

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΤΟΜΕΑΣ: ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Διπλωματική Εργασία

της φοιτήτριας του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής

και Διοίκησης

ΑΝΑΣΤΑΣΑΚΗ ΜΑΡΙΑΣ-ΣΤΥΛΙΑΝΗΣ

του Γεωργίου

Αριθμός Μητρώου : 2005010020

Θέμα :

«ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΕ ΜΑΤLAMB-SIMULINK»

Επιβλέπων: ΠΟΥΛΙΕΖΟΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ

Χανιά, Ιούλιος 2012



www.shutterstock.com · 92252557

Οι Ανεμογεννήτριες στα χέρια του επιχειρηματία

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Πουλιέζο Αναστάσιο για την πολύτιμη βοήθεια του, χωρίς την οποία θα ήταν αδύνατη η εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής εργασίας στο προβλεπόμενο χρονικό διάστημα.

Χανιά, Ιούλιος 2012

Αναστασάκη Μαρία-Στυλιανή

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή
1.1 Ενέργεια και ανάπτυξη8
1.2 Η Ενέργεια και ο Κόσμος8
1.3 Η αυξανόμενη ανάγκη για Ενέργεια9
1.4 Βαδίζοντας στον 21ο αιώνα11
1.5 Πηγές Ενέργειας15
Κεφάλαιο 2 : Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας
2.1 Τι είναι οι ΑΠΕ και ποια η σημασία τους16
2.2 Ευρωπαϊκές εξελίξεις και εθνική στρατηγική στον τομέα των ΑΠΕ22
Κεφάλαιο 3 : <i>Αιολική Ενέργεια</i>
3.1 Ορισμός και σημασία της Αιολικής Ενέργειας28
3.2 Η Αιολική Ενέργεια στο Διεθνή Χώρο29
3.2.1 Η κατάσταση στην Ευρώπη και στην Ελλάδα32
3.3 Ανεμογεννήτριες42
3.3.1 Είδη Ανεμογεννητριών43
3.3.2 Μέρη Α/Γ οριζόντιου άξονα48
3.3.3 Παραγωγική διαδικασία50
3.3.4 Μειονεκτήματα-Πλεονεκτήματα Α/Γ51
3.3.5 Μοντέλο Δανίας-Καλιφόρνιας52
3.3.6 Τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα των Α/Γ53
3.3.7 Εταιρείες κατασκευής Α/Γ54
3.3.8 Λειτουργικοί κίνδυνοι Ανεμογεννητριών55
Κεφάλαιο 4 : Κώδικες Μοντελοποίησης
4.1 Εισαγωγή58
4.2 Μοντελοποίηση Ανεμογεννήτριας58

4.3 Περιγραφή του FAST	59
4.4 Μοντελοποίηση συγκεκριμένων υποσυστημάτων στο FAST	62
4.4.1 Λεπίδες και Πύργος	62
4.4.2 Μετάδοση κίνησης	63
4.4.3 Γεννήτρια	63
4.4.4 Αεροδυναμική	64
4.4.5 Αριθμητικές μέθοδοι	64
4.5 Γραμμικά Μοντέλα FAST	65
4.5.1Γενική περιγραφή του χώρου κατάστασης	65
4.5.2 Προσομοίωση ελεγκτών	66
4.5.3 Έλεγχος κλίσης πτερυγίων	70
4.5.4 Πλήρες μοντέλο	72
4.5.5 Έλεγχος κλίσης	74
Κεφάλαιο 5 : Έλεγχος συστήματος κλίσης πτερυγίων	
5.1 Περιγραφή της Α/Γ CART	77
5.2 PID Ελεγκτής	84
5.2.1 Γενικά χαρακτηριστικά	84
5.2.2 Επίδραση των ελεγκτών Ρ,Ι,D στην τελική απόκριση του συστήματο	ις85
5.3.2 Χρήση των PID ελεγκτών στην ευρύτερη αγορά των ανεμογεννητρι	ών86
5.3 Έλεγχος εκτροπής(YAW)	86
Κεφάλαιο 6: Προσομοιώσεις	
6.1 Εγκατάσταση και Προσομοίωση του συστήματος	89
6.2 Μοντελοποίηση Α/Γ CART με χρήση Simulink	94
6.3 Αποτελέσματα της προσομοιωσης	96

Συμπεράσματα	
Βιβλιογραφία	

ρ άρτημα 106



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ

Η ενέργεια αποτελεί κομβικό σημείο στο θέμα της ανάπτυξης, επειδή ακριβώς αλληλεπιδρά και με τους τρεις βασικούς άξονές της: την κοινωνία, το περιβάλλον και την οικονομία.

Η κοινωνική διάσταση της ενέργειας προσδιορίζεται από το γεγονός ότι η ενέργεια αποτελεί προϋπόθεση άνετης και αξιοπρεπούς διαβίωσης, ενώ η έλλειψή της παράγοντα κοινωνικής ανισότητας ιδιαίτερα σε χώρες του τρίτου κόσμου.

Στον τομέα του περιβάλλοντος είναι περισσότερο από προφανής η σημαντική περιβαλλοντική πίεση από κάθε είδους ενεργειακές δραστηριότητες.

Τέλος στον τομέα της οικονομίας η ενέργεια αποτελεί σημαντικό παράγοντα μακροοικονομικής ανάπτυξης.

1.2 Η ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ Ο ΚΟΣΜΟΣ

Η Ενέργεια ,ως επιστημονική έννοια, δεν είναι ευρύτερα κατανοητή. Απόδειξη, πως κανένας από τους ορισμούς, που της έχουν αποδοθεί, δεν είναι καθολικά αποδεκτός.

Σε ενίσχυση τούτου παρατίθενται τα λόγια του Richard Feynman, όπως αυτά καταγράφονται στο βιβλίο του «Lectures on Physics» –(Vol I):

«Είναι σπουδαίο να αντιληφθούμε ότι στη Φυσική σήμερα δεν έχουμε γνώση του τι είναι ενέργεια. Η ενέργεια είναι κάτι το αφηρημένο, επειδή δε μας λέει το μηχανισμό ή τις αιτίες για τους διάφορους τύπους, που αντιστοιχούν στις διαφορετικές μορφές τις οποίες μπορεί να πάρει».

Όμως, ενώ δεν μπορούμε να συμφωνήσουμε σε κάποιον ορισμό για την ενέργεια, εκείνο, που γίνεται από όλους αποδεκτό, είναι το γεγονός ότι για οτιδήποτε θέλουμε να κάνουμε στον κόσμο μας είναι απαραίτητο να ξοδέψουμε ενέργεια. Χρειαζόμαστε περισσότερο από 100 W ελάχιστης κατανάλωσης για κάθε άτομο ή

400W τροφοδοσίας για το σπίτι μας για να διατηρήσουμε ως έχει τον τρόπο ζωής μας. Αποδεικνύεται ότι τα νοικοκυριά ενός έθνους είναι υπεύθυνα για το ένα τέταρτο της ενεργειακής χρήσης του, με τη μεταφορά και τη βιομηχανία καθεμιά υπεύθυνες χωριστά για το άλλο ένα τρίτο. Ο κατάλογος των ενεργειακών καταναλωτών συμπληρώνεται από τις επιχειρήσεις, την υποδομή και τη γεωργία.

Ευτυχώς δεν είναι απαραίτητο να καταφύγουμε στην εργασία σκλάβων για να παράγουμε ενέργεια. Αντί γι αυτό, σύμφωνα με τις βασικές στατιστικές 2008 Παγκόσμιας Ενέργειας, της Διεθνούς Υπηρεσίας Ενέργεια, σχεδόν 81% των ενεργειακών αναγκών μας καλύπτονται από τη χημική ενέργεια, που εμπεριέχεται στα απολιθωμένα καύσιμα : πετρέλαιο, φυσικό αέριο και άνθρακα. Πρόκειται για την ηλιακή ενέργεια, που έχει απορροφηθεί από τα φυτά που αναπτύχθηκαν εκατομμύρια χρόνια πριν. Όταν τα φυτά πεθαίνουν και θάβονται κάτω από νέα στρώματα γης, η υπόγεια θερμότητα και πίεση μετατρέπουν τα νεκρά κύτταρα σε πολύ πλούσια σε ενέργεια μόρια.

Η παραγωγή των παγκόσμιων ενεργειακών αναγκών καλύπτεται σε κατά προσέγγιση ίσες ποσότητες από το πετρέλαιο, τον άνθρακα και το φυσικό αέριο, με το πετρέλαιο να έχει ίσως την πιο ορατή χρήση από τα τρία, δεδομένου ότι η κίνηση όλων των μέσων μεταφοράς βασίζεται στα καύσιμα που παράγονται από το αυτό. Η ενέργεια που παράγεται από την καύση ενός τυποποιημένου βαρελιού πετρελαίου χωρητικότητας 159 λίτρα, ανέρχεται σε 6100MJ με την αξία του βαρελιού να κυμαίνεται το προηγούμενο έτος μεταξύ 30 και 150 ευρώ Αν αναλογιστούμε πως για να αποδεσμευθεί το παραπάνω ποσό ενέργειας, ένας άνθρωπος θα έπρεπε να εργαστεί σκληρά επί 22000 ώρες, που αντιστοιχούν σε 11 χρόνια καθημερινής εργασίας από τις 9π.μ έως τις 5μ.μ, αντιλαμβανόμαστε πόσο ουτοπικό είναι το να βρεθεί κάποιος που να θέλει να δουλέψει τόσες ώρες και τόσο σκληρά γι' αυτό το ποσό χρημάτων.

1.3 Η ΑΥΞΑΝΟΜΕΝΗ ΑΝΑΓΚΗ ΓΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Ένας Αμερικανός πολίτης χρησιμοποιεί 7,4 τόνους πετρελαίου ετησίως, ένας Ευρωπαίος 3,7 τόνους και ένας Κινέζος 1,3 τόνους. Να σημειωθεί πως κατά τη διάρκεια αυτού του αιώνα η Κίνα, η Ινδία και άλλα αναπτυσσόμενα κράτη αναμένεται να αυξήσουν το πληθυσμιακό τους μέγεθος και η ενεργειακή τους κατανάλωση ανά κάτοικο να έρθει στα ευρωπαϊκά επίπεδα κατανάλωσης. Το 2006 η Ευρωπαϊκή Ένωση χρησιμοποίησε 49,2 ΤJ, που ακόμα και αν μοιραστούν σε πάνω από 500 εκατομμύρια Ευρωπαίων, η ετήσια κατανάλωση ενέργειας για μας είναι τεράστια: 95800MJ για καθέναν από μας (περίπου 16 βαρέλια πετρέλαιο).Το σύνολο της Ευρώπης, μόνο για να ικανοποιήσει την ετήσια ευρωπαϊκή ζήτηση για ενέργεια, θα έπρεπε να κάψει ισοδύναμο 1176 εκατομμυρίων τόνων αργού πετρελαίου για να απελευθερωθεί τόσο μεγάλη ποσότητα ενέργειας, ικανή να καλύψει μια λίμνη 20 μέτρων βάθους και 20 επί 30 χιλιομέτρων πλάτους.

Το ίδιο έτος (2006) οι ΗΠΑ χρησιμοποίησαν ισοδύναμο 2340 εκατομμυρίων τόνων αργού πετρελαίου και η Κίνα 1717 εκατομμύρια τόνους.

Κάθε χρόνο 3500 πετρελαιοφόρα μεταφέρουν 2 δισεκατομμύρια τόνους πετρελαίου σε όλη την υδρόγειο, ενώ υπάρχουν και οι αγωγοί που μεταφέρουν ένα άλλο μέρος αυτού του φορτίου. Το 2006 η υφήλιος χρησιμοποίησε 3481 εκατομμύρια τόνους πετρελαίου, παρέχοντας το 43% της παγκόσμιας ζήτησης ενέργειας.

Πρόκειται για τεράστια νούμερα χωρίς πιθανότητα μείωσης στο μέλλον Σύμφωνα με πρόχειρες εκτιμήσεις, το 2100 ο κόσμος θα χρειαστεί τέσσερις φορές το ποσό ενέργειας που χρησιμοποιεί σήμερα.

Η σημερινή παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας ανέρχεται σε 10 δις τόνους ισοδύναμου πετρελαίου με κυρίαρχες πηγές τα ορυκτά καύσιμα τα οποία καλύπτουν περισσότερο από το 80% της παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης(σχήμα 1.1).



* In this report, global small hydropower data include plants of less than 10 MW in size. For further information on the treatment of hydropower in this report, see Endnote 2.

Σχήμα 1.1

Ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας παρέχει το μοντέλο μελλοντικής χρήσης της ενέργειας. Στο World Energy Outlook 2008, υπολογίζεται η ενέργεια που θα

παράγεται από διάφορες πηγές το 2015 και το 2030.Η στήλη ποσοστών δεξιά (γράφημα 1.1) δείχνει πόσο η συνεισφορά της κάθε πηγής αυξάνεται ετησίως από το 2006 έως το 2030. Ο άνθρακας γίνεται όλο και πιο σημαντικός και οι βιώσιμες πηγές ενέργειας παρουσιάζουν τον υψηλότερο ρυθμό ανάπτυξης:



Πηγή: Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας World Energy Outlook 2008

Γράφημα 1.1: Η αυξανόμενη ανάγκη για ενέργεια

Σε κάθε περίπτωση η ενέργεια στο μέλλον θα καθοριστεί από την ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού, τις περιβαλλοντικές μεταβολές και την ωρίμανση των νέων τεχνολογιών.

1.4 ΒΑΔΙΖΟΝΤΑΣ ΣΤΟΝ 21⁰ ΑΙΩΝΑ

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει η ανθρωπότητα σήμερα είναι η απουσία πρόσβασης σε καθαρή και αξιόπιστη ενέργεια, που είναι απαραίτητη για βασικές ανάγκες, όπως το καθαρό νερό, η υγειονομική περίθαλψη, η θέρμανση και ο φωτισμός.

Δεν πρέπει όμως οι ανάγκες σε ενέργεια των αναπτυσσόμενων χωρών να καλυφθούν από τη χρήση ορυκτών καυσίμων, όπως το κάρβουνο και το πετρέλαιο, αφού αυτά ευθύνονται για τις κλιματικές αλλαγές, οι οποίες θα έχουν τις πιο καταστροφικές επιπτώσεις στα φτωχότερα κράτη και επιπλέον ενισχύουν την οικονομική εξάρτηση των κρατών αυτών από εισαγόμενες πηγές ενέργειας.

Η μεγάλη εξάρτηση της παγκόσμιας οικονομίας από το πετρέλαιο σε συνδυασμό με το γεγονός ότι τα παγκόσμια αποθέματα του συγκεκριμένου καυσίμου είναι συγκεντρωμένα σε λίγες μόνο χώρες καθιστά εξαιρετικά ευαίσθητες τις ισορροπίες για την ειρήνη με τον κίνδυνο των συγκρούσεων να ελλοχεύει σε όλα τα επίπεδα.

Η Μέση Ανατολή προμηθεύει σήμερα το 30% της παγκόσμιας αγοράς σε πετρέλαιο και διαθέτει περισσότερο από τα μισά αποθέματα. Συγχρόνως τα μισά από τα συνολικά αποθέματα φυσικού αερίου ανήκουν σε δύο μόνο χώρες, τη Ρωσία και το Ιράν.

Το 50% των ενεργειακών αναγκών της Ευρωπαϊκής Ένωσης καλύπτονται από εισαγωγές, ενώ περίπου 70% των αναγκών της αναμένεται να καλύπτονται επίσης με εισαγωγές το 2030, αν βεβαίως οι σημερινές τάσεις συνεχιστούν.

Στα προηγούμενα τριάντα χρόνια , η τιμή του πετρελαίου τριπλασιάστηκε σε τέσσερις χρονικές περιόδους :το 1973, 1979, 1990 και το διάστημα 1999-2000.

Και ενώ οι αναταράξεις στην παγκόσμια οικονομία, ιδιαίτερα των αναπτυσσόμενων κρατών, δεν έχουν ξεπεραστεί, η ευρέως διαδεδομένη άποψη ότι τα πάντα είναι δυνατά αν διαθέτουμε «αρκετή ενέργεια και τεχνολογία» άρχισε να αμφισβητείται, όταν διαπιστώθηκαν η περιορισμένη αντοχή των φυσικών κύκλων και οι αστάθμητοι κίνδυνοι από τις παρενέργειες της τεχνολογίας.



Γράφημα 1.2

Η υπερθέρμανση του πλανήτη και η υποβάθμιση του περιβάλλοντος σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο δεν αφήνουν κανένα περιθώριο εφησυχασμού.

Σύμφωνα με την Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του κλίματος (IPCC), οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου έχουν ήδη ανεβάσει τη θερμοκρασία κατά 0,6 βαθμούς παγκοσμίως και εάν δεν ληφθούν μέτρα ,έως τα τέλη του αιώνα θα σημειωθεί αύξηση 1,8-4° C σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 (IPCC 4AR,ομάδα εργασίας Ι) με σοβαρές συνέπειες για τις οικονομίες και τα οικοσυστήματα των περιοχών του κόσμου(γράφημα 1.2). Ήδη πολλές περιοχές βρίσκονται αντιμέτωπες με τις δυσμενείς επιπτώσεις της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη.

Ακόμα και με το συντηρητικότερο σενάριο, που προβλέπει τη διατήρηση της υφιστάμενης κατάστασης, η άνοδος της θερμοκρασίας σε σχέση με την προβιομηχανική εποχή θα υπερβεί τους 2° C.



<u>Γράφημα 1.3</u>: Στο γράφημα φαίνονται οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά έτος για τα τελευταία 200 χρόνια και οι αντίστοιχες εκπομπές των ορυκτών καυσίμων.

