία αντιστάσεων οι οποίες είναι τοποθετημένες μέσα στο σασμάν. Οι αντιστάσεις θα σταματήσουν τη λειτουργία τους όταν το λάδι φτάσει στους  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 2. Off line φίλτρο

Στο σασμάν υπάρχει ένα επιπλέον φίλτρο εξωτερικό το οποίο ξεκινάει να φιλτράρει το λάδι σε θερμοκρασία  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  και σταματάει στους  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 3. Ψύξη γεννήτριας

Η γεννήτρια ψύχεται από ένα εξωτερικό ανεμιστήρα δύο ταχυτήτων, ο οποίος ίδιος ανεμιστήρας ψύχει και το εσωτερικό της Nacelle οδηγώντας τον αέρα από το εσωτερικό της nacelle προς το περιβάλλον.

**A. Ο ανεμιστήρας θα ξεκινήσει στη 1η (χαμηλή) ταχύτητα εάν ένας από τους παρακάτω όρους είναι αληθής:**

- Θερμοκρασία τυλιγμάτων γεννήτριας μεγαλύτερη από 70 °C
- Θερμοκρασία ρουλεμάν γεννήτριας μεγαλύτερη από 80 °C
- Θερμοκρασία Nacelle μεγαλύτερη από 35 °C

**B. Η αλλαγή στην 2η (υψηλή) ταχύτητα θα γίνει εάν ένας από τους παρακάτω όρους είναι αληθής:**

- Θερμοκρασία τυλιγμάτων γεννήτριας μεγαλύτερη από 95 °C
- Θερμοκρασία Nacelle μεγαλύτερη από 40 °C
- Εάν η θερμοκρασία στην γεννήτρια υπερβεί τους 135 °C η ανεμογεννήτρια θα στείλει σφάλμα και θα μπει σε κατάσταση pause.

#### **4. Έλεγχος θερμοκρασίας δαχτυλιδιών ολίσθησης της γεννήτριας.**

Στο slip ring του ρότορα της γεννήτριας υπάρχει ένας ανεμιστήρας ο οποίος στέλνει αέρα στον χώρο. Επιπλέον υπάρχει ένας αισθητήρας θερμοκρασίας (PT 100) και μία αντίσταση όπου θερμαίνει το χώρο όταν χρειάζεται. Το ανώτατο όριο θερμοκρασίας είναι 70 °C.

Ο ανεμιστήρας ενεργοποιείται όταν η ταχύτητα της γεννήτριας περάσει τις 150 rpm. Ενεργοποιείται επίσης όταν υπάρχει υψηλή θερμοκρασία έστω και αν είναι σε κατάσταση pause.

Για να εξασφαλιστεί η σωστή λειτουργία της ανεμογεννήτριας ο χώρος πρέπει να έχει τη σωστή θερμοκρασία, και να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος ύπαρξης υδρατμών, γι' αυτό το λόγο πριν ξεκινήσει η ανεμογεννήτρια και μπει στην παραγωγή η αντίσταση θερμαίνει το χώρο και ο ανεμιστήρας λειτουργεί. Αυτή η διαδικασία μπορεί και να διαρκέσει 1 ώρα.

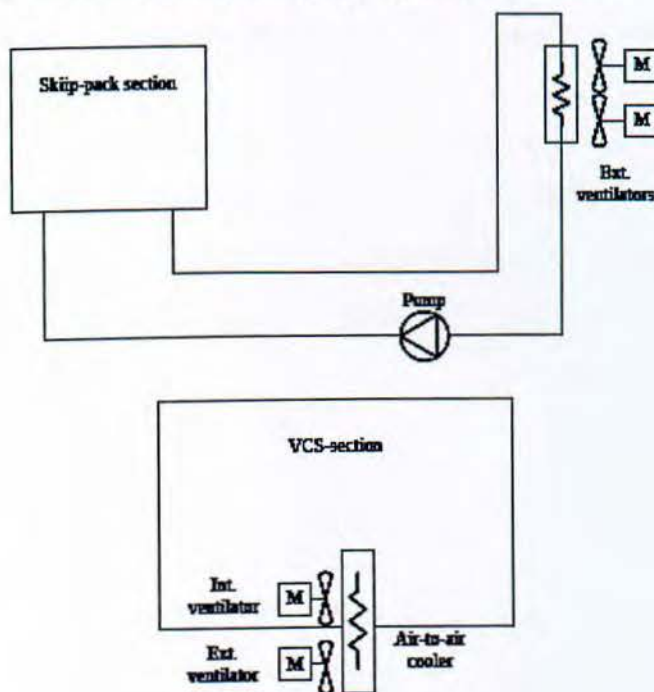
Η εντατική θέρμανση του slip ring εκτελείται, εάν η θερμοκρασία του χώρου είναι κάτω από 0°C. Η αντίσταση είναι ενεργή για 30 λεπτά ανά διαφορά θερμοκρασίας 10°C μεταξύ της θερμοκρασίας του slip ring και της θερμοκρασίας της nacelle συν ένα περιθώριο 5°C. Ο χρόνος προθέρμανσης

περιορίζεται σε ένα μέγιστο 1 ώρας, αλλά ελάχιστα 5 λεπτά. Για να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος της θέρμανσης και εξαερισμού συμπύκνωσης εκτελείται για ένα πρόσθετο λεπτό.

Ο κίνδυνος για τη συμπύκνωση αποφεύγεται από τη θέρμανση και τον εξαερισμό του χώρου, εάν η θερμοκρασία του χώρου είναι επάνω από 0°C. Η μονάδα θέρμανσης χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του slip ring και ο ανεμιστήρας χρησιμοποιείται για την αφαίρεση του υγρού αέρα από την αίθουσα. Η μονάδα θέρμανσης και ο ανεμιστήρας είναι ενεργοί για 1 λεπτό ανά διαφορά θερμοκρασίας 1°C μεταξύ της θερμοκρασίας του χώρου του slip ring και της θερμοκρασίας της nacelle συν το περιθώριο 5°C. Ο χρόνος θέρμανσης και εξαερισμού περιορίζεται σε ένα μέγιστο 1 ώρας, αλλά ελάχιστο 1 λεπτό.

## 5. Ψύξη VCS και Skiip Pack

Το κύκλωμα ψύξης για τη VCS και τα Skiip Pack αποτελείται από το ίδιο ψυγείο και τους ίδιους ανεμιστήρες με το σύστημα ψύξης του σασμάν και η κυκλοφορία του ψυκτικού υγρού γίνεται από έναν κυκλοφορητή, ακόμα υπάρχει επιπλέον και ένα εσωτερικό ψυγείο με ανεμιστήρα.



Σχήμα 2.2.17 Κύκλωμα ψύξης VCS και Skiip Pack

Ο κυκλοφορητής ξεκινάει όταν η θερμοκρασία του ψυκτικού υγρού είναι πάνω από 20°C.

Ο εσωτερικός ανεμιστήρας ξεκινάει εάν ένας από τους παρακάτω όρους ισχύει:

- Η θερμοκρασία στην VCP είναι πάνω από 25 °C
- Εάν η παραγωγή της ισχύς είναι πάνω από 500 kW

Τα όρια όπου η A/G θα στείλει σφάλμα και θα μπει σε κατάσταση pause είναι τα παρακάτω:

- Θερμοκρασία VCP 58 °C
- Θερμοκρασία Skirpack 55 °C
- Θερμοκρασία ψυκτικού υγρού 56 °C
- Θερμοκρασία επεξεργαστή 58°C

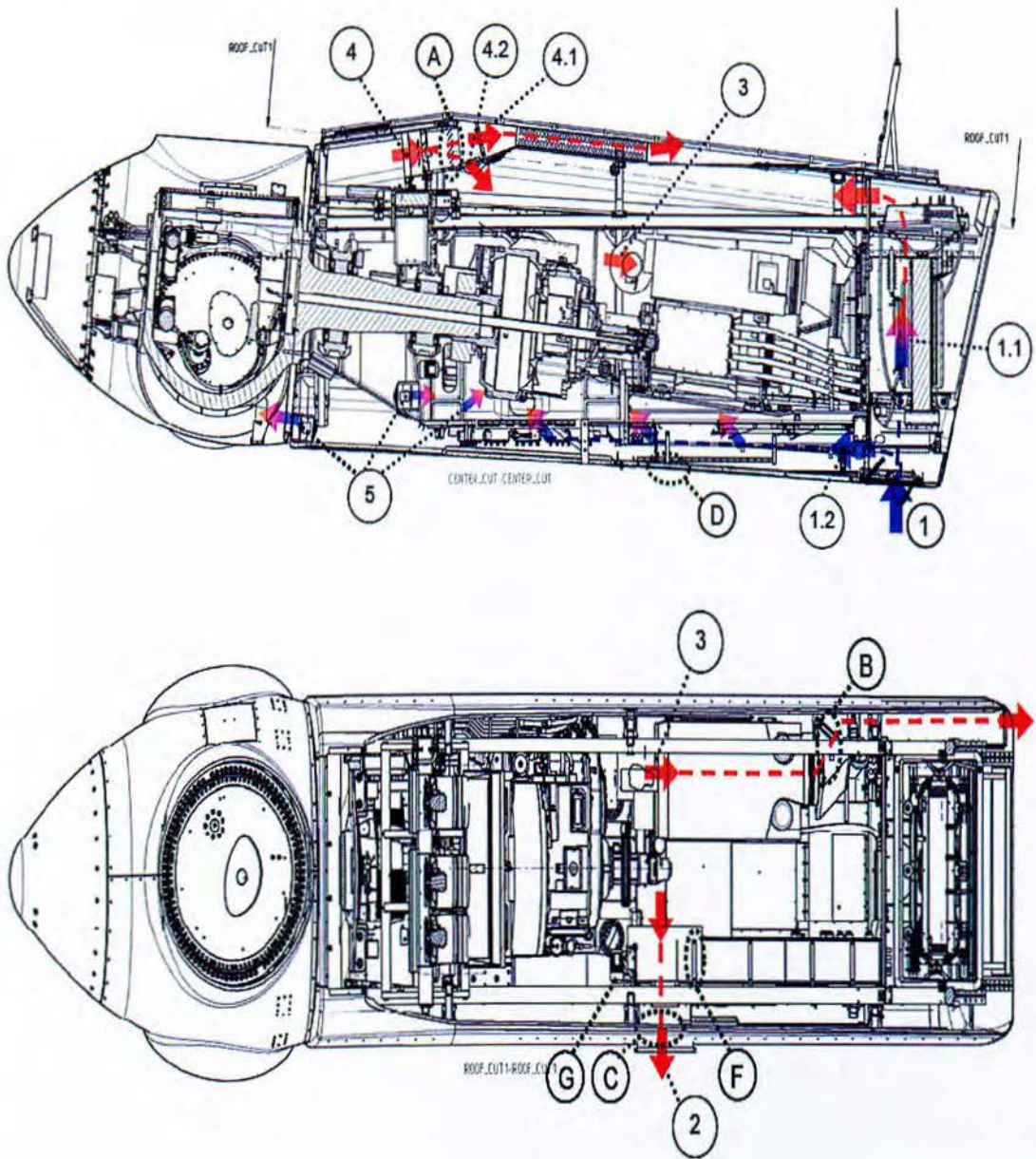
## **6. Έλεγχος θερμοκρασιών ελεγκτών**

Για την σωστή λειτουργία των επεξεργαστών και τον σωστό υπολογισμό, θα πρέπει η θερμοκρασία στους υπολογιστές να είναι πάντα πάνω από τους 0 °C. Γι' αυτό το λόγο υπάρχουν αντιστάσεις θέρμανσης στους ελεγκτές όπου κρατούν τη θερμοκρασία στα επιθυμητά όρια. Οι αντιστάσεις θερμαίνουν το χώρο μέχρι τους 10 °C και έπειτα σβήνουν.