Με την αλλαγή του κλίματος θα περιοριστεί η πρόσβαση σε πόσιμο νερό χωρίς το οποίο θα σημειωθεί μετανάστευση πληθυσμών σε άλλες περιοχές του κόσμου, προκαλώντας συνθήκες αναστάτωσης σε τοπικό και παγκόσμιο επίπεδο. Το ίδιο πρόβλημα θα προκύψει με την άνοδο της στάθμης της θάλασσας στο Δέλτα του Νείλου, του Γάγγη, του Βραχμαπούτρα και του Μεκόνγκ.

Έμμεσες και άμεσες επιπτώσεις θα υπάρξουν και για την υγεία των ανθρώπων και των ζώων από τα ακραία καιρικά φαινόμενα και την αύξηση των λοιμωδών νόσων. Το 2002 μόνο η διάρροια , η ελονοσία και ο υποσιτισμός προκάλεσαν το θάνατο 3,3 εκατομμυρίων ατόμων σε όλη την υφήλιο , εκ των οποίων το 29% ζούσαν στη Αφρική.

Τα ορυκτά καύσιμα και κυρίως ο άνθρακας , είναι η σημαντικότερη πηγή βαρέων μετάλλων , όπως ο υδράργυρος το σελήνιο και το αρσενικό.

Υγροβιότοποι και τούνδρα έχουν υποστεί σημαντική περιβαλλοντική επιβάρυνση λόγω της εξόρυξης πετρελαίου.

Η υδροηλεκτρική ενέργεια προκαλεί κοινωνικές επιπτώσεις μεγάλης κλίμακας. Κυρίως στην Κίνα και στην Ινδία 30 με 60 εκατομμύρια άνθρωποι οδηγήθηκαν σε αναγκαστική μετανάστευση λόγω της κατασκευής υδροηλεκτρικών φραγμάτων.

Η αναερόβια αποικοδόμηση οργανικής ύλης στα υδροηλεκτρικά φράγματα, αποτελεί πηγή μεθανίου, που είναι ένα από τα αέρια , που ευθύνονται για το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

To 20-30% των φυτικών και ζωικών ειδών κινδυνεύουν με εξαφάνιση, εάν η μέση θερμοκρασία του πλανήτη υπερβεί τους 1,5-2,5° C.

Το γεγονός της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης τονίστηκε και στα πλαίσια διεθνών συνδιασκέψεων, όπως της Ρώμης (1971), της Στοκχόλμης (1972), του Pio (1992),του Γιοχάνεσμπουργκ (2002) με ιδιαίτερη βαρύτητα εκείνης του Kιότο της Ιαπωνίας (1997), όπου θεσπίστηκε το Πρωτόκολλο του Kιότο, το οποίο συνιστά ένα σημαντικό βήμα στην καταπολέμηση της θέρμανσης του πλανήτη, επειδή περιλαμβάνει δεσμευτικούς και ποσοτικοποιημένους στόχους περιορισμού και μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου. Συγκεκριμένα δεσμεύει τις βιομηχανικά αναπτυγμένες χώρες να μειώσουν τις εκπομπές έξι αερίων του θερμοκηπίου την περίοδο 2008-2012, σε ποσοστό μεγαλύτερο του 5% σε σχέση με το επίπεδο του 1990.Η Ευρωπαϊκή Ένωση δεσμεύτηκε για μείωση των εκπομπών της κατά 8%, οι ΗΠΑ για 7%, η Ιαπωνία για 6%, ενώ άλλες χώρες, όπως η Ρωσία και η Αυστραλία δεσμεύτηκαν να περιορίσουν το ρυθμό αύξησης των εκπομπών τους.

Πίνακας 1.1: Κατανομή των υποχρεώσεων των κρατών-μελών της ΕΕ για τη μείωση των εκπομπών 6 αερίων στην περίοδο 2008-2012 σε σχέση με το έτος βάσης.

Λουξεμβούργο	-28.0%
Γερμανία	-21.5%
Δανία	-21.5%
Αυστρία	-13.0%
Ηνωμένο Βασίλειο	-12.5%
Βέλγιο	-7.0%
Ιταλία	-6.5%
Ολλανδία	-6.0%
Γαλλία	0%
Φιλανδία	0%
Σουηδία	+5%
Ιρλανδία	+14%
Ισπανία	+15%
Ελλάδα	+25%
Πορτογαλία	+28%

Πηγή: Εθνικό πρόγραμμα μείωσης εκπομπών αερίων φαινομένου θερμοκηπίου (2000-2010)

Μέχρι σήμερα το πρωτόκολλο έχει περάσει από «μύρια κύματα» για να τεθεί σε ισχύ. Αναμφίβολα όμως είναι μια αρχή, η πρώτη σοβαρή προσπάθεια της διεθνούς κοινότητας για την προστασία του περιβάλλοντος.

1.5 ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ως πηγές ενέργειας χαρακτηρίζονται οι «αποθήκες» ενέργειας, αν και ο όρος πηγές δεν ευσταθεί από επιστημονικής πλευράς, αφού σύμφωνα με το νόμο διατήρησης της ενέργειας, η ενέργεια ούτε δημιουργείται αλλά ούτε και καταστρέφεται. Απλά αλλάζει μορφές. Γενικά ,όμως, ο όρος «πηγές ενέργειας» περιγράφει τη δυνατότητα παραγωγής ενέργειας χρήσης. Οι πηγές ενέργειας διακρίνονται σε **αυτογενείς** (πυρήνες ατόμων, ήλιος, γαιάνθρακες ή πετρέλαιο) και **τεχνητές** (ταμιευτήρες, ηλεκτρικοί συσσωρευτές), ενώ αναφορικά με τα αποθέματα ενέργειας ταξινομούνται σε συμβατικές ή μη ανανεώσιμες και σε ανανεώσιμες.

Η αφθονία, η εύκολη αποθήκευση και πρόσβαση στην ενεργειακή πηγή, η μετατροπή χωρίς δυσκολίες σε μορφή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τα σύγχρονα μηχανήματα, είναι ορισμένες από τις προϋποθέσεις, οι οποίες καθιστούν χρήσιμη μια πηγή ενέργειας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1 ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΟΙ ΑΠΕ ΚΑΙ ΠΟΙΑ Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΟΥΣ

Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, με καταλυτική εξέλιξη την ανακάλυψη μεγάλων κοιτασμάτων πετρελαίου, ο κόσμος στράφηκε αποφασιστικά στη χρήση μη ανανεώσιμων πηγών (στερεά καύσιμα των γαιανθράκων, υγρά καύσιμα που παίρνουμε με κατεργασία, αέρια καύσιμα, πυρηνική ενέργεια από τη σχάση ραδιενεργών υλικών) κυρίως άνθρακα και υδρογονανθράκων, καλύπτοντας με αυτές το 93% των ενεργειακών αναγκών με τις ανανεώσιμες πηγές να καλύπτουν μόλις το 7% με βασικότερη τη βιομάζα.

Σήμερα, για πολλές χώρες οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελούν μια εγχώρια πηγή ενέργειας με ευνοϊκές προοπτικές συνεισφοράς στο ενεργειακό τους ισοζύγιο, συμβάλλοντας στη μείωση της εξάρτησης από το ακριβό εισαγόμενο πετρέλαιο και στην ενίσχυση της ασφάλειας του ενεργειακού τους εφοδιασμού. Παράλληλα συμβάλλουν στη βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος, καθώς έχει πλέον διαπιστωθεί ότι ο ενεργειακός τομέας είναι ο κλάδος που ευθύνεται κατά κύριο λόγο για τη ρύπανση του περιβάλλοντος.

Technology	World Total	Developing Countries	EU-27	China	United States	Germany	Spain	India	Japan
					GW				
Wind power	159	40	75	25.8	35.1	25.8	19.2	10.9	2.1
Small hydropower <10 MW	60	40	12	33	3	2	2	2	4
Biomass power	54	24	16	3.2	9	4	0.4	1.5	0.1
Solar photovoltaic-grid	21	0.5	16	0.4	1.2	9.8	3.4	~0	2.6
Geothermal power	11	5	0.8	~0	3.2	0	0	0	0.5
Concentrating solar thermal power (CSP) 0.7	0	0.2	0	0.5	0	0.2	0	0
Ocean power	0.3	0	0.3	0	0	0	0	0	0
Total renewable power capacity (including small hydropower)	305	110	120	62	52	42	25	14	9
Total hydropower (all sizes)	980	580	127	197	95	11	18	37	51
Total renewable power capacity (including hydro- power of all sizes)	1,230	650	246	226	144	51	41	49	56

Table R4. Renewable Electric Power Capacity, Existing as of 2009



Δύο είναι οι κρίσιμοι παράγοντες στην αναβίωση του ενδιαφέροντος για τις ΑΠΕ, ξεκινώντας από τα μέσα της δεκαετίας του 1970:

α)<u>Το ζήτημα της ενεργειακής ασφάλειας</u>: οι δυο πετρελαϊκές κρίσεις του 1974 και του 1979-80, οδήγησαν τις βιομηχανικά αναπτυγμένες χώρες να αναθεωρήσουν την απόλυτη εξάρτησή τους από τα ορυκτά καύσιμα και ιδιαίτερα το πετρέλαιο. Οι χώρες προμηθευτές – κατά κύριο λόγο τα κράτη της Αραβικής Χερσονήσου και του Περσικού κόλπου- δεν ήταν ποτέ αξιόπιστοι σύμμαχοι της Δύσης. Η τελευταία τριακονταετία στην περιοχή, με την άνοδο του ισλαμικού φονταμενταλισμού, που είναι από τα κύρια χαρακτηριστικά της, έχει εντείνει περαιτέρω την ενεργειακή ανασφάλεια των αναπτυγμένων χωρών σχετικά με τις μη ανανεώσιμες πηγές.

β)<u>Το φαινόμενο του θερμοκηπίου:</u> ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, έχει αναχθεί σε κορυφαία προτεραιότητα της διεθνούς κοινότητας. Ο ενεργειακός τομέας είναι ο κύριος υπεύθυνος για τη ρύπανση του περιβάλλοντος, καθώς σχεδόν το 95% της ρύπανσης του πλανήτη οφείλεται στην παραγωγή, το μετασχηματισμό και τη χρήση των συμβατικών καυσίμων.

Ως Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) ή «Πράσινη Ενέργεια» έχουν χαρακτηριστεί οι ενεργειακές πηγές, οι οποίες υπάρχουν σε αφθονία στο φυσικό περιβάλλον και θα συνεχίζουν να μας παρέχουν ενέργεια σε βάθος χρόνου. Προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες και η εκμετάλλευσή τους δεν απαιτεί ενεργητική παρέμβαση ,όπως εξόρυξη, άντληση ή καύση, αλλά απλώς εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Είναι η πρώτη μορφή ενέργειας, που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος πριν στραφεί έντονα στη χρήση των ορυκτών καυσίμων.

Οι περισσότερο γνωστές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι:

-Η ηλιακή ενέργεια

-Η αιολική ενέργεια

-Η υδροηλεκτρική ενέργεια (από μικρές υδροηλεκτρικές μονάδες)

-Η ενέργεια βιομάζας

-Η γεωθερμική ενέργεια

-Η ενέργεια από παλίρροιες

-Η ενέργεια από τα θαλάσσια κύματα

-Η ενέργεια από τους ωκεανούς(βρίσκεται στο στάδιο της έρευνας)

Οι ΑΠΕ βασίζονται κατ' ουσίαν στην ηλιακή ακτινοβολία, με εξαίρεση τη γεωθερμική ενέργεια, που είναι ροή ενέργειας από το εσωτερικό του φλοιού της γης και την ενέργεια από τις παλίρροιες, που εκμεταλλεύεται τη βαρύτητα. Οι βασιζόμενες στην ηλιακή ακτινοβολία πηγές ενέργειας είναι ανανεώσιμες, μιας και δεν πρόκειται να εξαντληθούν όσο υπάρχει ο ήλιος, δηλαδή για μερικά ακόμα δισεκατομμύρια χρόνια. Η γεωθερμική ενέργεια δεν είναι ανανεώσιμη, καθώς τα γεωθερμικά πεδία κάποια στιγμή εξαντλούνται. Συνεπώς ο χαρακτηρισμός «ανανεώσιμες» είναι κάπως καταχρηστικός.

Βασικά πλεονεκτήματα της χρήσης ΑΠΕ είναι τα εξής:

-Συμβολή στη μείωση της εξάρτησης από συμβατικούς μη ανανεώσιμους ενεργειακούς πόρους

-Συμβολή στην άμβλυνση του φαινομένου του θερμοκηπίου, καθώς συνεισφέρουν στον περιορισμό της εκπομπής των 6 αερίων του θερμοκηπίου (CO2, CH4, N2O, PFCs, SF6) στην ατμόσφαιρα.

-Συνεισφορά στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε εθνικό επίπεδο.

-Αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος εξαιτίας της γεωγραφικής τους διασποράς, με αποτέλεσμα τη δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών αναγκών σε

τοπικό και περιφερειακό επίπεδο και τη συνεπακόλουθη ανακούφιση των συστημάτων υποδομής και τον περιορισμό των απωλειών από η μεταφορά ενέργειας.

-Δυνατότητα ορθολογικής αξιοποίησης των ενεργειακών πόρων, με διαφορετικές λύσεις για διαφορετικές ενεργειακές ανάγκες(για παράδειγμα χρήση ηλιακής ενέργειας για θερμότητα χαμηλών θερμοκρασιών, χρήση αιολικής ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή)

-Χαμηλό λειτουργικό κόστος , που δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων

-Συνεισφορά στην αναζωογόνηση οικονομικά και κοινωνικά υποβαθμισμένων περιοχών με τη δημιουργία θέσεων εργασίας και την προσέλκυση ανάλογων επενδύσεων (π.χ. καλλιέργειες θερμοκηπίου με τη χρήση γεωθερμικής ενέργειας)

Υπολογίζεται ότι το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο ενεργειακό δυναμικό από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι πολλαπλάσιο της παγκόσμιας συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Όμως, το υψηλό μέχρι σήμερα κόστος τους, τα τεχνικά προβλήματα εφαρμογής και οι πολιτικές και οικονομικές σκοπιμότητες που έχουν να κάνουν με τη διατήρηση του υπάρχοντος status quo στον ενεργειακό τομέα εμπόδισαν την εκμετάλλευση έστω και μέρους αυτού του δυναμικού. Ειδικά στην Ελλάδα , που έχει μορφολογία και κλίμα κατάλληλο για νέες ενεργειακές εφαρμογές, η εκμετάλλευση αυτού του ενεργειακού δυναμικού θα βοηθούσε σημαντικά στην ενεργειακή αυτονομία της χώρας.

Η εγκατεστημένη ισχύς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ (μη συμπεριλαμβανομένων των αντλητικών), ήταν 3.551 MW στο τέλος του 2008 με σταθερά αυξανόμενη εξέλιξη να έχουν τα αιολικά, τα μικρά υδροηλεκτρικά και η βιομάζα (Πίνακας 2.2).

Παράλληλα η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ το 2008 έφθασε τις 6,6 TWh περίπου και προήλθε, κατά 63% από υδροηλεκτρικούς σταθμούς (4149 GWh), κατά 34% από αιολικά πάρκα (2242GWh), 191 GWh (3%) παρήχθησαν από βιοαέριο, ενώ υπήρχε και μία μικρή παραγωγή από φωτοβολταϊκούς σταθμούς (Πίνακας 2.3).

	-	ίνακας	; 1: Ioχύ	ς Παρα	γωγής	Ηλεκτρι	κής Ενε	έργειας	; (MW),	Επιφάν	νεια Ηλι	ακών Σι	υλλεκτώ	ν και Βι	οκαύσιμ	벌			
Τεχνολογία ΑΠΕ	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Σύνολο	2.411	2.515	2.541	2.552	2.552	2.552	2.551	2.757	2.896	3.068	3.299	3.369	3.388	3.473	3.597	3.621	3.902	4.044	4.250
Υδροηλεκτρική Ενέργεια	2.408	2.512	2.523	2.523	2.523	2.523	2.522	2.728	2.856	2.959	3.072	3.076	3.078	3.079	3.099	3.105	3.124	3.150	3.176
εκ των οποίων αντλητικά συστήματα	315	315	315	315	315	315	315	520	615	615	669	669	669	669	669	669	669	669	669
Y/H -1 MW*	2	2	2	2	æ	e	в	4	5	80	14	15	17	19	23	25	31	37	44
Y/H 1-10 MW*	28	28	39	39	39	39	39	39	40	42	42	45	45	50	29	64	77	95	114
Y/H 10+MW*	2.063	2.167	2.167	2.167	2.166	2.166	2.165	2.165	2.197	2.294	2.317	2.317	2.317	2.311	2.317	2.317	2.317	2.319	2319
Γεωθερμία	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Φωτοβολταϊκά	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	5	6	12
Αιολική Ενέργεια	1	1	16	27	27	27	27	27	38	109	226	270	287	371	472	491	749	846	1022
Βιοαέριο	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	22	22	22	24	24	24	39	40
Επιφάνεια Ηλιακών Συλλεκτών (1000 m ²)	1.448	1.610	1.759	1.878	1.991	2.101	2.168	2.228	2.381	2.440	2.941	2.992	3.050	3.140	3.246	3.047	3.296	3.573	3.871
Βιοκαύσιμα (τόννους)	•	1		- 1					a.	•			•				395.000	575.000	575.000
* δεν συμπεριλαμβάνεται ι	ι σχύς τω	ν αντλητι	ικών																

Πίνακας 2.2. Πηγή: ΚΑΠΕ, Ετήσια Έκθεση 2009

					Ē	ίνακας	2: Mukt	ή Παρα	νωγή Ηλ	εκτρική	ς Evépye	ειας (GV	(भ						
Τεχνολογία ΑΠΕ	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Σύνολο	2.023	3.183	2.417	2.686	2.973	3.843	4.556	4.156	3.949	5.028	4.562	3.560	4.240	6.459	6.450	6.999	8.077	5.356	6.586
Υδροηλεκτρική Ενέργεια	2.021	3.181	2.408	2.639	2.936	3.808	4.518	4.119	3.876	4.865	4.111	2.725	3.463	5.332	5.205	5.610	6.292	3.377	4.149
εκ των οποίων αντλητικά συστήματα	228	72	186	259	243	253	156	214	149	237	418	628	663	566	533	593	427	785	837
Y/H -1 MW*	9	5	5	5	80	7	7	11	80	18	26	40	58	76	91	106	89	118	117
Y/H 1-10 MW*	54	70	43	77	97	68	119	138	137	164	140	95	92	169	212	218	299	177	207
Y/H 10+MW*	1.733	3.034	2.174	2.297	2.589	3.460	4.236	3.756	3.582	4.446	3.527	1.962	2.650	4.521	4.369	4.693	5.477	2.297	2.987
Αιολική Ενέργεια	2	2	80	47	37	34	38	37	73	162	451	756	651	1.021	1.121	1.266	1.699	1.818	2.242
Βιοαέριο	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	79	126	105	123	122	85	160	191
Φωτοβολταϊκά	0,1	0'0	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,5	0,6	0,8	6'0	1,3	1,4	5
* δεν συμπεριλαμβάνι	ται η παρα	τρωγή των	αντγιτικών																

Πίνακας 2.3 . Πηγή: ΚΑΠΕ. Ετήσια έκθεση 2009

Σήμερα , βέβαια, που το κόστος των εφαρμογών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας πέφτει συνεχώς, λαμβάνονται υπόψη στους επίσημους σχεδιασμούς των αναπτυγμένων κρατών για την ενέργεια και αν και αποτελούν πολύ μικρό ποσοστό της ενεργειακής παραγωγής ετοιμάζονται βήματα για παραπέρα αξιοποίησή τους. Ειδικά η αιολική και η υδροηλεκτρική ενέργεια ,αλλά και η βιομάζα, μπορούν πλέον να ανταγωνίζονται στα ίσα παραδοσιακές πηγές ενέργειας, όπως ο άνθρακας και η πυρηνική ενέργεια. Ενδεικτικά, στις Η.Π.Α ένα 6% της ενέργειας προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές.



Γράφημα 2.1

2.2 ΕΥΡΩΠΑΪΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΚΑΙ ΕΘΝΙΚΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΣΤΟΝ ΤΟΜΕΑ ΤΩΝ ΑΠΕ

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει δρομολογήσει τα τελευταία χρόνια μια σειρά από δράσεις και μέτρα ώστε να επιτύχει την περαιτέρω ανάπτυξη των τεχνολογιών ΑΠΕ, στο πλαίσιο αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής. Η πιο σημαντική πρωτοβουλία συμφωνήθηκε στο Ευρωπαϊκό Συμβούλιο το Μάρτιο του 2007 και αναφέρεται σε ένα συνολικό ενεργειακό σχέδιο δράσης. Το σχέδιο αυτό βασίζεται στην πρόταση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για μια «Ενεργειακή Πολιτική για την Ευρώπη» και καθορίζει ένα μελλοντικό πολιτικό πρόγραμμα προτείνοντας παράλληλα και τις αντίστοιχες δράσεις για την επίτευξη των στόχων της Ευρωπαϊκής Κοινότητας για αειφορία, ανταγωνιστικότητα και ασφάλεια ενεργειακού εφοδιασμού. Η ουσιαστική υλοποίηση των πολιτικών και των δράσεων, που προβλέπονται σε αυτήν την απόφαση και των δεσμεύσεων των κρατών-μελών, συνοψίζεται στην επίτευξη των στόχων της του προβλέπονται σε αυτήν την απόφαση και των δεσμεύσεων των κρατών-μελών, συνοψίζεται στην επίτευξη των στρατηγικών στόχων, που αναφέρονται ως τα τρία εικοσάρια «20-20-20»: Μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου κατά 20% σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990, αύξηση των ανανεώσιμων πηγών στην τελική κατανάλωση ενέργειας σε ποσοστό 20% και βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κατά 20% έως το 2020. Για την Ελλάδα ο αντίστοιχος στόχος προσδιορίζεται στο 18%, ενώ ο στόχος για τις εκπομπές των αερίων ρύπων του θερμοκηπίου είναι μείωση κατά 4% στους τομείς εκτός εμπορίας σε σχέση με τα επίπεδα του 2005(Γράφημα 2.2).



Πηγή: Ευρωπαϊκή Επιτροπή

Γράφημα 2.2

Στον πίνακα, που ακολουθεί, καταγράφεται το ενεργειακό μείγμα ανά τεχνολογία και κατηγορία παραγωγού, όπως προσδιορίζεται στη σχετική απόφαση:

Τεγγολογία	Χρονική τ	τερίοδος
τεχτολογια	2014	2020
Υδροηλεκτρικά	3700	4650
Μικρά (0-15MW)	300	350
Μεγάλα (>15MW)	3400	4300
Φωτοβολταϊκά	1500	2200
Εγκαταστάσεις από επαγγελματίες αγρότες της περίπτωσης (β) της παρ.6 του άρθ.15 του v.3851/2010	500	750
Λοιπές Εγκαταστάσεις	1000	1450
Ηλιοθερμικά	120	250
Αιολικά (περιλαμβανομένων των θαλασσίων)	4000	7500
Βιομάζα	200	350

Επιδιωκόμενη αναλογία εγκατεστημένης ισχύος και κατανομής της στο χρόνο μεταξύ των διαφόρων τεχνολογιών ΑΠΕ

Πίνακας 2.4. Πηγή : Ετήσια έκθεση της υπηρεσίας Α.Π.Ε., έτος 2010

(Η ισχύς από τα φωτοβολταϊκά συστήματα δεν περιλαμβάνει την ενέργεια, η οποία θα εκχέεται στο Δίκτυο ως αποτέλεσμα της εφαρμογής του «Ειδικού Προγράμματος Ανάπτυξης φωτοβολταϊκών Συστημάτων σε Κτιριακές Εγκαταστάσεις», οι διατάξεις του οποίου συμπληρώθηκαν με την έκδοση της υπουργικής απόφασης 18513/20-9-10).

Το 2011 είναι για τη χώρα μας μια χρονιά, που σημαδεύτηκε από την ύφεση της οικονομίας, η οποία επεκτάθηκε σε όλους τους τομείς της εμπορικής δραστηριότητας και του ελληνικού επιχειρείν. Μέσα σε αυτό το δύσκολο περιβάλλον, με τις δυσοίωνες προοπτικές και τα ανησυχητικά μηνύματα, ο χώρος των ΑΠΕ αποτελεί μια αισιόδοξη και πολλά υποσχόμενη διέξοδο. Οι πράσινες ενεργειακές τεχνολογίες προσφέρουν επιχειρηματικές ευκαιρίες και σοβαρές οικονομικές αποδόσεις, δημιουργούν θέσεις απασχόλησης και λειτουργούν ως πόλος καινοτομίας και τόνωσης των πρωτοπόρων βιομηχανιών υψηλής τεχνολογίας, παρέχοντας αξιόλογες ευκαιρίες για εξαγωγές. Μια νέα, επιθετική στρατηγική, με οραματικό σχεδιασμό και προσεκτική αξιολόγηση όλων των παραμέτρων, για την εντατική αξιοποίηση των ΑΠΕ αποτελεί το κλειδί για τη δυναμική ενίσχυση του πράσινου ενεργειακού τομέα, που μπορεί να συνεισφέρει ουσιαστικά στην ανατροπή του αρνητικού κλίματος και την ανάκαμψη της εθνικής οικονομίας.

Στον παρακάτω πίνακα 2.5 παρουσιάζεται μια βραχυπρόθεσμη εκτίμηση της εξέλιξης της εγκατάστασης σταθμών ηλεκτροπαραγωγής από Α.Π.Ε. της Υπηρεσίας Α.Π.Ε.. Στον πίνακα περιλαμβάνονται δεδομένα λειτουργίας για το 2009 και 2010 ενώ η εκτίμηση για το 2011 βασίζεται σε πραγματικά στοιχεία (φάση κατασκευής) και για το 2012 στην αδειοδοτική ωριμότητα των έργων.

		Εγκατεστη	μένη ια	νχύς (MW) – Ε	τήσια	αύξηση (%)	
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ	2009	2010	%	2011 (εκτίμηση)	%	2012 (εκτίμηση)	%
Αιολικά	1166.9	1297.7	11	1600	23	1900-2000	19-25
Βιομάζα	43.3	44.0	2	45	2	50-80	11-78
Μικρά Υ/Η	182.6	196.3	8	210	7	230-250	10-19
Ф/В	53.0	198.3	274	400	102	650-750	63-88
Σύνολο	1445.8	1736.3	20	2255	30	2830-3080	25-37

Πίνακας 2.5. Πηγή: Υπηρεσία Α.Π.Ε.

Η Ελληνική κυβέρνηση στο πλαίσιο υιοθέτησης συγκεκριμένων αναπτυξιακών και περιβαλλοντικών πολιτικών, με το νόμο 3851/2010 προχώρησε στην αύξηση του εθνικού στόχου συμμετοχής των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην τελική κατανάλωση ενέργειας στο 20%, ο οποίος εξειδικεύεται σε 40% συμμετοχή των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή, 20% σε ανάγκες θέρμανσης-ψύξης και 10% στις μεταφορές. Επιπρόσθετα, σε σχέση με την εξοικονόμηση ενέργειας, η Ελλάδα, στα πλαίσια της οδηγίας 2006/32ΕΚ, κατάρτισε το 1° Σχέδιο Δράσης Ενεργειακής Αποδοτικότητας, όπου προβλέπεται 9% εξοικονόμηση ενέργειας στην τελική κατανάλωση μέχρι το 2016, , ενώ στο πλαίσιο εφαρμογής της οδηγίας 2009/28ΕΚ έχει εκπονήσει και υποβάλλει στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή το 2° Εθνικό Σχέδιο Δράσης για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, που θεωρείται ότι αποτελεί ένα δυναμικό εργαλείο σχεδιασμού και παρακολούθησης των εθνικών ενεργειακών στόχων μέχρι το 2020 και με την ανταπόκριση και των φορέων της αγοράς θα συμβάλλει στην επιτυχή ολοκλήρωση του μοντέλου «πράσινης ανάπτυξης». Με εξουσιοδότηση του ν.3851/2010 εκδόθηκε και η υπουργική απόφαση 19598/1-102010 με θέμα την «Επιδιωκόμενη αναλογία εγκατεστημένης ισχύος και την κατανομή της στο χρόνο μεταξύ των διάφορων τεχνολογιών ΑΠΕ».

Τα παραπάνω στρατηγικά κείμενα αναφοράς διαμορφώνουν το βασικό πλαίσιο πολιτικής για την προώθηση των ΑΠΕ στη χώρα μας.



Γράφημα 2.3



Γράφημα 2.4: Εκτιμώμενη εγκατεστημένη ισχύς των διαφόρων τεχνολογιών Α.Π.Ε. για την ηλεκτρική ενέργεια.



Γράφημα 2.5: Εκτιμώμενη εγκατεστημένη ισχύς από τις διάφορες τεχνολογίες καυσίμων ΑΠΕ προς το 2020.

Παράλληλα η Ελλάδα προχωρά στην ανάπτυξη μηχανισμών της αγοράς και εφαρμογής συγκεκριμένων μέτρων και πολιτικών, που αποσκοπούν στην επίτευξη του συγκεκριμένου εθνικού στόχου για εξοικονόμηση ενέργειας και παράλληλα στην ασφάλεια ενεργειακού εφοδιασμού, στη βέλτιστη αξιοποίηση των φυσικών πόρων και στην ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας βασικών κλάδων της ελληνικής οικονομίας.

Η πραγματοποίηση των στόχων απαιτεί το συνδυασμό μέτρων και πολιτικών θεσμικού χαρακτήρα ώστε να επιταχυνθούν και να διευκολυνθούν οι επενδυτικές πρωτοβουλίες, να διαμορφωθεί ένα ξεκάθαρο πλαίσιο αναφορικά με τους όρους χρήσης γης και των δυνατοτήτων ενεργειακής τους αξιοποίησης, να ολοκληρωθούν οι αναγκαίες εργασίες επέκτασης και αναβάθμισης του ηλεκτρικού δικτύου και να αναπτυχθεί σταδιακά ο διεσπαρμένος τρόπος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ συγχρόνως είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη όλες οι τεχνολογικές εφαρμογές, οι οποίες μπορούν αθροιστικά να συνεισφέρουν για την επιτυχή εφαρμογή του συγκεκριμένου μοντέλου πράσινης ανάπτυξης. Αυτό απαιτεί την αντιμετώπιση ποικίλων εμποδίων, όπως οι καθυστερήσεις στην αδειοδότηση έργων ΑΠΕ, οι ασάφειες θεμάτων χωροταξικού σχεδιασμού, η ελλιπής ενημέρωση των πολιτών σχετικά νε τις εφαρμογές έργων ΑΠΕ και η ιδιομορφία ύπαρξης ενός μη πλήρους διασυνδεδεμένου ηλεκτρικού συστήματος, καθώς πολλά νησιά αποτελούν αυτόνομα δίκτυα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3- ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ



Εικόνα 3.1: Α/Γενεργή

3.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η κινητική ενέργεια του κινούμενου αέρα είναι η αιολική ενέργεια και χρησιμοποιήθηκε από τον άνθρωπο ήδη από την αρχαιότητα.

Οι άνεμοι, δηλαδή οι μεγάλες μάζες αέρα, που μετακινούνται με ταχύτητα από μια περιοχή σε άλλη, οφείλονται στην ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της Γης από την ηλιακή ακτινοβολία. Η περιστροφή της Γης, τα τοπικά τοπογραφικά χαρακτηριστικά και η τραχύτητα του εδάφους είναι παράγοντες, που επηρεάζουν επίσης την κατεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου.

Αν υπήρχε δυνατότητα με τη σημερινή τεχνολογία να καταστεί εκμεταλλεύσιμο το συνολικό αιολικό δυναμικό της Γης, αυτό θα μπορούσε να καλύψει πάνω από δυο φορές τις ανάγκες της ανθρωπότητας σε ηλεκτρική ενέργεια .Υπολογίζεται ότι στο 25% της επιφάνειας της Γης επικρατούν άνεμοι μέσης ετήσιας ταχύτητας πάνω από 5,1m/sec σε ύψος 10 μέτρων από το έδαφος. Όταν σε μια περιοχή οι άνεμοι πνέουν με μέση ταχύτητα μεγαλύτερη από αυτήν την τιμή, τότε το αιολικό δυναμικό της θεωρείται εκμεταλλεύσιμο κατά τρόπο οικονομικά συμφέροντα.

Στα πλεονεκτήματα της αιολικής ενέργειας συγκαταλέγονται :

*η αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ταυτόχρονη εξοικονόμηση σημαντικών ποσοτήτων συμβατικών καυσίμων

*ο περιορισμός της ρύπανσης του περιβάλλοντος, αφού έχει υπολογιστεί ότι μία μόνο ανεμογεννήτρια ισχύος 550 KW με τον ηλεκτρισμό, που παράγει, υποκαθιστά την ενέργεια, που παράγεται από την καύση 2.700 βαρελιών πετρελαίου, δηλαδή αποτρέπει την εκπομπή 735 περίπου τόνων CO2 ετησίως, καθώς και 2 τόνων άλλων ρύπων

*η δημιουργία πολλών νέων θέσεων εργασίας, που αφορούν την κατασκευή, εγκατάσταση, λειτουργία και συντήρηση των Α/Γ, καθώς και σχετικούς τομείς της βιομηχανίας, δηλαδή συμβουλευτικές και νομικές υπηρεσίες, προγραμματισμό, έρευνα, χρηματοδότηση, πωλήσεις, μάρκετινγκ, δημοσιότητα και εκπαίδευση.

*η ωφέλεια της οικονομίας των αγροτικών περιοχών δεδομένου ότι επιτρέπει στους αγρότες να εργάζονται, αφού οι ανεμογεννήτριες καλύπτουν μόνο ένα μικρό μέρος της γης, ενώ οι ιδιοκτήτες των εγκαταστάσεων πληρώνουν ενοίκιο στους αγρότες για τη χρήση της.

Δύο σημαντικά μειονεκτήματα της αιολικής ενέργειας είναι ότι εξαρτάται άμεσα από την ύπαρξη ικανοποιητικών ταχυτήτων ανέμου και ότι δεν υπάρχουν δυνατότητες για οικονομική αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων της.

3.2 Η ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΟ ΔΙΕΘΝΗ ΧΩΡΟ

Η εγκατεστημένη αιολική ισχύς σε παγκόσμιο επίπεδο αυξήθηκε το 2009 κατά 36928 MW, που αντιπροσωπεύει αύξηση 30,5% συγκριτικά με το προηγούμενο έτος. Ο μέσος ετήσιος ρυθμός ανάπτυξης την περίοδο 1993-2009 ήταν 28,5%, ενώ η εγκατεστημένη ισχύς αυξήθηκε κατά 55 περίπου φορές. Στη Ευρώπη η αύξηση της ισχύος ήταν 15,1%, στις ΗΠΑ 39,3%, στην Ασία 60,3% (λόγω της θεαματικής αύξησης κατά 107,4% στην Κίνα) και στον υπόλοιπο κόσμο 48,8%. Η Κινέζικη αγορά κάλυψε το 35,2% των νέων εγκαταστάσεων του 2009, η αγορά των ΗΠΑ το 26,9%, η Ευρωπαϊκή το 27,1% (παρόλο που ελέγχει το 48,2% της συνολικής παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος) και λοιπός κόσμος 10,9%.