## **7. Αισθητήρας θερμοκρασίας περιβάλλοντος**

Η θερμοκρασία περιβάλλοντος μετριέται με ένα PT-100 το οποίο είναι τοποθετημένο πάνω στην άτρακτο. Εάν η θερμοκρασία πέσει κάτω από -20 °C για περισσότερο από 20 sec η ανεμογεννήτρια μπαίνει σε κατάσταση αναμονής [1].

"Μελέτη ηλεκτρομηχανικού κυκλώματος και συστημάτων ελέγχου ανεμογεννήτριας"

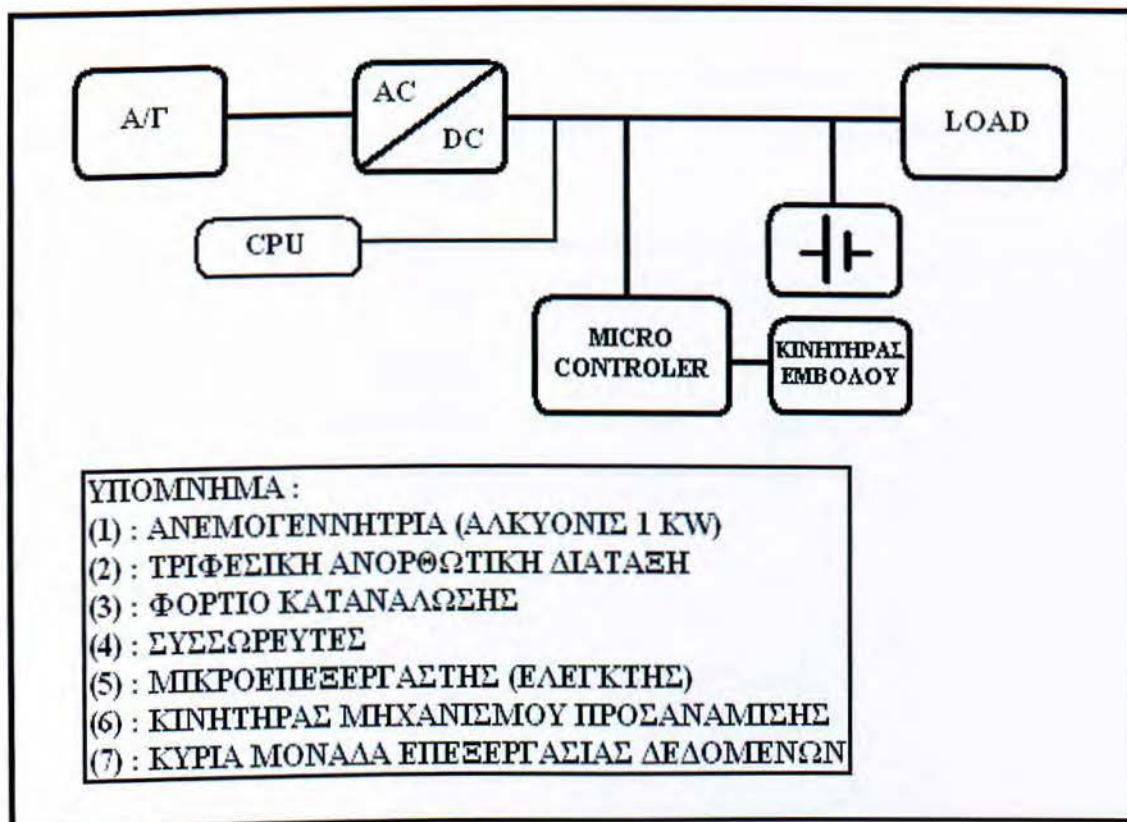


Σχήμα 2.2.18 Η κύρια ροη του αέρα ,οι ανεμιστήρες, οι βαλβίδες και θέσεις των αισθητηρίων.

## 2.3 Σύστημα Ελέγχου Ανεμογεννήτριας Μικρής Ισχύος

### ΑΛΚΥΟΝΙΣ 1 KW με Μικροεπεξεργαστή Και Συσσωρευτές

Στην Εικόνα 2.3 παρουσιάζεται το διάγραμμα του συστήματος ελέγχου και παραγωγής ενέργειας της ΑΛΚΥΟΝΙΣ η οποία λειτουργεί για αυτόνομα δίκτυα με χρήση συσσωρευτών



Εικόνα 2.3: Σύστημα ελέγχου ΑΛΚΥΟΝΙΣ

#### Πίνακας Ελέγχου:

Στο πίνακα ελέγχου της ΑΛΚΥΟΝΙΣ τα μετρούμενα μεγέθη για τον έλεγχο είναι:

- Τάση και ρεύμα συσσωρευτών: Ελέγχεται το επίπεδο της τάσης μέχρι το άνω όριο φόρτισης, και το ρεύμα φόρτισης των συσσωρευτών.

•Στροφές (rpm) της ανεμογεννήτριας και αποκοπή τάσης: Το αντίστοιχο κύκλωμα ελέγχει τις στροφές της φτερωτής και αποκόπτει την τάση όταν ξεπεραστεί το άνω όριο.

•Ένταση ρεύματος κινητήρα του μηχανισμού προσανέμισης: Ελέγχει το ρεύμα που απορροφά κατά τη λειτουργία του, το έμβολο.

•Κύκλωμα ηλεκτρονικών ισχύος: Έλεγχος σωστής λειτουργίας του κυκλώματος (τροφοδοσία – οδήγηση).

•Θερμοκρασία ηλεκτρονικών εξαρτημάτων: Έλεγχος της εσωτερικής θερμοκρασίας του ηλεκτρονικού κυκλώματος (Μέγιστη θερμοκρασία 40°C).

•Συχνότητα (3 φάσεων) της ανεμογεννήτριας: Έλεγχος της τάσης των τριών φάσεων προς την ανορθωτική διάταξη.

•Απώλεια φορτίου: Έλεγχος της τροφοδοσίας των συσσωρευτών.

•Κύρια μονάδα ελέγχου (AT mega128): Έλεγχος της σωστής λειτουργίας του μικροεπεξεργαστή της μονάδας ελέγχου.

•Εφεδρικό σύστημα ελέγχου (AT 90S 2313): Έλεγχος της σωστής λειτουργίας του μικροεπεξεργαστή του εφεδρικού συστήματος ελέγχου [4].

### 2.3.1 Λειτουργία Ελέγχου ΑΛΚΥΟΝΙΣ

Κύρια μονάδα ελέγχου :

Το σύστημα ελέγχου της ΑΛΚΥΟΝΙΣ βασίζεται στο μικροεπεξεργαστή (AT mega 128). Ο επεξεργαστής αυτός είναι ένας 8-bit μικροϋπολογιστής αρχιτεκτονικής RISC. Διαθέτει 53 I/O προγραμματιζόμενα Pins, τροφοδοτείται με 5 V, χρησιμοποιεί κρύσταλλο της τάξης των 16 MHZ.

Επίσης διαθέτει :

- μνήμη προγράμματος: 128 kbytes
- κύρια μνήμη: EPROM 4 kbytes
- εσωτερική μνήμη: SRAM 4 Kbytes



Τέλος παρέχει 8 κανάλια μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό, μέσω πολυπλέκτη καθώς και 8 interrupts.

### **Εφεδρικό σύστημα ελέγχου :**

Το εφεδρικό αυτό σύστημα υλοποιείται μέσω του μικροϋπολογιστή (AT 90S 2313) με ξεχωριστή τροφοδοσία 5 (V).

Ο μικροεπεξεργαστής 2313 μπορεί να διαπιστώσει πιθανή δυσλειτουργία του κεντρικού (AT 128) και αναλαμβάνει τον πλήρη έλεγχο. Όταν το bit αυτό μηδενιστεί αναλαμβάνει δράση ο AT 2313 με σκοπό τη διασφάλιση της λειτουργίας του συστήματος, κλείνοντας την ουρά της ανεμογεννήτριας.

### **Μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό :**

Ο μετατροπέας αυτός είναι ευκρίνειας 10 bit. Η τάση αναφοράς του είναι ξεχωριστή, επιλεγμένη στα 3,3V. Ο πολυπλέκτης που προαναφέρθηκε χρησιμοποιεί 5 καταχωρητές, η συχνότητα λειτουργίας του ρολογιού του πολυπλέκτη (ADC multiplexer) είναι στα 125 KHZ. Με την έναρξη της λειτουργίας του πολυπλέκτη η πρώτη μετατροπή θα ολοκληρωθεί μετά από 25 κύκλους του ρολογιού. Το αποτέλεσμα της κάθε μετατροπής αποθηκεύεται στους ADC registers (καταχωρητές αποτελεσμάτων).

### **Σειριακή θύρα επικοινωνίας (USART) :**

Η αποστολή των υποθηκευμένων δεδομένων σ' έναν υπολογιστή επιτυγχάνεται με τη χρήση της σειριακής θύρας επικοινωνίας (USART), η οποία μπορεί να λειτουργεί συγχρονισμένα αλλά και ασύγχρονα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση λειτουργεί με ασύγχρονη επικοινωνία 8 bit δεδομένων. Τέλος έχει επιλεγθεί ταχύτητα μεταφοράς της τάξης των 9600 bps (bits / sec) [4].

## **2.3.2 Σύστημα ελέγχου με προγραμματιζόμενο λογικό ελεγκτή (PLC)**

Ο Προγραμματιζόμενος Λογικός Ελεγκτής (Programmable Logic Controller – PLC) εμφανίστηκε στις αρχές της δεκαετίας του '80 και αποτελεί έναν μικρό υπολογιστή κατάλληλα προσαρμοσμένο για αποκλειστική υλοποίηση εφαρμογών αυτοματισμών.

Τα PLC προορίζονταν να αντικαταστήσουν το κλασσικό ηλεκτρολογικό πίνακα με τους ηλεκτρονόμους ισχύος, δηλαδή μια τεράστια αλλαγή στο τρόπο που μέχρι τώρα δούλευε η βιομηχανία .

### **2.3.2.1 Περιγραφή Προγραμματιζόμενου Λογικού Ελεγκτή**

Το PLC είναι μία ηλεκτρονική διάταξη η οποία από την άποψη της λειτουργίας θα μπορούσε να προσομοιωθεί με έναν πίνακα αυτοματισμού. Έχει δηλαδή εισόδους και εξόδους που συνδέονται με τα στοιχεία μιας εγκατάστασης και βέβαια έναν αλγόριθμο που καθορίζει ότι κάποιος συνδυασμός εισόδων παράγει ένα αποτέλεσμα στις εξόδους.

Σε ότι αφορά το υλικό όλα τα PLC αποτελούνται από την CPU, η οποία περιέχει την λογική του αυτοματισμού, αφού διαβάσει την κατάσταση των καρτών εισόδου (input modules) ενεργοποιεί τις κάρτες εξόδου (output modules) σύμφωνα με τους κανόνες (πρόγραμμα) που έχουμε αποθηκεύσει στην μνήμη του.

Βέβαια το σύστημα συμπληρώνεται από το τροφοδοτικό και πιθανόν από διατάξεις ενδείξεων και χειρισμών (operator panel, operator display).

Τέλος καταγράφεται ο αλγόριθμος επεξεργασίας των μετρήσεων, ο οποίος γίνεται σε συγκεκριμένη γλώσσα με την βοήθεια ειδικού λογισμικού και αποθηκεύεται στην μνήμη του PLC.

### **2.3.2.2 Στάδια Εργασίας Προγραμματιζόμενου Λογικού Ελεγκτή**

Τα στάδια εργασίας που πρέπει ν' ακολουθηθούν για να υλοποιηθεί ένας αυτοματισμός είναι :

1. Τεχνική περιγραφή: Καταγραφή δηλαδή των απαιτήσεων του πελάτη όσο αφορά τη σημερινή κατάσταση της εγκατάστασης, τις απαιτήσεις από τον αυτοματισμό αλλά και τις πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις.

2. Επιλογή τύπου και μονάδων PLC: Η επιλογή γίνεται πάντα με βάση τεχνικοοικονομικά κριτήρια, την καλύτερη τεχνική λύση δηλαδή με το χαμηλότερο κόστος, μέσα από μια πληθώρα συστημάτων και των συνιστωσών τους.

3. Εκπόνηση σχεδίων: Κατασκευή πίνακα όπου θα τοποθετηθεί το PLC.

4. Προγραμματισμός: Υλοποίηση των προδιαγραφών που έθεσε ο πελάτης. Το πρόγραμμα δοκιμάζεται εν μέρει για τη σωστή του λειτουργία, αφού μια ολοκληρωμένη δοκιμή του είναι πρακτικά αδύνατη στο γραφείο καθώς οι συνθήκες είναι συνήθως πολύ πιο διαφορετικές από αυτές της εγκατάστασης.

5. Τοποθέτηση / Ενεργοποίηση: Το PLC μεταφέρεται και τοποθετείται εύκολα στην εγκατάσταση, συρματώνεται με τα περιφερειακά στοιχεία (κινητήρες, βάνες, τερματικούς), γίνεται έλεγχος για την σωστή συρμάτωση και τέλος μεταφέρεται το πρόγραμμα στο PLC. Εδώ γίνεται ο οριστικός έλεγχός του σύμφωνα με τη τεχνική περιγραφή λειτουργίας του αυτοματισμού.

6. Φάκελος έργου: Δημιουργείται φάκελος του έργου με τα τελικά διορθωμένα σχέδια και το πρόγραμμα εκτυπωμένο με επεξηγηματικά σχόλια.

### **2.3.2.3 Δομή Προγραμματιζόμενου Λογικού Ελεγκτή**

Η επιλογή ενός προγραμματιζόμενου ελεγκτή (τύπος, μέγεθος, κόστος) εξαρτάται από το πλήθος των στοιχείων που δίνουν εντολή στο plc (είσοδοι) και το πλήθος των στοιχείων που δέχονται εντολή απ' το plc (έξοδοι), καθώς και από το πλήθος των λειτουργιών που απαιτείται να κάνει ο αυτοματισμός

(μέγεθος προγράμματος, δηλ. απαιτούμενη μνήμη και δυνατότητες της κεντρικής μονάδας).

Ανεξάρτητα όμως απ' τον τύπο και το μέγεθος, ένας προγραμματιζόμενος ελεγκτής, συνίσταται από τα εξής απαραίτητα στοιχεία:

A. Πλαίσιο τοποθέτησης των μονάδων.

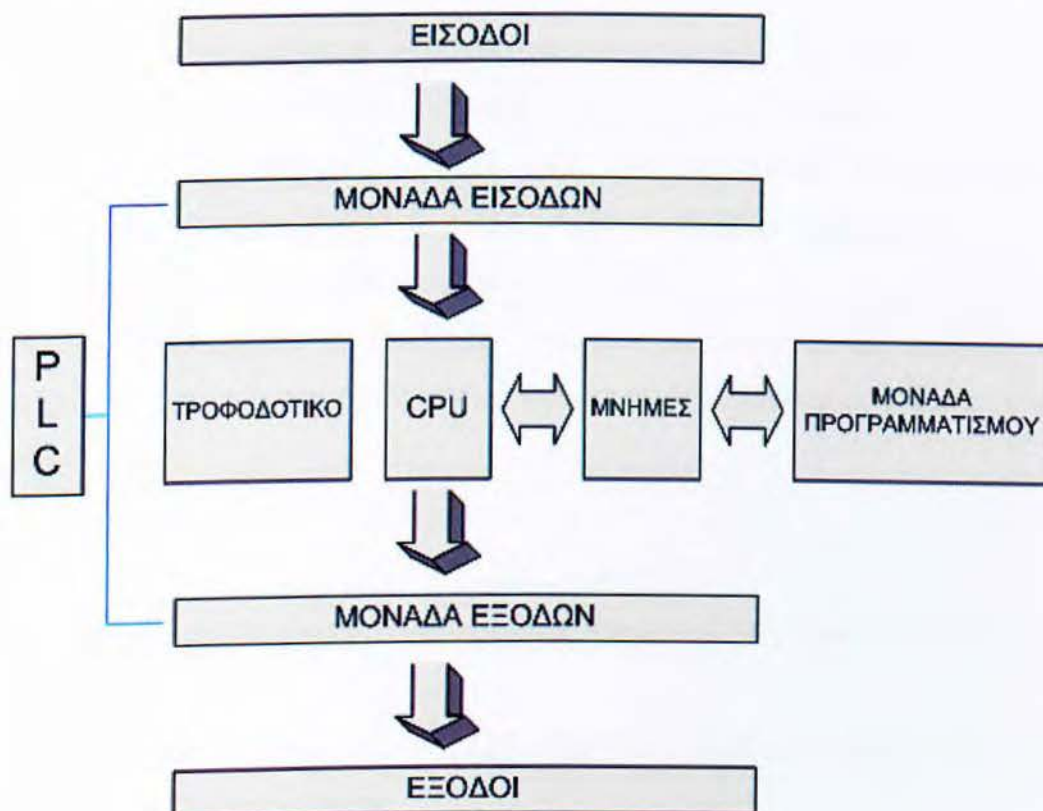
B. Μονάδα τροφοδοσίας.

Γ. Κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU) που αποτελεί τον εγκέφαλο του PLC.

Δ. Μονάδες εισόδων / εξόδων.

E. Συσκευή προγραμματισμού.

Στην Εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται σε διάγραμμα ροής, η δομή ενός προγραμματιζόμενου λογικού ελεγκτή.



### 2.3.2.4 Κύριες Λειτουργίες Προγραμματιζόμενου Λογικού Ελεγκτή

Τα PLC σήμερα έχουν και επιπλέον λειτουργίες που βοηθούν στην δημιουργία του αυτοματισμού. Οι λειτουργίες αυτές αυξάνουν συνεχώς καθώς τα PLC εξελίσσονται με ταχύτατους ρυθμούς. Αναφέρονται ενδεικτικά οι σημαντικότερες από αυτές.

- Λειτουργία απαριθμητών: Οι απαριθμητές μπορούν να απαριθμούν εξωτερικούς ή εσωτερικούς παλμούς.
- Δυνατότητα πραγματικού ρολογιού: Μέσω του οποίου μπορούμε να προγραμματίσουμε κάποιες εξόδους σε πραγματικό χρόνο, ημερομηνία και ώρα.
- Αριθμητικές επεξεργασίες: Τα σύγχρονα PLC έχουν προσεγγίσει πάρα πολύ τις δυνατότητες των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Σχεδόν όλα τα PLC έχουν σήμερα τη δυνατότητα να επεξεργάζονται αριθμητικές πράξεις.
- Αναλογικές εισοδοί-εξοδοί: Δυνατότητα των PLC να δέχονται και να επεξεργάζονται αναλογικές εισόδους, όπως και να παρέχουν αναλογικές εξόδους. Το PLC μετατρέπει τις αναλογικές τιμές των εισόδων σε ψηφιακές τιμές και στη συνέχεια επεξεργάζεται τις τιμές αυτές αξιοποιώντας τις δυνατότητες για επεξεργασία ψηφιακών αριθμών.
- Δικτύωση PLC: Τα PLC μπορούν να συνδέονται μεταξύ τους ανταλλάσσοντας πληροφορίες, όπως και να συνεργάζονται με ηλεκτρονικούς υπολογιστές.