Γράφημα 3.1. *Πηγή : ΙΕΑ*

Το 48,2% της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος βρίσκεται στην Ευρώπη, το 24,6% στη Ασία- Ειρηνικό, το 24,4% στη Βόρεια Αμερική και μόλις το 2,8% στις λοιπές (Αφρική και Νότια Αμερική)



Γράφημα 3.2. Πηγή: EurObserv'ER 2010

Figure 6. Wind Power Capacity, Top 10 Countries, 2009



Γράφημα 3.3- Αιολική ισχύς στις 10 πρώτες χώρες το 2009

3.2.1 Η ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Δημοσκοπήσεις σε ευρωπαϊκές χώρες, όπως Δανία, Γερμανία, Ολλανδία, Μ. Βρετανία έδειξαν ότι το 70% του πληθυσμού προτιμά την παραγωγή και χρήση αιολικής ενέργειας. Η Δανία κατέχει την πρώτη θέση στην παγκόσμια παραγωγή με το παραγόμενο αιολικό δυναμικό να είναι το 1998 1200MW και το ίδιο έτος οι Δανοί κατασκευαστές να κατέχουν το 50% της παγκόσμιας αγοράς σε ανεμογεννήτριες. Θεωρητικά, η αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού της Ευρώπης στο μέγιστο θα μπορούσε να καλύψει όλες τις ανάγκες για ηλεκτρική ενέργεια. Χαρακτηριστικά αναφέρεται πως στις αρχές του 1999 , πάνω από 6600 MW κάλυψαν τις ανάγκες 7 εκατομμυρίων ευρωπαίων.

Από τα μέσα της δεκαετίας του '70, οπότε ξεκίνησε η εγκατάσταση των πρώτων ανεμογεννητριών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μέχρι τα τέλη του 2004, η συνολική εγκαταστημένη ισχύς σε όλο τον κόσμο ξεπέρασε τα 50000 MW. Από αυτά τα 3400MW βρίσκονται στην Ευρωπαϊκή Ένωση , της οποίας οι χώρες, το 1994 ξεπέρασαν τις Η.Π.Α σε συνολική εγκατεστημένη ισχύ, με πρωτοπόρες τη Δανία, την Ολλανδία και την Αγγλία. Η Γερμανία εισήλθε δυναμικά στο χώρο και από 60MW το 1990, έφτασε τα 16629MW εγκατεστημένης ισχύος το 2004. Μεγάλη πρόοδο έχει σημειώσει και η Ισπανία, η οποία μέχρι το τέλος του 2004 εγκατέστησε 8263MW .

Σύμφωνα με το χάρτη πορείας για τις ΑΠΕ (COM 848 τελικό, Βρυξέλλες, 10.1.2007) το 12% της ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ θα παράγεται το 2020 από αιολικά πάρκα, με τις off shore Α/Γ να κατέχουν το 1/3 της παραγωγής.

Τα αιολικά πάρκα αποτελούν την πιο οικονομική εφαρμογή αιολικής ενέργειας, διότι το κόστος κατασκευής και συντήρησης μειώνεται σημαντικά με τα μεγαλύτερα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας.

Να σημειωθεί πώς τα αιολικά πάρκα μπορεί να είναι χωροθετημένα στην ξηρά (onshore) ή στη θάλασσα (offshore).



Εικόνα 3.2 - Εγκατεστημένη Αιολική ισχύς στην Ευρώπη (το 2010)

Προβλέπεται ότι με την επίτευξη του στόχου 20% θα υπάρξει μείωση των ετήσιων εκπομπών CO2 κατά περίπου 700 εκατομμύρια τόνους το 2020, και μείωση της ζήτησης των ορυκτών καυσίμων κατά περισσότερο από 250 εκατομμύρια TIΠ. Το κόστος των επενδύσεων εκτιμάται ότι θα ξεπεράσει το 1 τρις \$, που θα χρηματοδοτηθεί εν μέρει από τα κέρδη, εν μέρει από τους φόρους και κάποιο μέρος από τους καταναλωτές. Επίσης το πρόσθετο κόστος των ΑΠΕ θα καλυφθεί μακροπρόθεσμα από τη μείωση των εκπομπών και τις τεχνολογικές εξελίξεις.

14.06	wapia iii	5 E.E. YIU	nupuyu	ovil ilver	ιρισμου ι		(02 1 11	'	
<u>Σενάρια</u>		<u>Χαμηλό</u>		A	ναφοράα			<u>Υψηλό</u>	
	Onshore	Offshore	Σύνολο	Onshore	Offshore	Σύνολο	Onshore	Offshore	Σύνολο
2010	165	11	176	165	13	177	165	15	179
2015	204	37	241	255	45	299	283	56	339
2020	285	76	361	344	133	477	403	152	556
2025	350	109	459	412	289	701	475	330	805
2030	415	156	571	467	469	935	519	586	1.104
	10 March 10								

Τα σενάρια της Ε.Ε. για παραγωγή ηλεκτρισμού από Α/Π (σε TWh)

Πηγή: Ευρωπαϊκή Επιτροπή

Πίνακας 3.1

Μέχρι σήμερα όμως φαίνεται ότι η διείσδυση της αιολικής τεχνολογίας στη Ευρώπη σχετίζεται περισσότερο με την πολιτική βούληση ή με την οικολογική συνείδηση του πληθυσμού, παρά με τα συγκριτικά πλεονεκτήματα κάθε χώρας. Απόδειξη, χώρες, που δεν ευνοούνται ιδιαίτερα από τον άνεμο, όπως η Γερμανία, το Λουξεμβούργο, η Αυστρία, η Ολλανδία παρουσιάζουν πολύ υψηλότερο βαθμό διείσδυσης από το Ηνωμένο Βασίλειο, την Ελλάδα, τη Γαλλία ή τις χώρες της Ανατολικής Ευρώπης.

Η εγκατεστημένη αιολική ισχύς στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης ανέρχονταν στο τέλος του 2009 σε 74767 MW με τη Γερμανία και την Ισπανία να συγκεντρώνουν το 60,1% της συνολικής ισχύος. Άλλες χώρες, που διαθέτουν αξιοσημείωτη ισχύ Α/Π είναι η Ιταλία, η Γαλλία, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Πορτογαλία, η Δανία. Από το σύνολο της εγκατεστημένης αιολικής ισχύος στην ΕΕ το 2,6% περίπου (1913,8 MW) αφορά υπεράκτια αιολικά πάρκα, που βρίσκονται κυρίως στο ΗΝ. Βασίλειο, Δανία, Ολλανδία, Σουηδία.

Η χώρα μας γεωγραφικά και γεωλογικά , διαθέτει σημαντικά πλεονεκτήματα σχετικά με την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, η οποία μπορεί να γίνει σημαντικός μοχλός ανάπτυξής της. Το αιολικό δυναμικό της Ελλάδας είναι το ισχυρότερο της Ευρώπης μετά από αυτό του Ηνωμένου Βασιλείου και της Ιρλανδίας. Σε πολλές περιοχές υπάρχουν θέσεις με δυναμικό >6,5 m/s, όπου υπάρχουν ή δύνανται να εγκατασταθούν αιολικά πάρκα, αλλά οι πιο σημαντικές βρίσκονται στην Εύβοια, τις Κυκλάδες, την Ανατολική Κρήτη, τη Θράκη, τα νησιά του Ανατολικού Αιγαίου και τη Λακωνία.

Από το 1982, οπότε εγκαταστάθηκε από τη ΔΕΗ το πρώτο αιολικό πάρκο στην Κύθνο, μέχρι και σήμερα έχουν κατασκευαστεί στην Άνδρο, στην Εύβοια, στη Λήμνο, Λέσβο, Χίο, Θράκη, Πελοπόννησο, Ανατολική Στερεά, Κυκλάδες και στην Κρήτη εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο συνολικής ισχύος, το 2005, 622 MW, ενώ έως το τέλος του 2010 είχαν υποβληθεί 2681 αιτήσεις για χορήγηση άδειας για αιολικά πάρκα συνολικής ισχύος 61791 MW και είχαν εκδοθεί 818 άδειες. Αξίζει να σημειωθεί πως η απόδοση του αιολικού πάρκου της Άνδρου δύσκολα μπορεί να εντοπιστεί στον υπόλοιπο κόσμο, αφού εκεί η μέση ταχύτητα του ανέμου ανέρχεται στα 9m/s Μεγάλο ενδιαφέρον εκδηλώνει επίσης και ο ιδιωτικός τομέας για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, ιδιαίτερα στην Κρήτη, όπου το αρμόδιο Υπουργείο έχει εκδώσει άδειες εγκατάστασης για νέα αιολικά πάρκα συνολικής ισχύος δεκάδων MW. Μέχρι σήμερα δεν υπάρχουν εφαρμογές στην Περιφέρεια της Ηπείρου κυρίως λόγω της έλλειψης δυνατών ανέμων, αν και τα μετεωρολογικά στοιχεία δίνουν σε κάποιες περιοχές της ταχύτητες ικανές για στοιχειοθέτηση εφαρμογών και πιστεύεται ότι θα υπάρξουν μερικές πολύ σύντομα. Από τις πιο πρόσφορες περιοχές για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών είναι τα νησιά του Αιγαίου, στα οποία συχνά πνέουν ισχυροί άνεμοι εντάσεως 8 και 9 Μποφόρ.



Εικόνα 3.3: Χάρτης Αιολικού δυναμικού της Ελλάδας

Στα θετικά της εκμετάλλευσης του αιολικού δυναμικού συγκαταλέγεται η προσοχή με την οποία γίνεται πλέον στη χώρα μας η σχεδίαση και εγκατάσταση των αιολικών πάρκων, με τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η αρμονικότερη δυνατή συνύπαρξη του με το τοπίο της περιοχής, που αυτό εγκαθίσταται. Κρίσιμο επίσης παράγοντα ανάπτυξης του κλάδου αποτελούν και προγράμματα, όπως αυτό της ανάπτυξης του Ελληνικού Συστήματος Ανεμογεννητριών καθώς και του Εθνικού Προτύπου για τις Ανεμογεννήτριες. Μάλιστα τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει και οι κατάλληλες κινήσεις από την πλευρά της Πολιτείας ώστε να αξιοποιηθεί το εν λόγω δυναμικό, οι οποίες συνίστανται στη δημιουργία του κατάλληλου θεσμικού και νομοθετικού

πλαισίου, που διέπει τη λειτουργία των εγκαταστάσεων εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας, αλλά και στη χρηματοδότηση ανάλογων έργων.

Παρά τα αισιόδοξα στοιχεία, όμως, η προώθηση της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα αντιμετωπίζει πρόβλημα και η αγορά ακόμα και μετά την ψήφιση του νόμου για τις ανανεώσιμες πηγές παραμένει μουδιασμένη. Όσο για το πολύαναμενόμενο Ειδικό Χωροταξικό Πλαίσιο για τις ΑΠΕ βρίθει ασαφειών αναφορικά με τις «ζώνες αποκλεισμού», όπου απαγορεύεται η εγκατάσταση ανεμογεννητριών. Συγχρόνως πρέπει να γίνει κατανοητό ότι για να προωθηθούν στη χώρα μας οι εφαρμογές εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας είναι απαραίτητο να αναπτυχθεί η εγχώρια βιομηχανία και τεχνολογία των ανεμογεννητριών. Έτσι θα εμποδιστεί η εκροή συναλλάγματος και θα δημιουργηθούν πολλές νέες θέσεις εργασίας.

Στα πλαίσια αυτής της προσπάθειας εντάσσεται η κατασκευή του πρώτου εξολοκλήρου ελληνικού πτερυγίου ανεμογεννήτριας, εκπετάσματος 10 μέτρων, που ανταπεξήλθε με επιτυχία στις δοκιμές του ΚΑΠΕ, και πρόκειται να διατεθεί στην ελληνική αγορά για να καλύψει τις ανάγκες για ανεμογεννήτριες 70- 150 KW και μάλιστα σε ανταγωνιστικές τιμές. Η σημασία της συγκεκριμένης δραστηριότητας έγκειται στο γεγονός ότι τα πτερύγια του δρομέα είναι η καρδιά της ανεμογεννήτριας δεδομένου ότι μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ωφέλιμη μηχανική ισχύ.

Στην Ελλάδα, οι στόχοι του 2020 απαιτούν επενδύσεις περίπου 10 δις ευρώ στην αιολική ενέργεια ή σε αναγκαίες υποδομές. Απαιτούν 10000 MW αιολικών πάρκων. Αυτό από μόνο του απαιτεί την οργανωμένη αντιμετώπιση μιας σειράς ζητημάτων με τρόπο επιστημονικά επαρκή και αυστηρά επαγγελματικό. Ενδεικτικά, τέτοια ζητήματα είναι η διαφανής ανάπτυξη του ανταγωνισμού, οι επενδύσεις, η μεγάλη διείσδυση ΑΠΕ, η σχέση ανάπτυξης-βιομηχανίας.

Η Ελληνική Εταιρεία Αιολικής Ενέργειας (ΕΛΕΤΑΕΝ) ή αλλιώς Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας ονόμασε τη δεκαετία 2010-2020 Δεκαετία του Ανέμου. Και όχι τυχαία. Η αιολική ενέργεια θα αποτελέσει τη ναυαρχίδα της πράσινης ανάπτυξης και της προσπάθειας επίτευξης των στόχων του 2020 τόσο σε εθνικό όσο και σε ευρωπαϊκό και παγκόσμιο επίπεδο. Είναι το βαρύ πυροβολικό στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Ήδη σήμερα η αιολική ενέργεια έχει ξεφύγει από το καθεστώς της περιθωριακής ενεργητικής τεχνολογίας και έχει καταστεί μια ώριμη βιομηχανία και μια αναπτυσσόμενη οικονομική αγορά, που προσελκύει κεφάλαια και διεκδικεί τη θέση της. Το γεγονός αυτό προκαλεί συγκρούσεις, η συντεταγμένη αντιμετώπιση των οποίων είναι κρίσιμη για την ορθολογική ανάπτυξη της αγοράς της αιολικής ενέργειας.
Off shore Ανεμογεννήτριες

Οι ανεμογεννήτριες, που χρησιμοποιούνται στη θάλασσα, βασίζονται στην ίδια τεχνολογία με εκείνων της ξηράς.



Εικόνα 3.4 : Off shore Α/Γ

Η εγκατάσταση τους μπορεί να γίνει είτε με την κατασκευή ατσάλινης θεμελίωσης, που κατεβαίνει ως τον πυθμένα είτε με την κατασκευή θεμελίων βαρύτητας, που είναι κατασκευές από μπετόν και βρίσκονται μόνιμα κάτω από τη στάθμη της θάλασσας και πάνω σε αυτά τοποθετείται ο πύργος της ανεμογεννήτριας είτε με πλατφόρμες, που επιπλέουν, αλλά αποτελούν μια ακριβή λύση για τα σημερινά δεδομένα.



Εικόνα 3.5. Η θεμελίωση του πύργου στον πυθμένα της θάλασσας. Στη θεμελίωση τοποθετείται και στρώμα χαλικιών.



Εικόνα 3.6. Μεταφορά των χαλικιών από τη φορτηγίδα. Αφού πλησιάσει τον πύργο, ένα έμβολο απωθεί από το σκάφος τα χαλίκια και παρασύρονται στο βυθό.

Όλα τα θεμέλια προστατεύονται από τη διάβρωση, που μπορεί να τους επιφέρει η επαφή με το θαλασσινό νερό, όπως ακριβώς και οι πετρελαϊκές πλατφόρμες.

Ο πύργος και η θεμελίωση πρέπει να είναι ισχυρές κατασκευές, ώστε να ανταπεξέρχονται στη δύναμη των θαλασσίων κυμάτων.

Στην ξηρά η θεμελίωση γίνεται από μπετόν, ενώ στη θάλασσα η κατασκευή αποτελείται από μια κυλινδρική ατσάλινη κολώνα, που φτάνει ως τον πυθμένα και προστατεύεται από μεγάλες μεταλλικές πλάκες από μαγνήσιο ή ψευδάργυρο, οι οποίες διαβρώνονται και προστατεύουν έτσι τη θεμελίωση .Οι ατσάλινοι πύργοι είναι καλυμμένοι με ειδική μπογιά, που θα διατηρήσει για 20 χρόνια τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας ενώ το σύστημα εξαερισμού, που ψύχει το κιβώτιο ταχυτήτων και τον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό μέσα στη μηχανή, σχεδιάζεται έτσι ώστε να ελαττώνει τις φθορές, που προκαλεί το θαλάσσιο νερό.





Εικόνες 3.7, 3.8, 3.9 : Έξω από το νερό τοποθετείται ο πύργος της Α/Γ. Αφού ολοκληρωθεί η κατασκευή του, που γίνεται με μικρά σωληνωτά τμήματα και όχι ενιαία, στην ξηρά συναρμολογείται το κέλυφος με 2 από τα 3 πτερύγια.

Η μεταφορά του ρεύματος από τις Α/Γ της θάλασσας γίνεται με υποθαλάσσια καλωδίωση σε έναν υποσταθμό που βρίσκεται στην ξηρά και εκεί γίνεται η σύνδεση με το υπόλοιπο δίκτυο.

Αυτή τη στιγμή η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας στη θάλασσα είναι ακριβότερη από την ξηρά ή και από τα ορυκτά καύσιμα. Το κόστος μειώνεται σε περιοχές με υψηλούς ανέμους, ενώ την επόμενη δεκαετία αναμένεται μείωση του κατά 50%, γεγονός που θα την καταστήσει ανταγωνιστική με τις Α/Γ στην ξηρά και με το φυσικό αέριο. Η χρήση της ατσαλένιας θεμελίωσης μπορεί να μειώσει το κόστος κατά το ένα τρίτο απ' ότι η θεμελίωση με μπετόν, είναι πιο ελαφριά και μπορεί να μεταφερθεί πιο εύκολα. Αυτό επιδρά σημαντικά στο συνολικό κόστος μιας και το κόστος θεμελίωσης αντιπροσωπεύει το 23-30% όλης της επένδυσης.