### 2.3.2.5 Πλεονεκτήματα Προγραμματιζόμενου Λογικού Ελεγκτή

Η χρήση των PLC μας παρέχει πάρα πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τον κλασσικό αυτοματισμό.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των PLC έναντι του κλασσικού αυτοματισμού είναι:

1. Το κόστος κατασκευής ενός PLC είναι σημαντικά μικρότερο από το κόστος παραγωγής του αντίστοιχου αριθμού βοηθητικών ηλεκτρονόμενων, χρονικών, και απαριθμητών.

2. Ο χρόνος σχεδίασης και υλοποίησης του αυτοματισμού είναι μηδαμινός σε σχέση με την κατασκευή ενός κλασσικού πίνακα αυτοματισμού. Σημαντικά είναι και τα πλεονεκτήματα των PLC για τον απλό χρήστη:

- Ελαχιστοποίηση του κόστους συντήρησης του πίνακα αυτοματισμού.

Το κόστος αυτό αναλύεται ως εξής :

α) συχνότητα βλαβών

β) χρόνος εντοπισμού μιας βλάβης και αποκατάσταση της.

- Γρήγορη τοποθέτηση, εγκατάσταση και προγραμματισμός.

- Ευελιξία τροποποίησης της λειτουργίας και των παραμέτρων του

αυτοματισμού. Κάθε επιθυμητή αλλαγή στο πρόγραμμα του PLC, είναι εύκολη και γρήγορη, χωρίς να απαιτεί αλλαγή και επανατοποθέτηση εξαρτημάτων ή συνδέσεων. Δεδομένου της δυνατότητας προσομοίωσης που παρέχει, δεν απαιτεί την διακοπή της παραγωγικής διαδικασίας. Φυσικά το κόστος για κάθε αλλαγή του προγράμματος είναι μηδενικό.

- Δυνατότητα παρακολούθησης του προγράμματος σε πραγματικό χρόνο και κατά τη λειτουργία του αυτοματισμού.

- Επεκτασιμότητα της κεντρικής μονάδας του PLC για χρήση περισσότερων εξόδων – εισόδων, σε περίπτωση λάθους αρχικής εκτίμησης.

- Δυνατότητα χειρισμού εξ' αποστάσεως. Ο χρήστης μπορεί να ενημερώνεται μέσω δικτύου ή τηλεφωνικών συστημάτων για την κατάσταση του συστήματος ελέγχου αλλά και να ενεργεί σ' αυτό από μακριά.

- Μικρές διαστάσεις και απαιτήσεις σε χώρο.

- Μηδενικές απαιτήσεις συντήρησης ελλείψει μηχανικών επαφών

- Αξιοπιστία και δυνατότητα λειτουργίας σε βιομηχανικούς χώρους.

### **2.3.2.6 Σύγκριση Συστημάτων Ελέγχου με PLC και Μικροεπεξεργαστή**

Συγκρίνοντας τα plc με τους μικροεπεξεργαστές, προκύπτει ότι:

- Ο χρόνος ανάπτυξης και σχεδιασμού του μικροεπεξεργαστή είναι μεγαλύτερος σε σχέση με το PLC. Το PLC είναι ετοιμοπαράδοτη μονάδα και απαιτείται μόνο ο προγραμματισμός του αντίθετα με τον μικροεπεξεργαστή,

καθώς απαιτείται εξειδικευμένη κατασκευή περιφερειακού συστήματος για την μετατροπή του σε ολοκληρωμένη διάταξη.

- Το PLC δεν επηρεάζεται από ηλεκτρομαγνητικό "θόρυβο", μιας και είναι σχεδιασμένο για λειτουργία σε βιομηχανικές συνθήκες, σε αντίθεση με τον μικροεπεξεργαστή.

- Το λογισμικό του μικροεπεξεργαστή απαιτεί περιφερειακό σύστημα το οποίο αποτελείται από ηλεκτρονικά εξαρτήματα. Τα ηλεκτρονικά αυτά εξαρτήματα είναι επιρρεπή σε καταπονήσεις με πιθανό αποτέλεσμα την καταστροφή τους. Το PLC όμως δεν έχει τέτοιου είδους προβλήματα και παρουσιάζει υψηλή αξιοπιστία.

- Η κατασκευή του μικροεπεξεργαστή γίνεται βάσει των απαιτήσεων του χρήστη και πάντα ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Δεν είναι δυνατή η χρήση ενός συγκεκριμένου μικροεπεξεργαστή σε οποιαδήποτε εφαρμογή, γιατί αλλάζει ο σχεδιασμός του κυκλώματος. Κάθε εφαρμογή απαιτεί δικό της περιφερειακό σύστημα. Το PLC αντιθέτως, είναι σχεδιασμένο βάσει προτύπων της κατασκευαστικής εταιρίας και κάθε μοντέλο φέρει διαφορετικό αριθμό εισόδων / εξόδων είτε αναλογικών, είτε ψηφιακών. Έτσι ανάλογα με την εφαρμογή που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, επιλέγονται και συναρμολογούνται σε μηδενικό χρόνο οι πιθανές προεκτάσεις που μπορεί να χρειάζονται.

- Ένας μικροεπεξεργαστής βρίσκει χρήση σε αρκετές μικρές και απλές εφαρμογές, καθώς το κόστος αυτών είναι ικανοποιητικά χαμηλό σε σχέση με την τιμή αγοράς ενός PLC, εξετάζοντας βέβαια τη περίπτωση παραγωγής μικροεπεξεργαστών συγκεκριμένης εφαρμογής σε μεγάλη ποσότητα.

- Μειονέκτημα για έναν μικροεπεξεργαστή, αποτελεί το λογισμικό προγραμματισμού. Κάθε κατασκευαστική εταιρία χρησιμοποιεί διαφορετικό λογισμικό και γι' αυτό ο χρήστης απαιτείται να έχει τουλάχιστον μέτριες γνώσεις προγραμματισμού. Απ' την άλλη πλευρά ο προγραμματισμός ενός PLC διαφέρει ελάχιστα ανάλογα με το μοντέλο, παρόλα αυτά οι εντολές προγραμματισμού του PLC είναι κοινές, ενώ προσφέρεται η δυνατότητα και ενός ιδιαίτερα εύχρηστου προγραμματιστικού περιβάλλοντος χωρίς καν τη χρήση κώδικα με την μέχρι σήμερα γνωστή μορφή.

- Κοινό χαρακτηριστικό των δύο αυτών ειδών ελέγχου είναι η απαίτηση

περιφερειακών εξαρτημάτων. Και εδώ το PLC υπερέχει, αφού η τροποποίηση του συστήματος συνεπάγεται αλλαγή προγραμματιστικού κώδικα και σε ελάχιστες περιπτώσεις τροποποίηση του εξοπλισμού, με ελάχιστη χρονική καθυστέρηση και ιδιαίτερα μικρό κόστος. Αντιθέτως στον μικροεπεξεργαστή κάτι τέτοιο συνεπάγεται ανακατασκευή όλης της διάταξης.

- Τα βιομηχανικά PLC έχουν αντίστοιχες λειτουργίες με τους μικροεπεξεργαστές. Το κόστος όμως ενός PLC ( αυξημένων δυνατοτήτων ) είναι αρκετά υψηλότερο.

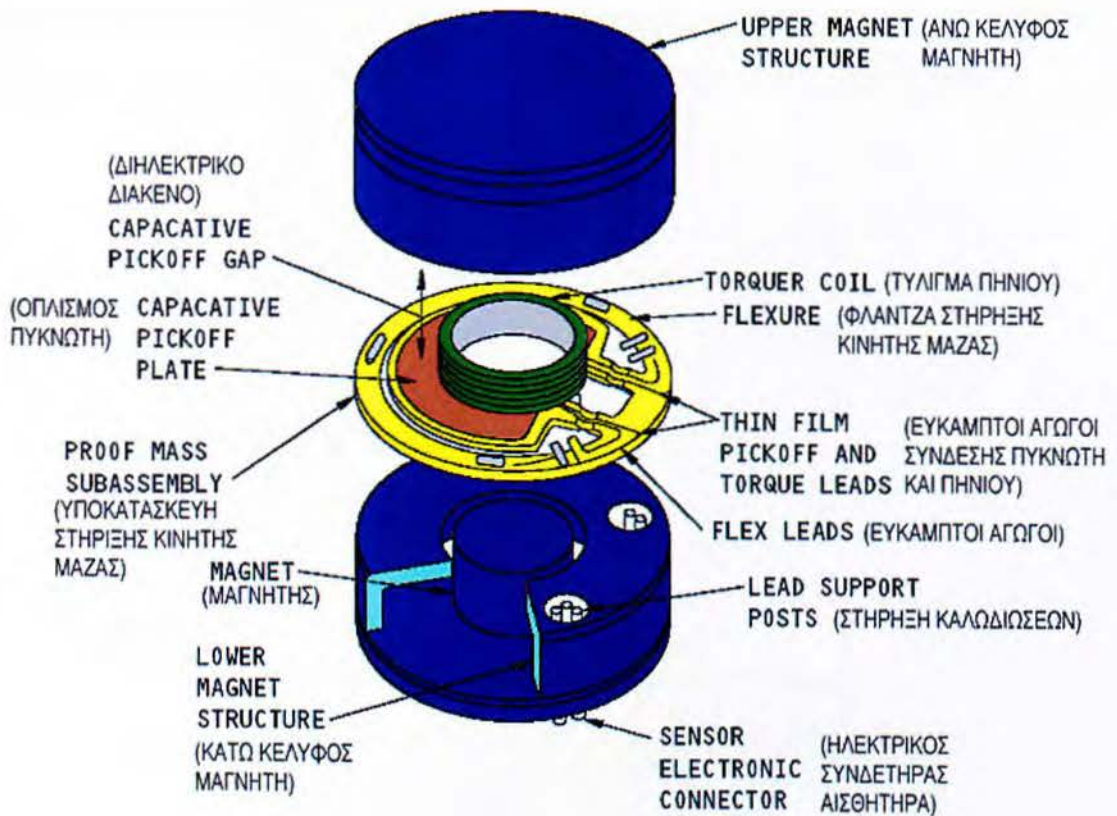
### **2.3.2.7 Επιλογή συστήματος ελέγχου**

Τελικό συμπέρασμα της σύγκρισης των δύο αυτών συστημάτων είναι η αξιοπιστία του PLC, χωρίς βέβαια να σημαίνει πώς ένας μικροεπεξεργαστής δεν είναι ικανός να φέρει εις πέρας την αποστολή του με σωστά αποτελέσματα, αν και πιθανότατα ο κατασκευαστής να αντιμετωπίσει μεγαλύτερες δυσκολίες. Σε θέματα όμως εφαρμογής βιομηχανικών προτύπων, το PLC είναι καλύτερο, οικονομικότερο, πιο ανθεκτικό, παρέχει δυνατότητες εύκολης τροποποίησης, χαρακτηρίζεται από εύκολο προγραμματισμό ακόμα και από χρήστες με περιορισμένες γνώσεις του αντικειμένου και ουσιαστικά αποτελεί μια συσκευή πιστοποιημένη και έτοιμη προς χρήση [4].



### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

#### 3.1 Χρήση επιταχυνσιόμετρου για τον περιορισμό των διαταραχών που επηρεάζουν την σωστή λειτουργία της ανεμογεννήτριας.

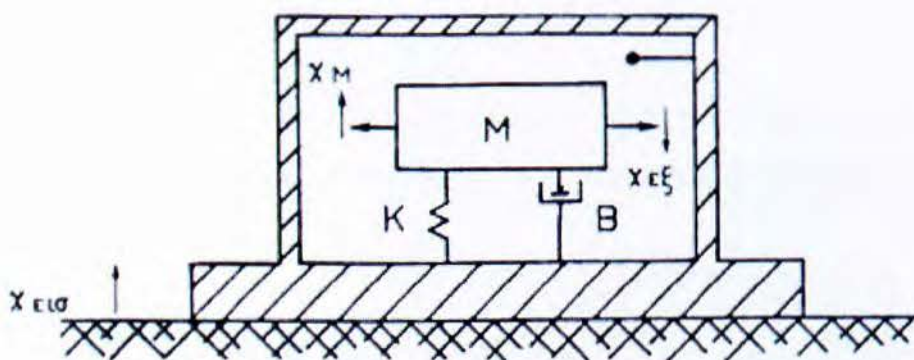


Το Επιταχυνσιόμετρο είναι μια ηλεκτρομηχανική συσκευή που έχει την ικανότητα να μετρά δυνάμεις επιτάχυνσης. Αυτές οι δυνάμεις μπορεί να είναι στατικές, όπως είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, ή δυναμικές όταν προκαλούνται – προέρχονται από αλλαγές στην ταχύτητα ή στην διεύθυνση της κίνησης (επιταχύνσεις, επιβραδύνσεις, στροφές).

Χρησιμοποιείται κυρίως σε αδρανειακά συστήματα πλοήγησης, που συνήθως αποκαλούνται Inertial Navigation System (INS), ή Inertial Reference System (IRS), ή Inertial Reference Unit (IRU), ή Air Data Inertial Reference

Unit (ADIRU), τα οποία συστήματα συνδιάζοντας την χρήση Επιταχυνσιόμετρων Γυροσκοπίων και ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, μπορούν να υπολογίζουν την θέση ενός οχήματος στον χώρο καθώς και την στάση και ταχύτητα αυτού με πολύ μεγάλη ακρίβεια, παράμετροι που είναι απολύτως απαραίτητοι για την λειτουργία του αυτόματου πιλότου και την ναυσιπλοοία αεροπλάνων πλοίων και υποβρυχίων. Το επιταχυνσιόμετρο χρησιμοποιείται επίσης για την μέτρηση και καταγραφή των επιταχύνσεων στους τρεις άξονες των αεροσκαφών από τον καταγραφέα των στοιχείων της πτήσης, χρησιμοποιείται για την ενεργοποίηση του αερόσακου στα αυτοκίνητα, και σε οποιαδήποτε άλλη εφαρμογή απαιτείται η μέτρηση της επιτάχυνσης [w2].

### 3.1.1 Μέτρηση επιτάχυνσης



Σχήμα 3.1.1 Βασικός τύπος επιταχυνσιόμετρου

Οι μετατροπείς που μετρούν επιτάχυνση καλούνται επιταχυνσιόμετρα. Ένας βασικός μετατροπέας αποτελείται από ένα περίβλημα το οποίο πακτώνεται στην επιφάνεια την επιτάχυνση της οποίας θέλουμε να μετρήσουμε. Μέσα στο περίβλημα υπάρχει ένα σώμα με μάζα  $M$  το οποίο στηρίζεται στο περίβλημα μέσω ενός ελατηρίου με σταθερά  $K$  και ενός αποσβεστήρα με σταθερά  $B$ . Ο αποσβεστήρας είναι ένα σύστημα που η δύναμη αντίδρασης του είναι ανάλογη της ταχύτητας μετατόπισης. Με  $x_{\epsilon\iota\sigma}$  συμβολίζεται η μετατόπιση του περιβλήματος, με  $x_{\epsilon\xi}$  η μετατόπιση του

σώματος μάζας  $M$  ως προς το περίβλημα και με  $x_M$  η μετατόπιση του σώματος μάζας  $M$  ως προς το σύστημα μεταφοράς.

Εύκολα αποδεικνύεται ότι ισχύει:

$$K \cdot x_{ε2} + B \frac{dx_{ε2}}{dt} = M \frac{d^2 x_M}{dt^2} \Rightarrow$$
$$K \cdot x_{ε2} + B \frac{dx_{ε2}}{dt} = M \left[ \frac{d^2 x_{ε1σ}}{dt^2} - \frac{d^2 x_{ε2}}{dt^2} \right]$$

Εφαρμόζοντας μετασχηματισμό Laplace προκύπτει:

$$\frac{X_{ε2}(s)}{X_{ε1σ}(s)} = \frac{s^2 \cdot M}{s^2 \cdot M + s \cdot B + K}$$

Θέτοντας  $\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}}$  και  $\zeta = \frac{B}{2\sqrt{K \cdot M}}$  προκύπτει:

$$\frac{X_{ε2}(s)}{X_{ε1σ}(s)} = \frac{s^2}{s^2 + s \cdot 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n + \omega_n^2}$$

με  $\omega_n$  η κυκλική φυσική συχνότητα και  $\zeta$  ο συντελεστής απόσβεσης του συστήματος

Αν θεωρηθεί σαν είσοδο του συστήματος η επιτάχυνση "γ" της επιφάνειας στήριξης αντί της μετατόπισης "x<sub>ε1σ</sub>" τότε εύκολα προκύπτει ότι:

$$\frac{X_{ε2}(s)}{\gamma(s)} = \frac{1}{s^2 + s \cdot 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n + \omega_n^2} \Rightarrow$$
$$\frac{X_{ε2}(\omega)}{\gamma(\omega)} = \frac{(1/\omega_n^2)}{(j\omega/\omega_n)^2 + 2 \cdot \zeta \cdot (j\omega/\omega_n) + 1}$$

Για  $\omega \ll \omega_n$  το κέρδος του συστήματος είναι σταθερό και ίσο με  $1/\omega_n^2$ . Επιπλέον η διαφορά φάσης μεταξύ εισόδου και εξόδου είναι περίπου ίση με  $0^\circ$ . Με άλλα λόγια η μορφή της εισόδου δεν παραμορφώνεται από το σύστημα, το οποίο σημαίνει ότι η έξοδος είναι ανάλογη της εισόδου και άρα προσφέρεται για μέτρηση. Για αυτό η περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας του είναι μεταξύ 0 Hz και μιας συχνότητας πολύ μικρότερης της φυσικής του συχνότητας. Όπως προκύπτει από την προηγούμενη εξίσωση για να έχει ένα

σύστημα μεγάλη ευαισθησία πρέπει η κυκλική φυσική συχνότητα του να είναι μικρή, το οποίο όμως περιορίζει τη περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας του.

Τα επιταχυνσιόμετρα διακρίνονται σε ανοικτού και κλειστού βρόγχου.

### **3.1.2 Επιταχυνσιόμετρα ανοικτού βρόγχου**

Η έξοδος των συστημάτων που περιγράφηκαν προηγούμενα είναι μία μετατόπιση. Για να υπάρξει ηλεκτρική έξοδος χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας θέσης, ο οποίος δίνει τάση εξόδου ανάλογη της μετατόπισης. Ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής του μετατροπέα θέσης, του ελατηρίου και του αποσβεστήρα, τα επιταχυνσιόμετρα ανοικτού βρόγχου διακρίνονται σε :

- Επιταχυνσιόμετρα με ποτενσιόμετρο.
- Επιταχυνσιόμετρα με μετατροπέα πιεζοαντίστασης (ελεύθερη ή προσκολλημένη).
- Επιταχυνσιόμετρα με γραμμικό μεταβλητό διαφορικό μετασχηματιστή (ΓΜΔΜ).
- Ημιαγωγικά επιταχυνσιόμετρα.
- Πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα.

#### **Επιταχυνσιόμετρα με ποτενσιόμετρο.**

Χρησιμοποιείται ένα ποτενσιόμετρο για τη μέτρηση της μετατόπισης της θέσης της μάζας ως προς το περίβλημα. Η αντίσταση στηρίζεται στο περίβλημα ενώ η κινητή επαφή παρασύρεται από την κίνηση της μάζας. Μετρούν επιταχύνσεις μέχρι μερικές δεκάδες g για συχνότητα μερικές δεκάδες Hz, έχουν ευαισθησία κάθετης διεύθυνσης περίπου  $\pm 1\%$  και ακρίβεια γύρω στο 1% πλήρους απόκλισης για θερμοκρασία γύρω στους 20ο C.

#### **Επιταχυνσιόμετρα με μετατροπέα πιεζοαντίστασης.**

Η πιεζοαντίσταση παίζει το ρόλο του ελατηρίου. Μετρούν επιταχύνσεις μέχρι μερικές εκατοντάδες g για συχνότητα εκατοντάδων Hz, έχουν ευαισθησία κάθετης διεύθυνσης περίπου  $\pm 2\%$  και ακρίβεια γύρω στο 1% πλήρους απόκλισης για θερμοκρασία γύρω στους 20ο C.