Το μέλλον των Υπεράκτιων αιολικών πάρκων

Οι μεγαλύτερες προσδοκίες για την επόμενη δεκαετία επικεντρώνονται στα υπεράκτια αιολικά πάρκα και στις τεχνολογίες Maglev M.A.R.S.Kite Gen concept, κ.λπ.

Τα σημαντικότερα προβλήματα στα υπεράκτια πάρκα, που αναμένεται να επιλυθούν τα επόμενα χρόνια, σχετίζονται με την «ισορροπία του συστήματος» (balance of plant) και θα επιφέρουν μείωση του κόστους (θεμελιώσεων, διασύνδεσης, πρόσβασης, συντήρησης κ.λπ.) και εγκαταστάσεις σε βάθη μεγαλύτερα των 30 μέτρων, που επιτρέπει η σημερινή τεχνολογία.

Μέσα στην επόμενη 5ετία ίσως γίνει εφικτή η εγκατάσταση σταθερών τριπόδων Α/Γ σε βάθος μέχρι 80 μέτρα, ενώ για την επόμενη δεκαετία αναμένονται πλωτά αιολικά πάρκα, που θα επιτρέψουν την αξιοποίηση του σημαντικού θαλάσσιου αιολικού δυναμικού στην Ελλάδα.





Εικόνες 3.10 και 3.11 - Πηγή: US Department of Energy. Offshore Wind Turbine Development for Deep Water

Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα στην Ελλάδα

Εκτός από τα επίγεια αιολικά πάρκα ιδιαίτερη σημασία για τη χώρα μας έχουν και τα υπεράκτια (offshore) αιολικά πάρκα, λόγω του πλούσιου αιολικού δυναμικού των θαλασσών. Μικρό μέρος όμως του δυναμικού αυτού είναι σήμερα εκμεταλλεύσιμο, διότι η υπάρχουσα τεχνολογία επιτρέπει την κατασκευή σε βάθη μέχρι 30 μέτρα, ενώ οι ελληνικές θάλασσες χαρακτηρίζονται από πολύ μεγάλα βάθη , ακόμα και κοντά στις ακτές. Για τις λίγες θαλάσσιες περιοχές, που είναι άμεσα εκμεταλλεύσιμο, έχει εκδηλωθεί έντονο επενδυτικό ενδιαφέρον με πρόταση συνολικής ισχύος 5682 MW.

Παρά τις ενδεχόμενες γραφειοκρατικές εμπλοκές και το υψηλότερο κόστος παραγωγής τους, τα υπεράκτια αιολικά πάρκα θα συνεχίσουν να παρουσιάζουν σοβαρά συγκριτικά πλεονεκτήματα σε σχέση με την επίγεια. Αναφέρεται ενδεικτικά η διαθεσιμότητα άφθονων ενιαίων εκτάσεων, οι υψηλότερες ταχύτητες ανέμου και αποδόσεων των Α/Γ, η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής τους, οι μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, η χαμηλότερη οπτική όχληση λόγω της μεγαλύτερης απόστασής τους από τις ακτές, η έλλειψη αντιδράσεων από τις τοπικές κοινωνίες κ.λπ. Επίσης λόγω των τεχνολογικών εξελίξεων, που αναμένονται την επόμενη δεκαετία (πλωτά Α/Π), ίσως γίνει εφικτή η αξιοποίηση πολύ μεγαλύτερου μέρους του θαλάσσιου αιολικού δυναμικού.

3.3 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ



Εικόνα 3.12: Αιολικό Πάρκο Χολστάιν της Γερμανίας

Σήμερα η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας γίνεται σχεδόν αποκλειστικά με μηχανές που μετατρέπουν την ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική και ονομάζονται ανεμογεννήτριες. Η απόδοσή τους εξαρτάται από το μέγεθός τους και την ταχύτητα του ανέμου, ενώ το μέγεθός τους ποικίλει και είναι συνάρτηση των αναγκών, που καλούνται να εξυπηρετήσουν. Συνήθως εγκαθίστανται σε συστοιχίες (αιολικά πάρκα) σε περιοχές με υψηλό αιολικό δυναμικό (= μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου σε μια περιοχή σε m/s) και διοχετεύουν το σύνολο της παραγωγής τους στο ηλεκτρικό σύστημα.

3.3.1 ΕΙΔΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Οι ανεμογεννήτριες κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες:

*τις ανεμογεννήτριες με οριζόντιο άξονα, όπου ο δρομέας είναι τύπου έλικα και βρίσκεται συνεχώς παράλληλος με την κατεύθυνση του ανέμου και του εδάφους και

*τις ανεμογεννήτριες με κατακόρυφο άξονα, που παραμένει σταθερός και είναι κάθετος προς την επιφάνεια του εδάφους.



Εικόνα 3.13 και 3.14 : Α/Γ κάθετου και οριζόντιου άξονα



Εικόνα 3.15 : Ανεμογεννήτριες

Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα

*ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- -Δε χρειάζεται σύστημα περιστροφής (yaw)
- -Άμεση σύνδεση με τη γεννήτρια

*MEIONEKTHMATA

- -Αρκετές ταλαντώσεις και καταπόνηση της μηχανής
- -Μη σταθερή ισχύς εξόδου λόγω της μεταβλητής ροπής
- -Λιγότερο αποδοτικές σε σχέση με το κόστος τους







(d) Darrieus 'egg beater'

Εικόνα 3.16: Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα

Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα

*ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Μηχανές με λίγα πτερύγια:

-Μικρότερη αδράνεια, άρα γρήγορες

-Ψηλή συχνότητα, άρα καλές για παραγωγή ισχύος

Μηχανές με πολλά πτερύγια:

-Μεγαλύτερη αδράνεια , άρα αργές

-Χαμηλή συχνότητα, άρα καλές για φόρτιση μπαταριών και άντληση νερού

*MEIONEKTHMA

Χρειάζονται σύστημα ευθυγράμμισης με τον αέρα (yaw)



(a) Multi-bladed wind pump

Εικόνα 3.17: Ανεμογεννήτρια Οριζόντιου άξονα



Εικόνα 3.18: Ανεμογεννήτρια Οριζόντιου άξονα

Στην παγκόσμια αγορά έχουν επικρατήσει οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα σε ποσοστό 90%. Η ισχύς τους μπορεί να ξεπερνά τα 500 KW και μπορούν να συνδεθούν κατευθείαν στο ηλεκτρικό δίκτυο της χώρας. Έτσι μια συστοιχία ανεμογεννητριών, που ονομάζεται αιολικό πάρκο, μπορεί να λειτουργήσει σαν μια μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχει βέβαια και η δυνατότητα αυτόνομης λειτουργίας των ανεμογεννητριών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μη ηλεκτροδοτούμενες περιοχές, μηχανικής ενέργειας για χρήση σε αντλιοστάσια, καθώς και θερμότητας. Τόσο, όμως, η παραγόμενη ισχύς των εφαρμογών αυτού του είδους, όσο και η οικονομική τους σημασία είναι περιορισμένη.

3.3.2 ΜΕΡΗ Α/ΓΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ

Μια τυπική ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα αποτελείται από τα εξής μέρη:

<u>Το δρομέα</u>, που αποτελείται από δύο ή τρία πτερύγια, από ενισχυμένο πολυεστέρα. Τα πτερύγια προσδένονται πάνω σε μια πλήμνη είτε σταθερά είτε με τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από το διαμήκη άξονά τους μεταβάλλοντας το βήμα.

<u>Το σύστημα μετάδοσης της κίνησης</u>, που αποτελείται από τον κύριο άξονα, τα έδρανά του και το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών, το οποίο προσαρμόζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στη σύγχρονη ταχύτητα της ηλεκτρογεννήτριας. Η ταχύτητα περιστροφής παραμένει σταθερή από την κανονική λειτουργία της μηχανής.

<u>Την ηλεκτρογεννήτρια</u>, σύγχρονη ή επαγωγική με 4 ή 6 πόλους, η οποία συνδέεται με την έξοδο του πολλαπλασιαστή μέσω ενός ελαστικού ή υδραυλικού συνδέσμου και μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και βρίσκεται συνήθως πάνω στον πύργο της ανεμογεννήτριας.

<u>Το σύστημα πέδης</u>, το οποίο είναι ένα συνηθισμένο δισκόφρενο, που τοποθετείται στον κύριο άξονα ή στον άξονα της γεννήτριας.

<u>Το σύστημα προσανατολισμού</u>, το οποίο αναγκάζει τον άξονα περιστροφής του δρομέα να βρίσκεται συνεχώς παράλληλα με τη διεύθυνση του ανέμου. Κατά αυτόν τον τρόπο αυξάνει τη διαθεσιμότητα της ανεμογεννήτριας, δηλαδή το ποσοστό του χρόνου, που αυτή είναι διαθέσιμη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία αποτελεί ένα δείκτη, που πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη στο σχεδιασμό ενός τέτοιου συστήματος.

<u>Τον πύργο</u>, ο οποίος στηρίζει όλη την παραπάνω ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση. Συνήθως είναι μεταλλικός, σωληνωτός ή δικτυωτός και σπανίως από οπλισμένο σκυρόδεμα, ενώ το ύψος του είναι τέτοιο, ώστε ο δρομέας να δέχεται την αδιατάρακτη από το έδαφος ροή του ανέμου.

<u>Τον ηλεκτρικό πίνακα και τον πίνακα ελέγχου</u>, που είναι τοποθετημένοι στη βάση του πύργου. Μέσω του συστήματος αυτού ρυθμίζονται όλες οι λειτουργίες της ανεμογεννήτριας.



Βασικά στοιχεία Ανεμογεννήτριας



Εικόνα 3.20: Μέρη Ανεμογεννήτριας

3.3.3 ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Η παραγωγική διαδικασία, που αφορά τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου, μέσω των ανεμογεννητριών, αρχικά σε μηχανική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική είναι σχετικά απλή και περιλαμβάνει:

-την περιστροφή των πτερυγίων από τον άνεμο

-την αύξηση της ταχύτητας του οριζόντιου άξονα μέσω κιβωτίου ταχυτήτων

-την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω γεννήτριας

Η ποσότητα ηλεκτρισμού, που παράγει μια Α/Γ εξαρτάται από την πυκνότητα ισχύος του ανέμου (Pair), δηλαδή την ποσότητα της αιολικής ενέργειας, που διέρχεται μέσω της επιφάνειας που σαρώνουν τα πτερύγια.

Θεωρητικά η ισχύς μιας Α/Γ προσδιορίζεται από τον τύπο:

$$P_{air} = C_{Pair} . n. (p_{air}/2) . V^{3} . A$$

όπου

CPair = ο συντελεστής ισχύος της Α/Γ (που εξαρτάται από τον τύπο του ρότορα της ανεμογεννήτριας και διαμορφώνεται μεταξύ 25%-45%)

n= η μηχανική αποδοτικότητα

Pair = η πυκνότητα αέρα (Kg/m³)

Α = εμβαδόν (σε m²) του δίσκου του δρομέα (η επιφάνεια που καλύπτει με την περιστροφή του ο ρότορας της Α/Γ)

V = ταχύτητα του ανέμου σε m/s

Δηλαδή η ενεργειακή απόδοση μιας ανεμογεννήτριας εξαρτάται:

*από την ταχύτητα του ανέμου στο σημείο εγκατάστασης

```
*τη διάμετρο του έλικα
```

***το συντελεστή απόδοσης** του έλικα της Α/Γ

Το ενεργειακό περιεχόμενο του ανέμου εξαρτάται από τον κύβο (V^3) της μέσης ταχύτητάς του, δηλαδή, αν η ταχύτητα είναι δυο φορές υψηλότερη, περιέχει 2^3 =2X2X2 = οκτώ φορές μεγαλύτερη ενέργεια. Έτσι με ταχύτητα 8m/s το ποσό ενέργειας ανά δευτερόλεπτο είναι 314Watt ανά τετραγωνικό μέτρο, που εκτίθεται στον αέρα, ενώ με 16 m/s είναι 2509 W/m².

Στις σύγχρονες Α/Γ η υψηλότερη μηχανική αποδοτικότητα του στροβίλου (45-50%) επιτυγχάνεται με μια ταχύτητα περίπου 9 m/s ενώ η αξιοποίηση των υψηλότερων ταχυτήτων είναι οικονομικά ασύμφορη (ανάγκη μεγαλύτερης γεννήτριας).

3.3.4 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ-ΠΛΕΟΝΕΚΤΞΗΜΑΤΑ Α/Γ

<u>Τα βασικά πλεονεκτήματα</u> των ανεμογεννητριών <u>είναι</u> η ανεξαρτησία τους από καύσιμα κάθε είδους, η εκπομπή μηδενικών ρύπων και η παραγωγή ενέργειας από μια ανανεώσιμη και πάντα διαθέσιμη πηγή.

Το κύριο μειονέκτημά τους (εκτός από την ακουστική και οπτική ενόχληση-αν και η πρώτη πλέον δεν υφίσταται μιας και η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας των

ανεμογεννητριών έχει καταστήσει πρακτικά αθόρυβη τη λειτουργία τους, που ίσως προκαλούν στους κατοίκους των περιοχών όπου τοποθετούνται , τις σπάνιες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές στο ραδιόφωνο, τηλεόραση, τηλεπικοινωνίες, που επιλύονται όμως με την ανάπτυξη της τεχνολογίας και τέλος τις σημαντικές καταπονήσεις και φθορές που μπορούν να προκαλέσουν στα μηχανικά τους μέρη οι θυελλώδεις άνεμοι, που αλλάζουν απότομα κατεύθυνση και ένταση), <u>είναι</u> ότι ακόμα και οι πλέον προηγμένες ανεμογεννήτριες, δεν μπορούν να αξιοποιήσουν παρά ένα μικρό ποσοστό της ενέργειας του ανέμου που τις κινεί. Υπάρχουν πολλοί λόγοι γι' αυτό, αλλά ο βασικότερος είναι η ασυνέχεια των ανέμων κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Οι δυνάμεις τριβής κοντά στην επιφάνεια και οι στροβιλισμοί λόγω της εγγύτητας με το έδαφος, προκαλούν αυξομειώσεις στην ισχύ των ανέμων και αλλαγές κατεύθυνσης, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η πληρέστερη αξιοποίηση της ενέργειας που περικλείουν.

Η ιδανική θέση για ένα σταθμό ανεμογεννητριών θα ήταν να εγκατασταθεί μέσα σε ρεύματα αέρα ,τα οποία πνέουν σε μόνιμη βάση και χωρίς σημαντικές αυξομειώσεις.



3.3.5 ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΑΝΙΑΣ-ΚΑΛΙΦΟΡΝΙΑΣ

Εικόνα 3.21 - Το πρώτο αιολικό πάρκο στο Vindeby της Δανίας

Η εγκατάσταση των πρώτων ανεμογεννητριών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας άρχισε από τα μέσα της δεκαετίας του '70 στη Δανία και συνεχίστηκε με τα αιολικά πάρκα της Καλιφόρνιας στις αρχές της δεκαετίας του '80, με το Δανέζικο μοντέλο να αφορά μικρές συστάδες μηχανών (το πολύ τρείς ή περισσότερες

ανεμογεννήτριες) διασκορπισμένες γεωγραφικά σε ένα μεγάλο μέρος της χώρας), σε αντίθεση με το μοντέλο της Καλιφόρνιας ,που αφορούσε μια εμπορική συνάθροιση μεγάλου αριθμού μηχανών σε στενή γεωγραφική εγγύτητα. Παρά τις διαφορές στα μεγέθη, οι πρόσφατες Ευρωπαϊκές εγκαταστάσεις ακολούθησαν το μοντέλο της Καλιφόρνιας.

3.3.6 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΣΤΟΝ ΤΟΜΕΑ ΤΩΝ Α/Γ

Παρότι μια αιολική μηχανή μοιάζει απλή στην πραγματικότητα ενσωματώνει τις τελευταίες τεχνολογικές εξελίξεις στους τομείς των υλικών, της αεροδυναμικής, των ηλεκτρονικών ισχύος και του ψηφιακού ελέγχου.

Μια τυπική Α/Γ έχει οριζόντιο άξονα περιστροφής και τρία πτερύγια, τοποθετημένα στην κορυφή πύργου. Μέσα σε αυτό το γενικό πλαίσιο, έχουν γίνει πολλές βελτιώσεις τα τελευταία χρόνια, που αφορούν τη δυνατότητα των μηχανών να μετατρέπουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ενέργεια από τον άνεμο σε ηλεκτρική. Τέτοιες είναι: ισχυρότεροι δρομείς, μεγαλύτερα σε μήκος, λεπτότερα και πιο ανθεκτικά φτερά, βελτιωμένα ηλεκτρονικά ισχύος και ελέγχου. Ορισμένες ανεμογεννήτριες λειτουργούν με μεταβλητή ταχύτητα περιστροφής ή χρησιμοποιούν ειδικού τύπου πολυπολικές ηλεκτρικές γεννήτριες, που συνδέονται απευθείας στο δρομέα χωρίς αύξηση στροφών.

Η πιο εντυπωσιακή αλλαγή στην τεχνολογία των ανεμογεννητριών είναι η συνεχής αύξηση του μεγέθους τους. Είναι αξιοσημείωτο ότι μεταξύ 1980 και 2010, το μέγεθος των Α/Γ ((διάμετρος) σχεδόν δεκαπλασιάστηκε και η μέση ισχύς τους εκατονταπλασιάστηκε. Κάποτε μια τυπική Α/Γ ήταν της τάξης των 25 KW. Σήμερα η μεγαλύτερη Α/Γ είναι η Ε-126 της Enercon με διάμετρο 127 μέτρα και ισχύ 6MW, ενώ υπό κατασκευή βρίσκονται η Α/Γ Clipper Brittania (150 m,7,5 MW) και η πλωτή Α/Γ Sway Norway με 10MW. Μέσα στη δεκαετία προβλέπεται η κατασκευή Α/Γ με ισχύ μεγαλύτερη των 20MW. Συγχρόνως η αύξηση του μεγέθους τους μείωσε και το κόστος κατασκευής και εγκατάστασής τους.