### Επιταχυνσιόμετρα με ΓΜΔΜ.

Χρησιμοποιούν γραμμικό μεταβλητό διαφορικό μετασχηματιστή (ΓΜΔΜ) για την μέτρηση της μετατόπισης, όπου τα πηνία συνδέονται με το περίβλημα και ο σπλισμός με τη μάζα. Μετρούν επιταχύνσεις μέχρι μερικές εκατοντάδες g για συχνότητα εκατοντάδων Hz, έχουν ακρίβεια γύρω στο 2% πλήρους απόκλισης και παρέχουν σχετικά υψηλή τάση εξόδου (έως και 1 V για συχνότητα 2 KHz).

### Ημιαγωγικά επιταχυνσιόμετρα.

Χρησιμοποιούν κάποιο ημιαγωγό για την μέτρηση της μετατόπισης ή της αδρανειακής δύναμης και μετρούν επιταχύνσεις μερικές εκατοντάδες g.

### Πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα.

Βασίζονται στη χρήση ενός πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου, πάνω στον οποίο τοποθετείται το σώμα μάζας M. Η κατασκευή γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε ο κρύσταλλος να βρίσκεται σε τάση ακόμη και για μηδενική επιτάχυνση. Με τον τρόπο αυτό δεν καταπονείται στον εφελκυσμό. Αν θεωρηθεί ως έξοδος του πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου η τάση "u" και ως είσοδο η μεταβολή "χ<sub>εξ</sub>" της διάστασης του κρυστάλλου κατά τη διεύθυνση μέτρησης τότε η συνάρτηση μεταφοράς του είναι :

$$\frac{U(s)}{X(s)} = \frac{K_k \cdot \tau \cdot s}{1 + \tau \cdot s}, \text{ όπου}$$

$\tau$  μια χρονική σταθερά και  $K_k$  η ευαισθησία

Με βάση τη μελέτη που έγινε για την μέτρηση της επιτάχυνσης προκύπτει:

$$\frac{U(s)}{\gamma(s)} = \frac{K_k \cdot \tau \cdot s}{(1 + \tau \cdot s) \cdot (s^2 + s \cdot 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n + \omega_n^2)} \Rightarrow$$
$$\frac{U(\omega)}{\gamma(\omega)} = \frac{(K_k \cdot \tau \cdot \omega / \omega_n^2)}{(1 + \tau \cdot j\omega) \cdot [(j\omega / \omega_n)^2 + 2 \cdot \zeta \cdot (j\omega / \omega_n) + 1]}$$

Τα πλεονεκτήματα των πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων είναι:

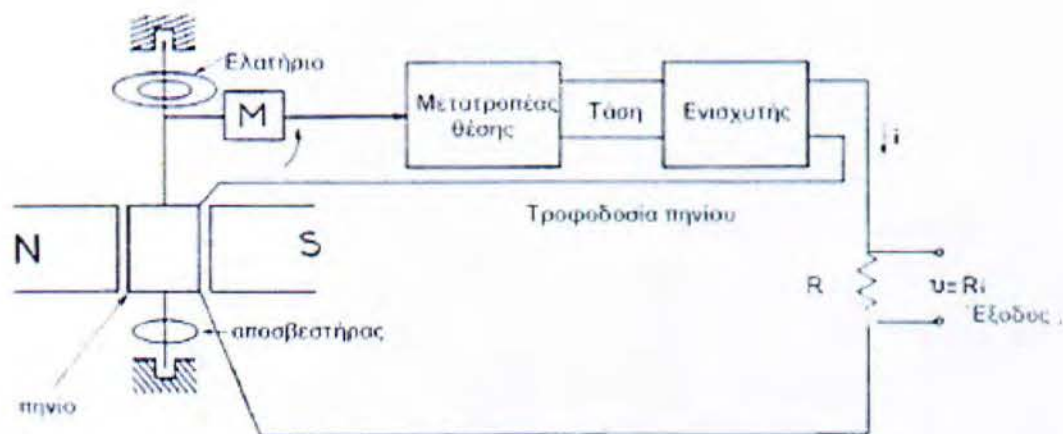
- Μεγάλη τάση εξόδου

- Μεγάλη φυσική συχνότητα  $\omega_n$  που τα καθιστά ιδανικά για μετρήσεις επιταχύνσεων που περιέχουν υψηλές αρμονικές.
- Υπάρχουν πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα με πολύ μικρό όγκο και βάρος.
  - Η ευαισθησία τους φτάνει και μέχρι 100 mV / g.
  - Η ευαισθησία κάθετης διεύθυνσης είναι περίπου 5 %
  - Η μεταβολή της ευαισθησίας λόγω θερμοκρασίας είναι γύρω στα 10% για ακραίες θερμοκρασίες λειτουργίας.
  - Η περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας μπορεί να φτάσει μερικές δεκάδες ΚHz.
  - Η ακρίβεια τους είναι της τάξης του 1% της πλήρους κλίμακας.
  - Οι μέγιστες ενδείξεις των πιεζοηλεκτρικών επιταχυνσιομέτρων είναι έως μερικές χιλιάδες g.

Το μειονέκτημα τους είναι η αδυναμία να μετρήσουν σταθερή επιτάχυνση.

Σημαντική παράμετρος επιλογής αποτελεί η ευαισθησία κάθετης διεύθυνσης που παρουσιάζει το επιταχυνσιόμετρο σε επιταχύνσεις κάθετες προς τη διεύθυνση λειτουργίας του.

### 3.1.3 Επιταχυνσιόμετρα κλειστού βρόγχου

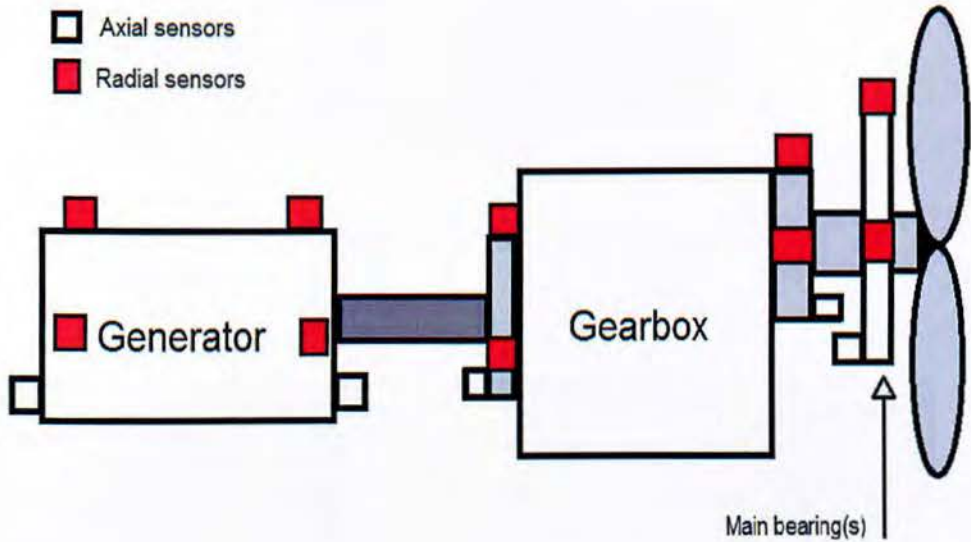


Σχήμα 3.1.2 Αρχή λειτουργίας ενός επιταχυνσιόμετρου κλειστού βρόγχου

Τα συγκεκριμένα επιταχυνσιόμετρα διαθέτουν μεγαλύτερη ακρίβεια από τα επιταχυνσιόμετρα ανοικτού βρόγχου. Δεν διαθέτουν ελατήριο ή άλλο ελαστικό υλικό, αλλά μόνο μια μάζα "M" πάνω στην οποία όταν εμφανιστεί επιτάχυνση  $\gamma$ , ασκείται μια αδρανειακή δύναμη  $F = M \cdot \gamma$ , η οποία τείνει να κινήσει την μάζα. Η μετακίνηση αυτή μετρίεται με κάποιο μετατροπέα θέσης και μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα ανάλογου μεγέθους, το οποίο ενισχύεται και τροφοδοτεί ένα ηλεκτρομηχανικό μετατροπέα εξόδου. Η δύναμη που προκύπτει εφαρμόζεται στη μάζα και εξισορροπεί την αδρανειακή δύναμη. Το ρεύμα που τροφοδοτεί τον ηλεκτρομηχανικό μετατροπέα εξόδου έχει ένταση ανάλογη της επιτάχυνσης. Σημειώνεται ότι το ρόλο του ελατηρίου παίζει η μαγνητική ροπή. Αποτέλεσμα της μη ύπαρξης του ελατηρίου είναι η καλύτερη γραμμικότητα του συστήματος.

Τα επιταχυνσιόμετρα αυτά έχουν περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας μέχρι 100 Hz και μετρούν επιταχύνσεις από μερικά g έως αρκετές δεκάδες g. Η τάση εξόδου για μέγιστη επιτάχυνση είναι γύρω στα  $\pm 7.5V$ . Η ευαισθησία που παρουσιάζουν στη κάθετη διεύθυνση είναι συνήθως 0.01-0.1% ενώ η ακρίβεια είναι καλύτερη από 0.1% της πλήρους κλίμακας. Η επίδραση της θερμοκρασίας στην ευαισθησία είναι μικρή (0.02% / °C). Σημαντικό στοιχείο είναι ότι το βάρος του είναι μερικές δεκάδες γραμμάρια [6].

### 3.1.4 Επιταχυνσιόμετρα χαμηλής συχνότητας.



Σχήμα 3.1.3 Ανεμογεννήτρια οριζώντιου άξονα με επιταχυνσιόμετρα.

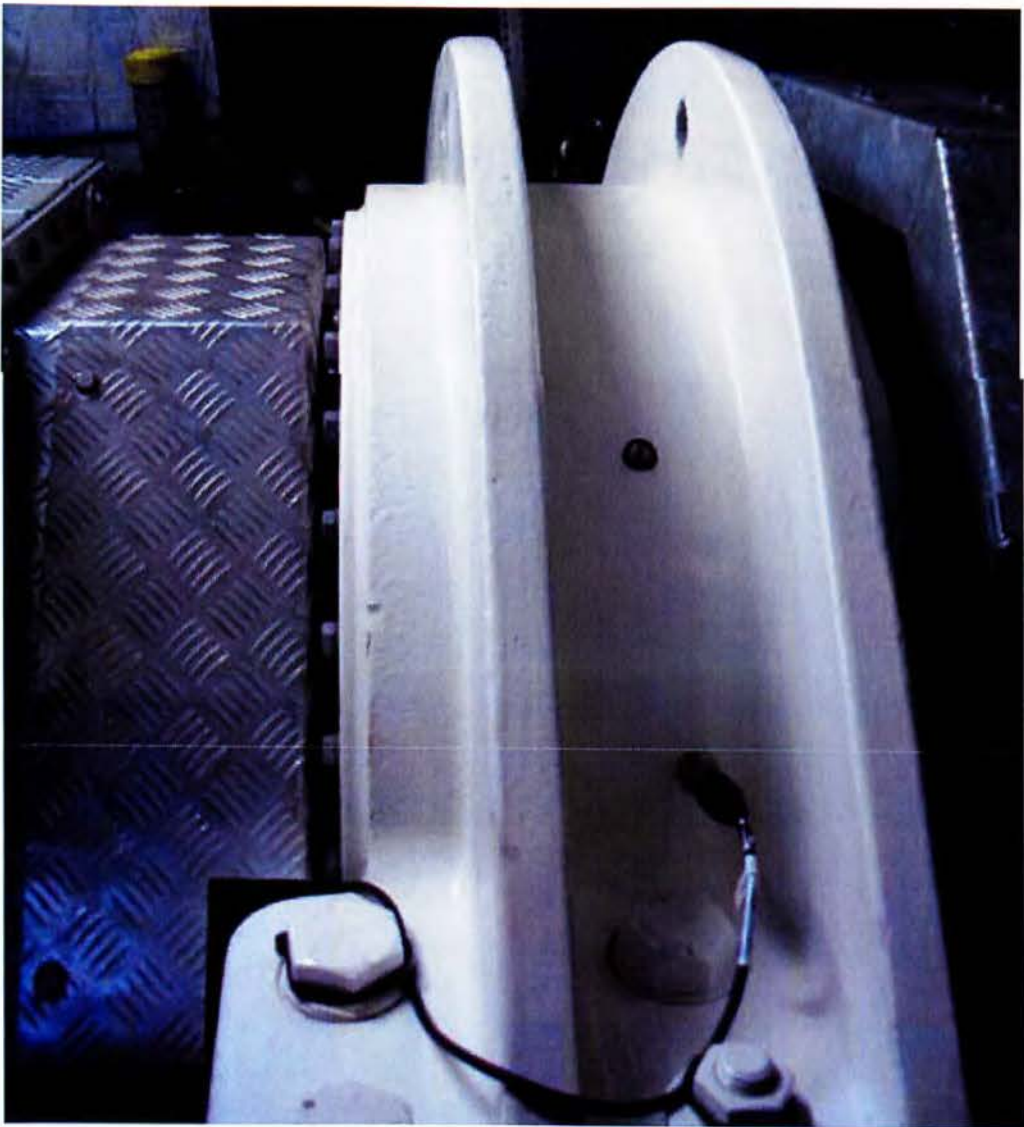
Τα κύρια ρουλεμάν και ο άξονας του ρότορα στρέφονται με λιγότερο από 30 rpm. Αυτή είναι και η ταχύτητα περιστροφής στην είσοδο του άξονα του κιβωτίου ταχυτήτων. Σε περίπτωση που έχουμε συχνότητα περιστροφής κάτω από 30 rpm ( 0.5 Hz) θα πρέπει να χρησιμοποιούνται χαμηλής συχνότητας επιταχυνσιόμετρα. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε τη δυνατότητα να ελέγχουμε τη συχνότητα περιστροφής του κύριου άξονα, τη συχνότητα διέλευσης της πτερωτής, τη συχνότητα περιστροφής των κυρίως ρουλεμάν, τη συχνότητα περιστροφής του άξονα στην είσοδο του κιβωτίου ταχυτήτων καθώς και τη συχνότητα της ταχύτητας του πλέγματος.

Αυτά τα χαμηλής συχνότητας επιταχυνσιόμετρα συνήθως παρέχουν 500 mV/g και μια συχνότητα εύρους από 12 έως 180.000 rpm ( 0.2 - 3000 Hz).





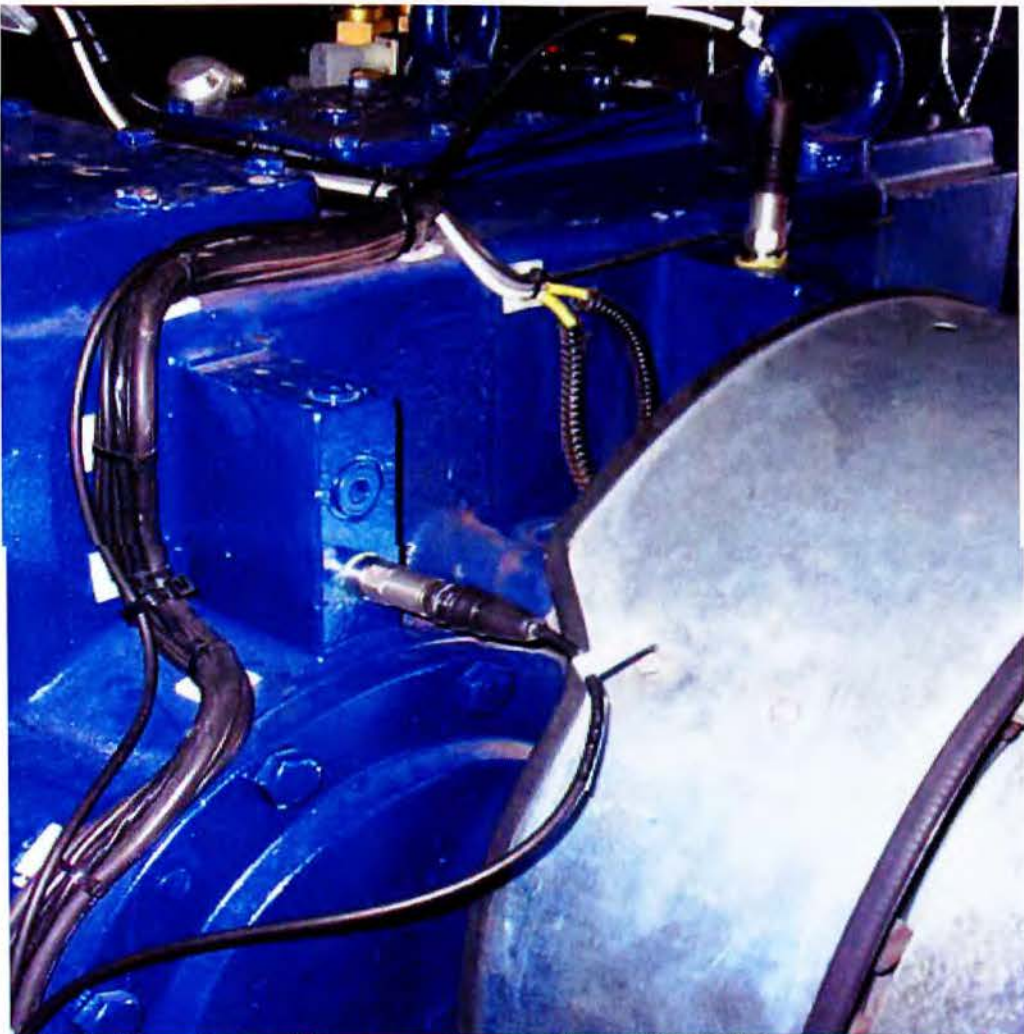
Σχήμα 3.1.4 Επιταχυνσιόμετρα χαμηλής συχνότητας.



Σχήμα 3.1.5 Χαμηλής συχνότητας επιταχυνσιόμετρο τοποθετημένο στο κυρίως ρουλεμάν του οριζόντιου άξονα.

### **Επιταχυνσιόμετρα γενικού σκοπού.**

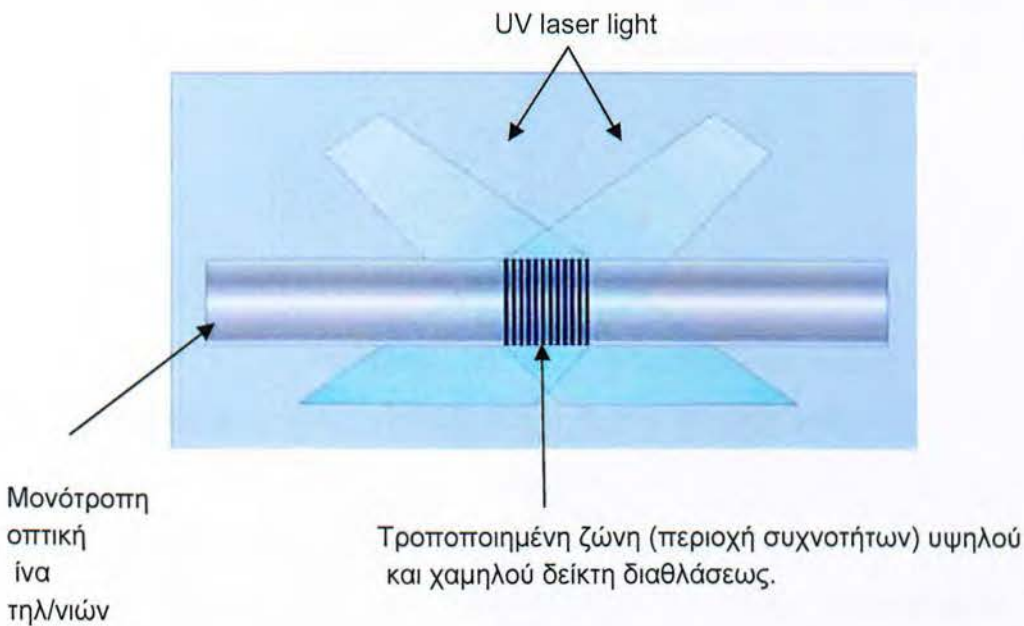
Ο ενδιάμεσος άξονας και η έξοδος του άξονα του κιβωτίου ταχυτήτων θα έχουν μεγαλύτερες ταχύτητες περιστροφής και θα παράγουν υψηλότερες συχνότητες διαταραχής συγκριτικά με τα ρουλεμάν και τη ταχύτητα του πλέγματος. Η έξοδος του κιβωτίου ταχυτήτων περιστρέφεται συνήθως 50 - 60 φορές γρηγορότερα από την είσοδο του άξονα. Ως αποτέλεσμα αυτών των αυξανόμενων ταχυτήτων περιστροφής του κιβωτίου ταχυτήτων και της γεννήτριας, ένα γενικού σκοπού επιταχυνσιόμετρο θα λειτουργεί κατάλληλα. Τα γενικού σκοπού επιταχυνσιόμετρα συνήθως παρέχουν 100 mV/g και το εύρος συχνοτήτων τους κυμαίνεται από 30 έως 900.000 rpm (0.5 - 15.000 Hz) [w1].