Σχήμα 3.1. Πηγή: EWEA

3.3.7 ΕΤΑΙΡΕΙΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ Α/Γ

Η παραγωγή ανεμογεννητριών ελέγχεται από 10 εταιρείες, οι οποίες καλύπτουν περίπου το 85-90% της νέας αιολικής ισχύος, που εγκαθίσταται κάθε έτος και προέρχονται κυρίως από τη Γερμανία, τις ΗΠΑ, τη Δανία, την Ισπανία, αλλά τα τελευταία χρόνια παρατηρείται σημαντική αύξηση της συμμετοχής εταιρειών από την Κίνα και την Ινδία. Οι κινέζικες εταιρείες σε πρώτη φάση απέκτησαν τεχνογνωσία μέσω εξαγοράς μικρών ευρωπαϊκών εταιρειών, δραστηριοποιούνται ήδη με απαιτήσεις στην παγκόσμια αγορά στην οποία αναμένεται να

		Παραδοθέντα	Μερίδιο	Κύκλ.	Παρ/θέντα	Απασχ.
Εταιρία	Χώρα	MW 2008	2008	Εργ. 2008	MW 2009	2009
Vestas	∆avia	6.160	19,2%	6.035	6.131	20.730
GE Wind	НПА	5.239	16,4%	μ.δ.	μ.δ.	3.000
Gamesa	Ισπανία	3.684	11,5%	3.651	3300-3600	7.200
Enercon	Γερμανία	2.806	<mark>8,8</mark> %	2.800	3100-3300	12.000
Suzlon	Ινδία	2.311	7,2%	2.113	1900-2100	14.000
Siemens-Wind						
Power	Γερμανία	1.947	6,1%	2.092	2.500	5.500
Sinovel	Kiva	1.403	4,4%	μ.δ.	3.300	2.000
Acciona	Ισπανία	1.290	4,0 %	1784**	μ.δ.	629
Goldwind	Kiva	1.132	3,5%	μ.δ.	μ.δ.	1.130
Nordex	Γερμανία	1.075	3,4%	1.136	μ.δ.	2.200
Λοιπές		4.955	15,5%			
Σύνολο		32.002	100,0%			

Οι μεγαλύτερες εταιρίες κατασκευής Α/Γ στον κόσμο (2009)

Πηγή: EurObserv'ER, Mars 2010

Πίνακας 3.2

3.3.8 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΙ ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Τα πρώτα χρόνια λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας (που συνήθως καλύπτονται με εγγυήσεις από την πλευρά του κατασκευαστή) δεν υπάρχουν σοβαροί λειτουργικοί κίνδυνοι ούτε σοβαρές ανάγκες συντήρησης.

Μετά την περίοδο αυτή, τα πρώτα προβλήματα εμφανίζονται στο σύστημα ελέγχου και τους αισθητήρες και ακολουθούν χρονικά τα υπόλοιπα τμήματα ή εξαρτήματα.

Τα κόστη επίβλεψης, συντήρησης, αντικατάστασης, ασφάλισης και κυρίως τα κόστη από τους νεκρούς χρόνους (όταν η ανεμογεννήτρια είναι εκτός λειτουργίας) αυξάνονται με την πάροδο του χρόνου, ιδίως στα τελευταία χρόνια της διάρκειας ζωής των Α/Γ (20 έτη).

Τα σημαντικότερα προβλήματα προέρχονται από το κιβώτιο ταχυτήτων και μπορούν να απειλήσουν την ασφάλεια του αιολικού πάρκου συνολικά.



Γράφημα 3.4 : Λειτουργικοί κίνδυνοι ανεμογεννητριών

U.S. Department of Energy, 20% Wind Energy by 2030

Σύμφωνα με μελέτη της εταιρείας ΕΝΤΕΚΑ για τη διαθεσιμότητα των Α/Π της στην Εύβοια, μια μέση Α/Γ βρίσκεται εκτός λειτουργίας 312 ώρες το χρόνο (σε περίοδο αποδοτικού ανέμου), που αντιπροσωπεύει περίπου το 10% των παραγωγικών ωρών μιας καλής αιολικής περιοχής.

ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΙΘΑΝΩΝ ΒΛΑΒΩΝ

Οι σημαντικότεροι λόγοι, που οι Α/Γ βρίσκονται εκτός παραγωγικής λειτουργίας, είναι οι περιβαλλοντικοί, τα διάφορα κατασκευαστικά προβλήματα, οι δυσκολίες απορρόφησης από το δίκτυο, η συντήρηση και άλλοι λόγοι όπως απρόβλεπτα, νεκροί χρόνοι κ.λπ.

Οι δονήσεις, που δέχονται κυρίως τα πτερύγια αλλά και άλλα μέρη μιας ανεμογεννήτριας από τον άνεμο, είναι παράγοντας, που καθορίζει κατά το μέγιστο την πιθανότητα λειτουργικής αστοχίας ή ατυχήματος. Οι δονήσεις μπορούν να προκαλέσουν τη μετατόπιση υλικών, την αποκόλληση κάποιων συνδέσμων, ακόμα και το μερικό ή ολικό σπάσιμο των πτερυγίων.

Ένας άλλος παράγοντας, που μπορεί να οδηγήσει σε πιθανή βλάβη στην Α/Γ είναι η σκόνη(με τη μορφή γύρης, χνουδιών, σπόρων, εντόμων κ.λπ.), η οποία παρεμποδίζει τη ροή του αέρα και μειώνει την ψύξη και κατά συνέπεια αυξάνεται η θερμοκρασία των διαφόρων μηχανικών και ηλεκτρικών εξαρτημάτων, όπως είναι η γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, το κιβώτιο ταχυτήτων κ.λπ.



Σχήμα 3.2 - Πηγή: EN.TE.KA Experience and Conclusions from the Operation and Maintenance of NEG Micon Wind Turbines in Greece.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4_- ΚΩΔΙΚΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σχέδιο ελέγχου και η προσομοίωση απαιτούν διάφορα αναλυτικά εργαλεία. Η εφαρμογή μιας σύγχρονης θεωρίας ελέγχου προϋποθέτει ένα γραμμικό μοντέλο της μη γραμμικής Α/Γ, ενώ μετά το σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου, πρέπει να γίνουν προσομοιώσεις του κλειστού συστήματος για να εξεταστεί η απόδοση του ελεγκτή.

Το κεφάλαιο αυτό περιγράφει συνοπτικά το πλαίσιο μοντελοποίησης που διαμορφώνει τη βάση αυτών των γραμμικών μοντέλων και το εργαλείο προσομοίωσης. Επιπλέον γίνεται αναφορά και σε ένα πιο κατανοητό εργαλείο προσομοίωσης, το οποίο χρησιμοποιείται για τη διασταύρωση των αποτελεσμάτων.

4.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Για τη δημιουργία ενός σωστού σχεδίου ελέγχου, είναι σημαντικό να καθοριστεί μία σχέση που να συνδέει τις εισόδους , τις εξόδους και τις διαταραχές της ανεμογεννήτριας, αξιοποιώντας εσωτερικές μεταβλητές. Η έξοδος της γεννήτριας είναι η πραγματική ταχύτητα περιστροφής της, η οποία με τη σειρά της επηρεάζει την αεροδυναμική ισχύ που συλλαμβάνεται. Οι είσοδοι ελέγχου, είναι (όπου μπορούν να εφαρμοστούν) η γωνία κλίσης και το ρεύμα της γεννήτριας. Η γωνία εκτροπής μπορεί επίσης να συμπεριληφθεί. Τέλος, όταν μιλάμε για ισχύ ανέμου αναφερόμαστε στον όρο της διαταραχής.

Αν και υπάρχουν πολλές διαφορετικές εκδόσεις κατάλληλων μοντέλων στη βιβλιογραφία, το μοντέλο που χρησιμοποιείται στα εργαστήρια της NREL και το οποίο περιγράφουμε, είναι ένα από τα λίγα που έχει δοκιμαστεί σε πραγματικές συνθήκες. Το συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιεί 15 μεταβλητές στην πιο γενική του μορφή.

4.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ FAST

Ο κώδικας του FAST (Wilson et al. 1999) μπορεί να μοντελοποιήσει τη δυναμική απόκριση για ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα με δύο ή και τρία πτερύγια.

Για τις ανεμογεννήτριες με δύο πτερύγια χρησιμοποιούνται 15 DOF για να περιγράψουν τη δυναμική της γεννήτριας, 4 DOF για την ευελιξία του πύργου, 1 DOF για την ταλάντωση του δρομέα, 6 DOF για την ευελιξία των λεπίδων (3 για κάθε λεπίδα), 1 DOF για την εκτροπή της ατράκτου, 1 DOF για την κλίση της ατράκτου και 2 DOF για τη μεταβαλλόμενη ταχύτητα της γεννήτριας. Το FAST εκτελείται με οποιοδήποτε υποσύνολο από αυτά τα DOF αναμμένο κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Τα μοντέλα του FAST χωρίζονται σε άκαμπτα τμήματα (γη, πλάκα βάσης, άτρακτος, γεννήτρια και πλήμνη) και σε εύκαμπτα τμήματα (λεπίδες, άξονας χαμηλής ταχύτητας και πύργος).



Σχήμα 4.1- Βαθμοί ελευθερίας (DOF) όπως μοντελοποιούνται με το FAST

Η μοντελοποίηση της ευελιξίας των λεπίδων του πύργου από το FAST προϋποθέτει μια προσέγγιση υποθετικών λειτουργιών.

<u>Ο πύργος</u>, που θεωρείται ενοποιημένος με τη γη, έχει τη δυνατότητα να κάμπτει σε 2 κατευθύνσεις παράγοντας μπρός-πίσω και πλευρική κίνηση. Η ευκαμψία του μοντελοποιείται με δύο λειτουργίες σε κάθε κατεύθυνση. Η κορυφή του πύργου αποτελείται από μια σταθερή πλάκα βάσης, η οποία στηρίζει έναν υποστηρικτικό άξονα εκτροπής και την άτρακτο. Ο υποστηρικτικός άξονας δίνει τη δυνατότητα περιστροφής (ανάλογα με τις αλλαγές στη διεύθυνση του ανέμου) στο σύστημα πάνω από την κορυφή του πύργου.

Στην άτρακτο, η οποία επιτρέπεται να κλίνει, συναντάμε τη συνδεσμολογία μετάδοσης κίνησης, συμπεριλαμβανομένης της γεννήτριας, του κιβωτίου ταχυτήτων

και του άξονα χαμηλής ταχύτητας. Ο άξονας υψηλής ταχύτητας συνδέει τη γεννήτρια με το κιβώτιο ταχυτήτων και ο άξονας χαμηλής ταχύτητας συνδέει το κιβώτιο ταχυτήτων με το δρομέα.

<u>Ο δρομέας</u> αποτελείται από την πλήμνη, ένα σύστημα κλίσης των λεπίδων, τις λεπίδες- δρομείς, ενώ για σχέδια δύο λεπίδων υπάρχει η πιθανότητα ύπαρξης ενός ταλαντευόμενου αρμού μεταξύ δρομέα και άξονα χαμηλής ταχύτητας που αντισταθμίζεται από μια γωνία delta-3.

<u>Η πλήμνη</u> διαθέτει δύο ή τρεις εύκαμπτες λεπίδες, με ιδιότητες εξαρτώμενες από το μήκος τους και δυνατότητα αεροδυναμικής κλίσης και συστροφής (υπάρχει η δυνατότητα κάθε λεπίδα να είναι κατασκευαστικά προστριμμένη). Κάμψη επέρχεται είτε στην επιφάνεια του δρομέα (ορίζεται χρησιμοποιώντας μία κραδασμική λειτουργία) είτε έξω από την επιφάνεια του δρομέα (ορίζεται χρησιμοποιώντας δύο κραδασμικές λειτουργίες).

Μεταβλητή	Περιγραφή				
q ₁	Λεπίδα 1, μετατόπιση κατά τη φορά του ανέμου για σημείο λειτουργίας 1				
q ₂	Λεπίδα 2, μετατόπιση κατά τη φορά του ανέμου για σημείο λειτουργίας 1				
q ₃	Γωνία ταλάντωσης				
q ₄	Γωνία Αζιμούθιου, μεριάς δρομέα				
q ₅	Γωνία κλίσης ατράκτου				
q ₆	Γωνία εκτροπής ατράκτου				
q ₇	Επιμήκης μετατόπιση της κορυφής του πύργου για σημείο λειτουργίας 1				
q ₈	Οριζόντια μετατόπιση της κορυφής του πύργου για σημείο λειτουργίας 1				
q 9	Επιμήκης μετατόπιση στην κορυφή του πύργου για σημείο λειτουργίας 2				
q ₁₀	Οριζόντια μετατόπιση της κορυφής του πύργου για λειτουργίας 2				
q ₁₁	Λεπίδα 1, μετατόπιση με τη μεταφορά του ανέμου για σημείο λειτουργίας 1				

q ₁₂	Λεπίδα 2, μετατόπιση με τη φορά του ανέμου για σημείο λειτουργίας 2
q ₁₃	Λεπίδα 1, μετατόπιση με την κόψη εμπρός για σημείο λειτουργίας 1
q ₁₄	Λεπίδα 2, μετατόπιση με την κόψη εμπρός για σημείο λειτουργίας 2
q ₁₅	Γωνία αζιμούθιου , μεριά γεννήτριας

Πίνακας 4.1- Βαθμοί ελευθερίας, μοντελοποιημένοι με το FAST

Τα πλαίσια αναφοράς, που έχουν προσδιοριστεί για το κάθε άκαμπτο σώμα, καθορίζονται από συστήματα συντεταγμένων, τα οποία σχηματίζονται από ορθογώνια σύνολα μοναδιαίων διανυσμάτων.

Οι περισσότερες από τις μήτρες μετασχηματισμού αναπαριστούν την περιστροφή ενός άκαμπτου σώματος σε έναν από τους τοπικούς άξονες συντεταγμένων προσομοιώνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο μια μεταβολή στο γωνιακό προσανατολισμό από το ένα σώμα στο επόμενο. Οι μετατοπίσεις και οι κινήσεις για κάθε σημείο της τουρμπίνας καταγράφονται, όταν οριστεί πλήρως ένα σύνολο από σύστημα συντεταγμένων. Στη συνέχεια μπορούν να μεταφραστούν σε οποιοδήποτε σύστημα με μετασχηματισμό συντεταγμένων και να χρησιμοποιηθούν για τη διαμόρφωση της κινηματικής και κινητικής στην τουρμπίνα.

Από τον κώδικα FAST δεν εξάγονται ρητές συμβολικές εξισώσεις κίνησης παρά μόνον αριθμητικές για τις οποίες χρησιμοποιείται η μέθοδος Kane (Kane και Levinson 1985).

4.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΩΝ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ FAST

4.4.1 ΛΕΠΙΔΕΣ ΚΑΙ ΠΥΡΓΟΣ

Η μεταχείριση εύκαμπτων σωμάτων σε δυναμική άκαμπτου σώματος απαιτεί μία προσέγγιση τέτοια ώστε η γενική απόκλιση να μπορεί να αναπαρασταθεί με λίγα μόνο DOF. Στο FAST τόσο οι λεπίδες όσο και ο πύργος αντιμετωπίζονται ως πρόβολοι δοκοί προσκολλημένες στην πλήμνη ή το έδαφος. Η προσέγγιση υποθετικής λειτουργίας χρησιμοποιείται για να διατυπώσει τη δυναμική αυτών των λεπίδων και των μοντέλων πύργων. Η απόκλιση/εκτροπή u(z,t) για οποιοδήποτε σημείο της λεπίδας ή του πύργου για κάθε χρόνο t μπορεί να εκφραστεί ως:

 $u(z,t) = \sum_{i=1}^{n} q_i(t) \varphi_i(z)$ *i=1,...,n*

Όπου z είναι η θέση κατά μήκος της κεντρικής γραμμής της λεπίδας ή του πύργου, t είναι ο χρόνος, φ_i(z) είναι ένα κατάλληλο σχήμα λειτουργίας για τη λεπίδα ή τον πύργο, και q_i(t) είναι σε γενικευμένες συντεταγμένες η κορυφή του πύργου ή η άκρη της λεπίδας, πρόκειται λοιπόν, για μία συνάρτηση χρόνου.

4.4.2 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

Η μετάδοση της κίνησης μοντελοποιείται ως ισοδύναμη στροφικής δύναμης ελατηρίου διαχωρίζοντας τη γεννήτρια από τη πλήμνη. Ο άξονας μπορεί να έχει γραμμική στροφική δύναμη ελατηρίου και γραμμική στροφική απόσβεση. Η εξίσωση για τον άξονα μπορεί να εκφραστεί ως:

$$T_{shaft} = K_d(q_4 - q_{15}) + C_d(\dot{q}_4 - \dot{q}_{15}),$$
(2.2)

Όπου T_{shaft} είναι η ροπή στο τέλος της γεννήτριας του άξονα χαμηλής ταχύτητας, K_d είναι η σταθερά μετάδοση κίνησης στροφικής ελαστικής ακαμψίας, και C_d είναι η σταθερά μετάδοσης κίνησης στροφικής απόσβεσης. q_4 , q_{15} , \dot{q}_4 , και q_{15}^{\cdot} είναι οι γωνίες αζιμούθιου του δρομέα και της γεννήτριας και τα παράγωγά τους, αντίστοιχα (βλέπε πίνακα 2-1).

4.4.3 FENNHTPIA

Η μοντελοποίηση των μεταβολών της ταχύτητας περιστροφής του άξονα περιλαμβάνει τέσσερις επιλογές: σταθερή περιστροφική ταχύτητα, επαγωγική γεννήτρια, εκκίνηση της μηχανής και κλείσιμο της μηχανής

Σημειώνεται πως η γεννήτρια (για ένα μεγάλο τμήμα της μοντελοποίησης που περιγράφεται) μοντελοποιήθηκε ως γεννήτρια σταθερής ροπής, η οποία εφαρμόζεται στον άξονα χαμηλής ταχύτητας, ο οποίος βρίσκεται προς τη μεριά της γεννήτριας

Η περιστροφική ταχύτητα της ανεμογεννήτριας μπορεί να ποικίλλει, όμως ρυθμίζεται σε μια επιθυμητή τιμή μέσω του ελέγχου στην κλίση του πτερυγίου. Αυτό βρίσκεται σε συμφωνία με τη μοντελοποίηση της λειτουργίας στροβιλομηχανών στην περιοχή λειτουργίας 3, όπου η ροπή της γεννήτριας θεωρείται ότι είναι σταθερή.

4.4.4 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ

Οι υπολογισμοί των αεροδυναμικών φορτίων του πτερυγίου βασίζονται στη θεωρία ορμής στοιχείου πτερυγίου και είναι μοντελοποιημένοι στις υπορουτίνες AeroDyn (Laino and Hansen 2003), που συνδέονται με το FAST. Οι αεροδυναμικές δυνάμεις του πτερυγίου υπολογίζονται στο AeroDyn και στη συνέχεια περνούν στην υπορουτίνα δυναμικής του FAST. Στο FAST οι εκτροπές και οι ταχύτητες υπολογίζονται σε διάφορα σημεία κατά μήκος του πτερυγίου από τη ρίζα ως το άκρο του και μεταφέρονται στο AeroDyn . Το AeroDyn χρησιμοποιεί αυτές τις εκτροπές και ταχύτητες για τον υπολογισμό της γωνίας προσβολής για τμήμα του πτερυγίου, η οποία με τη σειρά της αλλάζει τον υπολογισμό των αεροδυναμικών δυνάμεων και ροπών του τμήματος του πτερυγίου που προκύπτουν.

4.4.5 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Εφαρμόζοντας τη μέθοδο Kane (Kane and Levinson 1985) λύνουμε τις εξισώσεις κίνησης για την επιτάχυνση χρησιμοποιώντας την απαλοιφή Gauss.

Η r^η εξίσωση έχει τη μορφή:

 $\sum_{s} C_{rs} * \ddot{q_s} = f_r(q, \dot{q})$

όπου C_{rs} είναι το στοιχείο της μήτρας μάζας στην rth σειρά και την sth στήλη. Το \ddot{q}_s είναι οι επιταχύνσεις κάθε γενικευμένης συντεταγμένης. Ο όρος $f_r(q,\dot{q})$ περιλαμβάνει την επίδραση όλων των εφαρμοζόμενων δυνάμεων (αεροδυναμικές, βαρύτητας, δυνάμεις ελατηρίου και απόσβεσης), καθώς και το αποτέλεσμα των δυνάμεων της αδράνειας που δημιουργείται από τη φυγόκεντρη δύναμη και τη δύναμη coriolis.

Στο FAST, οι εξισώσεις κίνησης λύνονται αριθμητικά χρησιμοποιώντας την τεσσάρων σταδίων μέθοδο πρόβλεψης Adams-Bashforth και τη διόρθωση Adams-Moulton (Press *et al.* 1989). Καθώς η μέθοδος αυτή δεν ξεκινά τους υπολογισμούς από μόνη της, χρησιμοποιείται η τεσσάρων σταδίων μέθοδος Runge-Kutta (Press *et al.* 1989) για τα πρώτα τέσσερα χρονο-βήματα κατά την έναρξη μιας προσομοίωσης (Wilson *et al.* 1999). Το χρονο-βήμα της αριθμητικής ολοκλήρωσης, το οποίο είναι σταθερό σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, επιλέγεται και εισάγεται στα αρχείο εισόδου του FAST.

4.5 ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ FAST

4.5.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Τα γραμμικά μοντέλα για μια ανεμογεννήτρια μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$\dot{x} = Ax + Bu + \Gamma u_D$$
$$y = Cx + Du + Eu_D$$

όπου $x \in \mathbb{R}^N$ είναι το διάνυσμα της κατάστασης, $u \in \mathbb{R}^M$ το διάνυσμα εισόδου ελέγχου και $u_D \in \mathbb{R}^O$ το διάνυσμα εισόδου της διαταραχής, ενώ $y \in \mathbb{R}^P$ είναι το αποτέλεσμα του ελέγχου ή η μετρούμενη έξοδος.

 $A \in R^{NxN}$ παριστάνει τη μήτρα κατάστασης, $B \in R^{NxM}$ τη μήτρα κέρδους εισόδου ελέγχου και $\Gamma \in R^{NxO}$ τη μήτρα κέρδους διαταραχής.

Ο όρος $C \in R^{PxN}$ συσχετίζει τη μετρούμενη έξοδο y με την κατάσταση της ανεμογεννήτριας. Ο όρος $D \in R^{PxM}$ σχετίζει την έξοδο με την είσοδο ελέγχου. Ο όρος $E \in R^{PxO}$ σχετίζει τη μετρούμενη έξοδο με τις καταστάσεις διαταραχής. Στις περισσότερες περιπτώσεις που περιλαμβάνει η παρούσα αναφορά, τα D και E είναι μηδέν, και το \dot{x} παριστάνει την παράγωγο ως προς το χρόνο του x.

Για σύγχρονες συμβατικές ανεμογεννήτριες, βασική είσοδος ελέγχου είναι η συλλογική γωνία κλίσης του πτερυγίου του δρομέα. Η διαταραχή είναι η είσοδος του ανέμου και οι κύριες καταστάσεις του συστήματος περιλαμβάνουν την ταχύτητα του δρομέα ή την ταχύτητα της γεννήτριας (ή και τις δύο), το άνοιγμα του πτερυγίου και την ταχύτητα της μετακίνησης αυτής, την επιμήκη απόκλιση από την ισορροπία του πύργου και την ταχύτητα αυτής της απόκλισης κλπ. Τα μετρούμενα σήματα ελέγχου μπορεί να είναι διάφορα: ταχύτητα του δρομέα ή της γεννήτριας (ή και η επιτάχυνητας (ή και οι δύο), άνοιγμα του πτερυγίου, καθώς και η ταχύτητα και η επιτάχυνση αυτής,

η μετακίνηση του πύργου, η ταχύτητα και η επιτάχυνση αυτής της μετακίνησης. Αντικειμενικός σκοπός ενός ιδανικού συστήματος είναι να δίνει τη δυνατότητα ελέγχου με τον ελάχιστο αριθμό απαιτούμενων μετρήσεων. Αυξημένη πολυπλοκότητα στο ελεγχόμενο σύστημα μεταφράζεται σε υψηλότερο λειτουργικό κόστος, σε υψηλότερα κόστη λειτουργίας και συντήρησης ή και τα δύο.

Διαδικασία γραμμικοποίησης

Υπάρχει μια μέθοδος για την εξαγωγή ενός μοντέλου γραμμικών συστημάτων από το FAST με χρήση δύο μεθόδων : <u>μιας συμβολικής μεθόδου</u>, η οποία χρησιμοποιείται ως εργαλείο ελέγχου διασταύρωσης σε απλές περιπτώσεις και δίνει τις μήτρες μάζας, απόσβεσης και δυσκαμψίας χωρίς την επίδραση της αεροδυναμικής και μιας <u>αριθμητικής μεθόδου</u> διαταραχής, η οποία δίνει τις μήτρες με την επιδραση της αεροδυναμικής.

Εμείς χρησιμοποιούμε την αριθμητική μέθοδο.

Στην αριθμητική μέθοδο οι τιμές για τις μήτρες μάζας, απόσβεσης και δυσκαμψίας υπολογίζονται απευθείας στο FAST, στη διάρκεια εκτέλεσης της προσομοίωσης. Ο κώδικας εφαρμόζεται αρχικά για σταθερούς ανέμους (περίπτωση απουσίας στροβιλισμών). Όταν πάρουμε τη λύση μόνιμης κατάστασης (steady state), οι εξισώσεις για την κίνηση διαταράσσονται αριθμητικά για κάθε βαθμό ελευθερίας και την παράγωγο του. Λαμβάνονται μερικές παράγωγοι από τη διαφορά ανάμεσα στη δεξιά, διαταραγμένη πλευρά των εξισώσεων και στην αρχική δεξιά πλευρά των εξισώσεων και στην αρχική δεξιά πλευρά των εξισώσεων. Η διαφορά αυτή στη συνέχεια διαιρείται με την τιμή της διαταραχής στο βαθμό ελευθερίας (ή στην παράγωγο αυτού). Έτσι παίρνουμε αριθμητικές παραγώγους δίνοντας αριθμητικούς συντελεστές, οι οποίοι περιλαμβάνονται στις μήτρες απόσβεσης και δυσκαμψίας. Οι αριθμητικές τιμές για τη μήτρα μάζας είναι ήδη διαθέσιμες, καθώς έχουν υπολογιστεί από το αριστερό μέρος της εξίσωσης. Στη μελέτη μας, αρχικά αναπτύχθηκαν απλά γραμμικά μοντέλα, που περιείχαν λίγους έλευθερίας. Η πολυπλοκότητα αυξάνεται σταδιακά, μετά τον τελικό έλεγο των πιο απλών μοντέλων.

4.5.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΛΕΓΚΤΩΝ

Για να μοντελοποιηθούν οι ελεγκτές, που παρουσιάζουν ενδιαφέρον, ο έλεγχος προσομοιώνεται με τη μορφή ενός συνόλου από υπορουτίνες, στις οποίες μπορεί

να μεταφερθεί σχεδόν κάθε βαθμός ελευθερίας της Α/Γ ή η παραγόμενη ισχύς της. Στις υπορουτίνες μεταφέρονται όλες οι καταστάσεις της Α/Γ μαζί με μετρήσεις όπως η ταχύτητα, η ισχύς και η ροπή του δρομέα και της γεννήτριας.

Το αποτέλεσμα των υπορουτινών είναι <u>η γωνία κλίσης του πτερυγίου</u>, που πρέπει να εφαρμοστεί ή <u>η ροπή της γεννήτριας</u>, ανάλογα με τους ενεργοποιητές ελέγχου, που χρησιμοποιούνται.



Διάγραμμα 4.1- Μοντέλο της ανεμογεννήτριας στη Simulink

Οι συγκεκριμένες υπορουτίνες χρησιμοποιούνται ως ένα βοηθητικό σύνολο πρωτοβάθμιων γραμμικών διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες αποτελούν τις εξισώσεις χώρου κατάστασης του ελεγκτή και λύνονται μαζί με τις μη γραμμικές εξισώσεις στο FAST. Υπάρχει ένα συμπληρωματικό αρχείο δεδομένων εισόδου για τις υπορουτίνες. Οι τιμές του αποτελούνται από διάφορα στοιχεία όπως η επιθυμητή ταχύτητα του δρομέα ή της γεννήτριας, το χρονοβήμα του ολοκληρωτή (για τις υπορουτίνες των εργαλείων ελέγχου) και άλλες σταθερές. Οι συντελεστές αριθμητή και παρονομαστή της συνάρτησης μεταφοράς εισάγονται μέσω του παραπάνω συμπληρωματικού αρχείου. Έτσι μπορεί να εισαχθεί σε αυτές τις υπορουτίνες οποιοσδήποτε αριθμός συναρτήσεων μεταφοράς. Οι συντελεστές χρησιμοποιούνται από τις υπορουτίνες ελέγχου για τη μετατροπή της συνάρτησης μεταφοράς σε ένα σύνολο εξισώσεων χώρου κατάστασης σε κανονική μορφή. Οι συντελεστές εισάγονται εύκολα στις υπορουτίνες από τη στιγμή, που ο ελεγκτής μπορεί να εκφραστεί ως ιδιοσυνάρτηση .

Για την επιτυχή προσομοίωση του συστήματος, το μοντέλο μας θα πρέπει να περιέχει αρχεία με τα εξής περιεχόμενα:

- ο Ιδιότητες πύργου
- Ιδιότητες πτερυγίων
- Αρχείο εισόδου του ADAMS
- Αρχείο αεροδυναμικών ιδιοτήτων
- Αρχείο με τα δεδομένα του ανέμου
- Καθώς και διάφορα αρχεία που περιέχουν δεδομένα πτερυγίων

Ενώ για το μοντέλο γραμμικοποίησης, εκτός των παραπάνω, θα χρειαστεί και ένα αρχείο με τα δεδομένα γραμμικοποίησης.

Γραμμικό σύστημα

Για τη γραμμικοποίηση θα πρέπει να παράξουμε τα παρακάτω αρχεία:

- 1. Το **βασικό** αρχείο του fast.
- 2. Το αρχείο **γραμμικοποίησης.**
- 3. Το αρχείο **αεροδυναμικών παραμέτρων.**

<u>Βασικό αρχείο γραμμικοποίησης</u>

Οι μεταβλητές που μας ενδιαφέρουν και οι οποίες μεταβάλλονται σ' αυτό το αρχείο είναι οι εξής:

Περιγραφή

AnalMode - Analysis mode {1: Run a time-marching simulation, 2: create a periodic linearized model}

YCMode - Yaw control mode {0: none, 1: user-defined from routine UserYawCont, 2: user-defined from Simulink}

PCMode - Pitch control mode {0: none, 1: user-defined from routine PitchCntrl, 2: user-defined from Simulink}

RotSpeed – Linearization point of rotor speed (rpm)

BlPitch(1) - Blade 1 initial guess pitch for linearization (degrees)

BlPitch(2) - Blade 2 initial guess pitch for linearization (degrees)

LinFile - Name of file containing FAST linearization parameters

ADFile - Name of file containing AeroDyn input parameters

GenDOF - Generator DOFkai

CompAero - Compute aerodynamic forces

<u>Το αρχείο γραμμικοποίησης</u>

Σ' αυτό το αρχείο οι μεταβλητές που μας ενδιαφέρουν είναι οι εξής:

Περιγραφή

CalcStdy - Calculate periodic steady state condition {False: linearize about initial conditions}

TrimCase - Trim case {1: find nacelle yaw, 2: find generator torque,3: find collective blade pitch} (switch) [used only whenCalcStdy=True and GenDOF=True]

NInputs - Number of control inputs [0 (none) or 1 to 4+NumBl]

CntrlInpt - List of control inputs [1 to NInputs] {1: nacelle yaw angle, 2: nacelle yaw rate, 3: generator torque, 4: collective blade pitch, 5: individual pitch of blade 1, 6: individual pitch of blade 2}

NDisturbs - Number of wind disturbances [0 (none) or 1 to 7]

Disturbnc - List of input wind disturbances [1 to NDisturbs] {1: horizontal hub-height wind speed, 2: horizontal wind direction, 3: vertical wind speed, 4: horizontal wind shear, 5: vertical power law wind shear, 6: linear vertical wind shear, 7: horizontal hub-height wind gust}

<u>Το αρχείο αεροδυναμικών παραμέτρων</u>

Όπου σημαντικότερη μεταβλητή στο αρχείο αυτό, είναι αυτή που περιέχει τα δεδομένα του ανέμου.

<u>Για το μη γραμμικό σύστημα</u>

Τα αρχεία που θα χρειαστεί να παράξουμε είναι τα εξής:

- 1. Το **βασικό** αρχείο του FAST.
- 2. Το αρχείο των **αεροδυναμικών παραμέτρων**.

Το αρχείο του μη γραμμικού μοντέλου

Οι μεταβλητές που μας ενδιαφέρουν στο συγκεκριμένο αρχείο είναι οι εξής:

Περιγραφή

AnalMode - Analysis mode {1: Run a time-marching simulation, 2: create a periodic linearized model} YCMode - Yaw control mode {0: none, 1: user-defined from routine UserYawCont, 2: user-defined from Simulink} PCMode - Pitch control mode {0: none, 1: user-defined from routine PitchCntrl, 2: user-defined from Simulink} RotSpeed – Initial rotor speed (rpm) BIPitch(1) - Blade 1 initial pitch (degrees) BIPitch(2) - Blade 2 initial pitch (degrees) ADFile - Name of file containing AeroDyn input parameters

<u>Το αρχείο αεροδυναμικών παραμέτρων, (AeroDyn01 lin.ipt)</u>.

Όπου σημαντικότερη μεταβλητή στο αρχείο αυτό, είναι αυτή που περιέχει τα δεδομένα του ανέμου.

4.5.3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΛΙΣΗΣ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ

Μοντέλο Κατάστασης -1

Το πιο απλό γραμμικό σύστημα που εξετάστηκε περιλαμβάνει μόνο την κατάσταση της ταχύτητας του δρομέα. Για το μοντέλο αυτό κάνουμε την υπόθεση, ότι η είσοδος ελέγχου είναι η διαταραχή στη συλλογική γωνία κλίσης δβ (στη συλλογική

κλίση του δρομέα, οι γωνίες κλίσης των πτερυγίων είναι ίσες) και η είσοδος της διαταραχής είναι η διαταραχή στην ομοιόμορφη συνιστώσα της ταχύτητας του ανέμου πάνω από το δίσκο του δρομέα δw. Κάνουμε επίσης την υπόθεση, ότι ή ταχύτητα του δρομέα είναι το μετρούμενο σήμα. Το σχέδιο 4-2 απεικονίζει το μοντέλο αυτό.