3.1.5 Αξονικά και κάθετα γενικού σκοπού επιταχυνσιόμετρα τοποθετημένα στο κιβώτιο ταχυτήτων [w1].

### 3.2 Οπτικοί αισθητήρες φορτίων τεχνολογίας FBG

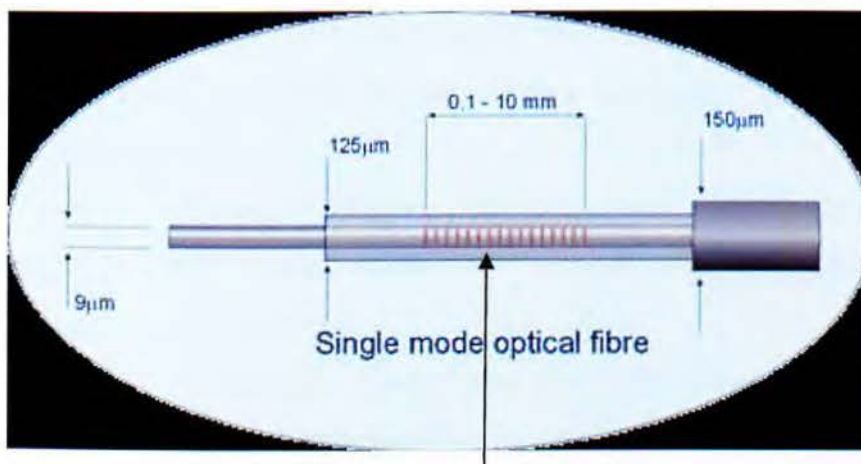
Η απλή μονότροπη τηλεπικοινωνιακή οπτική ίνα εκτίθεται σε συγκλίνουσες δέσμες UV laser light. Οι δέσμες αυτές όταν διασταυρώνονται παρεμβάλλει η μια την άλλη, μεταβάλλουν μέρος της δομής της οπτικής ίνας και αλλάζουν περιοδικά τον δείκτη διάθλασης δημιουργώντας διαφορετικές περιοχές υψηλού και χαμηλού δείκτη διαθλάσεως στον πυρήνα της ίνας.



#### 3.2.1 Αρχή λειτουργίας

Η τροποποιημένη ζώνη της ίνας λειτουργεί σαν οπτικό φίλτρο, αντανακλώντας μια ελάχιστη ποσότητα του ευρυζωνικού σήματος, επιτρέποντας παράλληλα στο υπόλοιπο φως να συνεχίσει την πορεία του μέσα στην ίνα.

Αυτή η τροποποιημένη περιοχή είναι ευαίσθητη στην τάση εφελκυσμού και στις μεταβολές θερμοκρασίας.

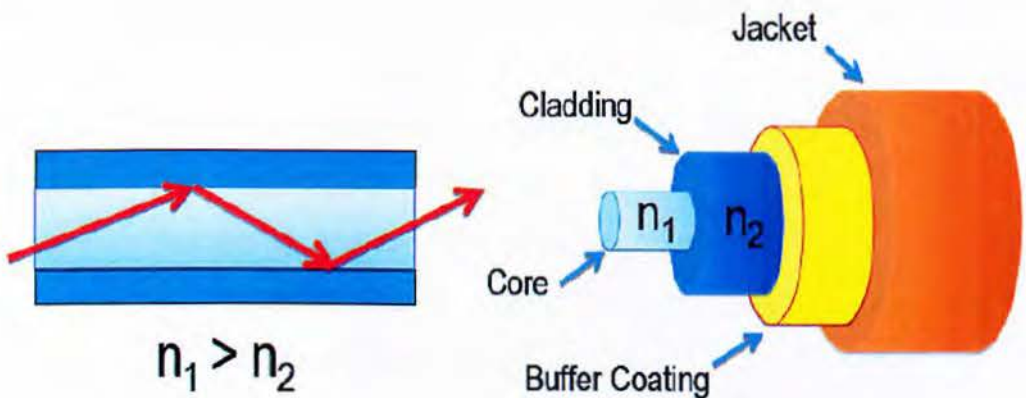


Σχήμα 3.2.1 Περιοχή τροποποίησης υψηλού και χαμηλού δείκτη διαθλάσεως.

### 3.2.2 Βασικά πλεονεκτήματα

- Απρόσβλητοι στις ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες : Οι αισθητήρες δεν επηρεάζονται από την ύπαρξη ΗΜ πεδίων.
- Μηδενική ενέργεια: Οι αισθητήρες δεν χρειάζονται ηλεκτρικό ρεύμα.
- Μακροχρόνια σταθερότητα: Δεν εμφανίζονται αλλαγές στα χαρακτηριστικά τους, γεγονός που τους κάνει κατάλληλους για μακροχρόνιες μετρήσεις χωρίς ανάγκες για καλιμπράρισμα.
- Ευκολία και κόστος εγκατάστασης: Συστοιχίες πολλαπλών οπτικών αισθητήρων είναι εύκολο να εγκατασταθούν με χαμηλό κόστος.
- Ενσωμάτωση σε συνθετικά υλικά: Διαστάσεις αισθητήρων και υλικά συμβατά με τα περισσότερα συνθετικά υλικά και διαδικασίες παραγωγής
- Μέγεθος αισθητήρα: Μικροσκοπικοί αισθητήρες επιτρέπουν πυκνές μετρήσεις
- Αντοχή στο χρόνο: Δεν έχει παρατηρηθεί αλλοίωση ή διάβρωση των αισθητήρων που ενσωματώνονται σε διάφορες δομές με την πάροδο του χρόνου.

- Δυνατότητα πολυπλεξίας: Εκατοντάδες μετρήσεις δύναται να καταγραφούν σε ελάχιστες ίνες και να πραγματοποιηθούν από ένα και μόνο μηχάνημα.
- Παρακολούθηση από απόσταση: Η παρακολούθηση μπορεί να γίνει πολλά χιλιόμετρα μακριά από την υπό εξέταση κατασκευή χωρίς ενίσχυση.
- Λειτουργιά: Δυνατότητα μέτρησης πολλαπλών μεγεθών (τάση εφελκυσμού, θερμοκρασία, επιτάχυνση, πίεση) σε μια και μόνο ίνα.



Σχήμα 3.2.2 Σχηματική αναπαράσταση οπτικής ίνας.

### 3.2.3 Συμβατικοί αισθητήρες

Μειονεκτήματα συμβατικών αισθητήρων

- Ευαίσθητα σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία
- Ευαίσθητα σε δονήσεις
- Απαιτείται ειδική ρύθμιση σε εξειδικευμένο προσωπικό
- Αδυναμία πραγματοποίησης δυναμικών μετρήσεων
- Υψηλό κόστος τοποθέτησης
- Χρειάζονται συντήρηση
- Διαβρώνονται
- Απαιτούν ηλεκτρικό ρεύμα

- Ευαίσθητα στις θερμοκρασιακές μεταβολές
- Αδυναμία πολυπλεξίας

### **3.2.3 Κίνητρο για την χρησιμοποίηση των οπτικών αισθητήρων φορτίων τεχνολογίας FBG σε ανεμογεννήτριες:**

- Ένας μεγάλος αριθμός ελίκων και πύργων πέφτουν στις ΗΠΑ κάθε χρόνο.
- Το κλείσιμο της τουρμπίνας σε περιόδους πολύ ισχυρών ανέμων προστατεύει την ανεμογεννήτρια αλλά μειώνει τις δυνατότητες λειτουργίας.
- Κεραυνοί και ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές EMI επηρεάζουν τους συμβατικούς αισθητήρες.
  - Μεγάλα strains σε σύνθετα υλικά
  - Η παρακολούθηση θα βοηθήσει στη μείωση σε λειτουργικά κόστη και θα αυξήσει την παραγωγή.
- Η εγκατάσταση διαρκεί 4 ώρες, ενώ απαιτούνται 4 μέρες με συμβατικούς αισθητήρες.
- Το βάρος των οπτικών καλωδίων είναι το 6% των καλωδίων χαλκού [5].

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1]. Παναγιώτης Πατής: << ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ, ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΠΑΡΚΩΝ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΣΤΕΡΕΑ ΕΛΛΑΔΑ >> , Πτυχιακή εργασία, Ανώτατο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Κρήτη 2010.

[2]. Κωνσταντίνου Εμμανουήλ Περάκη: << ΜΕΛΕΤΗ, ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΙΚΡΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ >>, Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 2010.

[3]. Διονύσιος Μαρούδας: << ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕ ΑΜΔΤ (ΑΣΥΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ) >>, Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 2008.

[4]. Δημόπουλος Ανδρέας, Αλεξάκης Μανώλης: << ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ 5 KW >>, Πτυχιακή εργασία, Ανώτατο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Κρήτη 2008.

[5]. Stavros Habakis, H+S Technology Solutions S.A. << ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΕΝΟΡΓΑΝΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ >>, Διάλεξη, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας, Αθήνα 2010.

[6]. Στυλιανός Ανέστης: << ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ >>, ΑΘΗΝΑ 2010

[7]. Γεώργιος Κωσταντόπουλος : << ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ >>, Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 2009.

[w1].<http://www.ctconline.com/pdf/pubTechPapers/17Accelerometers%20for%20Wind%20Turbines.pdf>

"Μελέτη ηλεκτρομηχανικού κυκλώματος και συστημάτων ελέγχου ανεμογεννήτριας"

[w2]. [http://www.k-makris.gr/AircraftComponents/Accelometer/accel\\_gr.htm](http://www.k-makris.gr/AircraftComponents/Accelometer/accel_gr.htm)

ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ  
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