Σχήμα 4.2 - Απεικόνιση του γραμμικού μοντέλου Κατάστασης -1

Όπως βλέπουμε, η εξίσωση του χώρου κατάστασης για το μοντέλο αυτό με διαταραγμένη περιστροφική ταχύτητα δρομέα x1 είναι:

$$\dot{x_1} = \frac{\gamma}{I_{rot}} x_1 + \frac{\zeta}{I_{rot}} \delta\beta + \frac{a}{I_{rot}} \delta w$$
$$y = x_1$$

Συγκρίνοντας την εξίσωση αυτή με τη γενική εξίσωση χώρου κατάστασης, <u>x</u> = x₁ – διαταραγμένη ταχύτητα δρομέα, <u>y</u> = x₁ – μετρούμενη διαταραγμένη ταχύτητα δρομέα, <u>u</u> = δβ – διαταραγμένη συλλογική κλίση δρομέα, <u>u</u> = δw – διαταραγμένη αλλαγή εντάσεως ανέμου (η ομοιόμορφη συνιστώσα πάνω στο δίσκο του δρομέα) και $A = \frac{\gamma}{I_{rot}}$ είναι η μήτρα κατάστασης. I_{rot} είναι η συνολική περιστροφική αδράνεια του δρομέα πέριξ του άξονα περιστροφής. Η παράμετρος γ είναι η μερική παράγωγος της αεροδυναμικής ροπής του δρομέα ως προς την ταχύτητά του $\frac{\partial T_{aero}}{\partial x_1}$ (ή $\frac{\partial T_{aero}}{\partial \Omega}$). Η μήτρα κέρδους εισόδου ελέγχου είναι $B = \frac{\zeta}{I_{rot}}$, στην οποία ζ είναι η μερική παράγωγος της αεροδυναμικής ροπής του δρομέα ως προς τη συλλογική γωνία κλίσης του, $\frac{\partial T_{aero}}{\partial \beta}$. Η μήτρα κέρδους εισόδου εισόδου διαταραχής είναι $\Gamma = \frac{a}{I_{rot}}$, στην οποία α παριστάνει τη μερική παράγωγο της αεροδυναμικής ροπής του δρομέα ως προς του δρομέα ως προς την οποία α παριστάνει τη μερική παράγωγο της αεροδυναμικής ροπής του δρομέα ως προς την ταχύτητα του ανέμου, $\frac{\partial T_{aero}}{\partial w}$.

Αυτό το απλό πρωτοβάθμιο μοντέλο χώρου κατάστασης αποτελεί το καλύτερο σημείο για την έναρξη της σχεδίασης του ελέγχου της ταχύτητας της ανεμογεννήτριας στην περιοχή λειτουργίας 3. Το μοντέλο αυτό δεν επαρκεί όταν υπάρχει ελαστικότητα στρέψης στο σύστημα μετάδοσης κίνησης. Για να συμπεριλάβουμε την ελαστικότητα αυτή, είναι απαραίτητο να αναπτυχθεί ένα γραμμικό μοντέλο το οποίο θα λαμβάνει υπόψη την στρέψη του συστήματος μετάδοσης κίνησης, όπως περιγράφεται παρακάτω.

4.5.4 ΠΛΗΡΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟ

Για ανάλυση σταθερότητας της συνάρτησης μεταφοράς, ένα δυναμικό μαθηματικό μοντέλο, το οποίο θα περιλαμβάνει όλα τα υποσυστήματα της ανεμογεννήτριας είναι ουσιώδες. Το επίπεδο της λεπτομέρειας αυτού του πλήρους συστήματος ποικίλλει και εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή. Τα περισσότερα από αυτά τα μοντέλα είναι γραμμικοποιημένες εκδόσεις μη γραμμικών εξισώσεων, κοντά σε κάποιο κατάλληλο σημείο λειτουργίας, όπου συνήθως πρόκειται για το ονομαστικό.

Εάν λάβουμε υπ όψιν τον άξονα μετάδοσης κίνησης, τη ροπή του δρομέα, την ώθηση και την ταχύτητα του ανέμου, εξάγεται το παρακάτω μοντέλου χώρου κατάστασης για το μηχανικό σύστημα:


Διάγραμμα 4.2 - Πλήρης διασύνδεση του συστήματος της CART. Αναδημοσιεύτηκε από τον Henriksen LC (2007)Μοντέλο πρόβλεψης ελέγχου Ανεμογεννήτριας. Μεταπτυχιακή εργασία από το πολυτεχνείο της Δανίας.



Διάγραμμα 4.3 – Συνολικό διάγραμμα ελέγχου ανεμογεννήτριας.

4.5.5 ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΛΙΣΗΣ

Ο έλεγχος κλίσης χρησιμοποιείται για μηχανές σταθερής και μεταβλητής ταχύτητας, εξυπηρετώντας παρόμοιους σκοπούς. Σε μία γεννήτρια σταθερής ταχύτητας ρυθμιζόμενης κλίσης, μία επαγωγική γεννήτρια έχει συνδεθεί απευθείας στο AC δίκτυο και περιστρέφεται με σχεδόν σταθερή ταχύτητα. Για μία γεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας, ο έλεγχος κλίσης ενεργοποιείται στην περιοχή λειτουργίας 3, όπου ξανά η ηλεκτρική ισχύς βρίσκεται στην ονομαστική της τιμή.

Καθώς η ταχύτητα του ανέμου ποικίλλει, θα ποικίλλει και η παραχθείσα ισχύς περίπου όπως ο κύβος της ταχύτητας ανέμου. Σε ονομαστική ταχύτητα ανέμου, η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται εξισώνεται με την εκτίμηση της τουρμπίνας. Καθώς η ταχύτητα του ανέμου αυξάνει πάνω από την ονομαστική της τιμή, οι λεπίδες κλίνουν ώστε να μειώσουν την αεροδυναμική αποδοτικότητα του δρομέα και να περιορίσουν την ισχύ στην ονομαστική της τιμή. Η πιο συνήθης πρακτική είναι να κλίνουν οι λεπίδες ως απάντηση σε ένα σφάλμα σταθερού σημείου, όπως το σφάλμα ισχύος ή το σφάλμα στρεπτικής ταχύτητας, το οποίο ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της ονομαστικής και της πραγματικής τιμής που επιτυγχάνεται, όπως αυτή μετράται από έναν αισθητήρα.

Οι περισσότεροι ελεγκτές κλίσης, χρησιμοποιούν το απλό γραμμικοποιημένο μοντέλο της εξίσωσης που παρουσιάζεται παρακάτω:

$$\tilde{\omega}(s) = \frac{\eta}{(sI_{\rm T} - \gamma)}\tilde{\beta}(s) + \frac{a}{(sI_{\rm T} - \gamma)}\tilde{w}(s)$$

Το διάγραμμα ελέγχου για το συγκεκριμένο πρόβλημα παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.

Ένα τέτοιο παράδειγμα σύνθεσης αναλογικού- ολοκληρωτικού ελεγκτή (PI) κλίσης περιγράφεται στο διάγραμμα 4.4 . Ο στόχος αυτού του ελεγκτή είναι να ρυθμίσει την ταχύτητα περιστροφής σε 41.7 στροφές το λεπτό (ονομαστική ταχύτητα του CART). Εφ' όσον πρόκειται για ένα τυπικό πρόβλημα εξασθένησης διαταραχής, η διαταραχή στην έξοδο της συνάρτησης μεταφοράς του σχήματος 10 φαίνεται εάν εισάγουμε τη συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή στην παραπάνω εξίσωση.



Διάγραμμα 4.4 -Σχηματική αναπαράσταση του ελέγχου της ανεμογεννήτριας. Αναδημοσίευση από το Χάνσεν Α, Γ Jauch, Sørensen P, et al. (2003) Δυναμικά μοντέλα ανεμογεννητριών με τη χρήση του DIgSILENT ως δυναμικό σύστημα προσομοίωσης. Έκθεση Riso-R-1400 (EN). Roskilde, Δανία: Εθνικό Εργαστήριο του Risø [12]



Διάγραμμα 4.5 - Έλεγχος κλίσης

Συνήθως το ποσοστό απόσβεσης κυμαίνεται από 0,6 -0,8 για υποαποσβεσμένη απόσβεση και σε $ω_n = 0.6 \text{ rads}^{-1}$ για αποδεκτό χρόνο απόσβεσης. Στο σχήμα 23 φαίνονται οι αποκρίσεις για $ω_n = 0.6 \text{ rads}^{-1}$ και ζ=0,3 (κόκκινο), 1(μπλε) και 2(πράσινο) για μία μοναδιαία βηματική διατάραξη ανέμου (από 17 σε 18 ms⁻¹). Τα υπολογισμένα κέρδη των ελεγκτών είναι Ki=0.136 και Kp=0.38.

Αν και απλός, ο συγκεκριμένος ελεγκτής υποφέρει από κακή απόδοση σε διάφορα σημεία λειτουργίας, τα οποία είναι διαφορετικά από εκείνα για τα οποία έχει σχεδιαστεί.



Γράφημα 4.1- Έλεγχος κλίσης σε διαφορετικά σημεία λειτουργίας. Αναδημοσίευση από το Wright AD και Fingersh LJ (2008) Προηγμένο σχέδιο ελέγχου ανεμογεννητριών Μέρος Ι: Σχέδιο ελέγχου, υλοποίηση, και πρώτες δοκιμές. Τεχνική Έκθεση NREL/TP-500-42437. Το Golden, Κολοράντο: Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας [14].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5- ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΛΙΣΗΣ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ



5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ CART

Εικόνα 5.1 - Η Ανεμογεννήτρια CART

Η ανεμογεννήτρια CART, που παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.1, είναι ουσιαστικά μία Westinhouse WTG-600,είναι ενεργούς εκτροπής ανεμογεννήτρια, δίπτερη, ταλαντωμένη, στραμμένη προς τον άνεμο (ανάντι) και χρησιμοποιείται ως ερευνητική ανεμογεννήτρια για τη μελέτη διαφόρων θεμάτων που έχουν να κάνουν με την τεχνολογία ελέγχου ανεμογεννητριών μεσαίας ή μεγάλης κλίμακας (Εικόνα 5.1 και Πίνακας5,1).

Πίνακας 5.1: Γενικά χαρακτηρι	στικά της Ανεμογα	εννήτριας CART
-------------------------------	-------------------	----------------

Τύπος ανεμογεννήτριας	Οριζοντίου άξονα, δρομέας στραμμένος προς τον άνεμο, ταλαντευόμενης πτερωτής
Αριθμός πτερυγίων	2
Ταχύτητα δρομέα (περιοχή λειτουργίας 3)	42 rpm
Ρύθμιση ισχύος	Έλεγχος της κλίσης των πτερυγίων
Διαμόρφωση συστήματος παροιακίσματος	Ενεργός οδηγός παροιακίσματος

(εκτροπής)	
Διάμετρος δρομέα	43,3 m
Ύψος	36,6 m (στο ύψος της πτερωτής)
Κώνωση	0° προ-κώνος
Κάμψη	4 [°] κάμψη άξονα

Πίνακας 4.2 - Γενικά χαρακτηριστικά της Ανεμογεννήτριας CART

Η δίπτερη, ταλαντούμενη, ανάντι ανεμογεννήτρια, λειτουργεί σε διάφορες ταχύτητες. Το κάθε πτερύγιο μπορεί να ρυθμιστεί ξεχωριστά ως προς την κλίση του μέσω ανεξάρτητου ηλεκτρομηχανικού μηχανισμού και μπορεί να κλίνει με ταχύτητες μέχρι και 18 s⁻¹ και επιτάχυνση έως και 150° s⁻². Η βαθμονομημένη ηλεκτρική ισχύς (600 KW στις 42 rpm) διατηρείται στην περιοχή λειτουργίας 3, κατά τη διάρκεια μιας συμβατικής προσέγγισης με μεταβαλλόμενη ταχύτητα. Τα ηλεκτρονικά ισχύος χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή σταθερής ροπής από τη γεννήτρια σε οποιαδήποτε ταχύτητα και η κλίση των πτερυγίων ελέγχει την ταχύτητα του δρομέα. Ο βρόγχος ελέγχου ροπής έχει εύρος ζώνης της τάξης των 500 rad s⁻¹. Στην περιοχή λειτουργίας 2, η ροπή της ανεμογεννήτριας μπορεί να μεταβάλλεται με διαφορετικές ταχύτητες δρομέα, προκειμένου να διατηρείται η βέλτιστη C_p. Η μηχανή είναι εξοπλισμένη με ένα πλήρες συμπλήρωμα από όργανα τα οποία συγκεντρώνουν μετεωρολογικά δεδομένα από 4 διαφορετικά ύψη. Μετρητές τάσης στη βάση και στην άκρη της λεπίδας του πτερυγίου, μετρητές κάμψης στον πύργο καθώς και μετρητές ροπής στις θέσεις χαμηλής (LSS) και υψηλής (HSS) ταχύτητας συγκεντρώνουν δεδομένα σχετικά με τα φορτία .Επιταχυνσιόμετρα στη νασέλλα μετρούν την επιμήκη και οριζόντια κίνηση. Κωδικοποιητές απόλυτης θέσης συγκεντρώνουν δεδομένα σχετικά με την κλίση, την εκτροπή, την ταλάντωση καθώς και για τις θέσης χαμηλής και υψηλής ταχύτητας άξονα (LSS και HSS). Τα δεδομένα αυτά έχουν συγκεντρωθεί στα 100 Hz.





Διάγραμμα 5.1- Γενική διάρθρωση ανεμογεννητριών για εποπτικό έλεγχο

Γράφημα 5.1: Περιοχές λειτουργίας της ανεμογεννήτριας

Η συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια λειτουργεί σε 4 φάσεις. Η φάση 1 περιγράφει την εκκίνηση της ανεμογεννήτριας, όταν δηλαδή οι ταχύτητες του ανέμου είναι χαμηλότερης της ταχύτητας εκκίνησης. Στη 2^η φάση λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, η ταχύτητα του βρίσκεται μεταξύ ταχύτητας εκκίνησης και ονομαστικής ταχύτητας. Έτσι για να επιτευχθεί βέλτιστη λειτουργία μεταβάλλουμε τη ροπή της γεννήτριας.

Στην 3ⁿ φάση αντίθετα, που είναι και η φάση που θα μελετήσουμε σ' αυτήν την εργασία, η ταχύτητες του ανέμου είναι μεγαλύτερες ή ίσες με τις προδιαγραφές της κατασκευής. Σε αυτή την περίπτωση για να διατηρήσουμε βέλτιστη λειτουργία δε μεταβάλλουμε πλέον τη ροπή της γεννήτριας (η οποία διατηρείται σταθερή στην ονομαστική της τιμή), αλλά τις γωνίες κλίσης των πτερυγίων. Τέλος στη φάση 4 η ταχύτητα του ανέμου είναι πολύ υψηλή και ο ελεγκτής θα πρέπει να σταματάει τη μηχανή.

Για τη μετάβαση τώρα της ανεμογεννήτριας από τη φάση 2 στη φάση 3 υπάρχει μία ενδιάμεση φάση, η επονομαζόμενη 2¹². Η προσθήκη αυτής της φάσης έγινε για να επιτρέψει στην ανεμογεννήτρια να φτάσει την ονομαστική ροπή σε ονομαστική ταχύτητα. Εάν αυτή η φάση δεν υπήρχε, και η μηχανή δεν επιτρεπόταν να υπερβεί

την ονομαστική ταχύτητα, τότε η γεννήτρια δεν θα μπορούσε να φτάσει την ονομαστική ροπή και η ισχύς της γεννήτριας θα ήταν πολύ χαμηλή.



Γράφημα 5.2: Περιοχές λειτουργίας της CART

Περιοχές λειτουργίας της γεννήτριας

Όπως αναφέραμε και παραπάνω στην περιοχή 3 του ελεγκτή διατηρείται σταθερή τη ροπή της γεννήτριας και μεταβάλλεται η κλίση του πτερυγίου ώστε να ελέγχθεί η ταχύτητα του δρομέα. Σκοπός αυτού του ελέγχου κλίσης, είναι να παραμείνει η ταχύτητα του δρομέα σε μία καθορισμένη τιμή. Όπου για το CART, η τιμή αυτή βρίσκεται στις 41,7 rpm.

Το γραμμικό πρότυπο που θα ακολουθήσουμε είναι το εξής:

$$\Delta \dot{\Omega} = A \Delta \Omega + B \Delta \theta + B_d \Delta w$$

Όπου $A = rac{\gamma}{I_{rot}}$, $B = rac{\delta}{I_{rot}}$, $B_d = rac{\alpha}{I_{rot}}$.

I_{rot} =είναι η συνολική περιστροφική αδράνεια (λόγω του δρομέα, του κιβωτίου ταχυτήτων, των αξόνων, της γεννήτριας, κλπ.)

και

 $\gamma = rac{\partial Q_{aero}}{\partial arOmega}$, $\delta = rac{\partial Q_{aero}}{\partial heta}$, кац $lpha = rac{\partial Q_{aero}}{\partial w}$

Όπου,

Q_{aero} =είναι η αεροδυναμική ροπή του δρομέα Ω =είναι η ταχύτητα του δρομέα, θ= είναι η γωνία του βήματος της έλικας, και

W= είναι το ύψος πλήμνης ομοιόμορφης διαταραχής ταχύτητας ανέμου δια μέσου του δίσκου στροφέων.

Η εξίσωση (3.5) βασίζεται σε διαταραγμένες τιμές αυτών των μεταβλητών. Αυτές οι διαταραχές υποτίθεται ότι αντιπροσωπεύουν μικρές αποκλίσεις αυτών των μεταβλητών μακριά από τις τιμές ισορροπίας σε μόνιμη κατάσταση.

Ο σκοπός μας είναι να χρησιμοποιήσουμε τον PID ελεγκτή κλίσης για να ρυθμίσουμε την ταχύτητα της τουρμπίνας. Χρησιμοποιώντας λοιπόν την τυποποιημένη έκφραση του PID ελεγκτή, εκφράζουμε τη μεταβολή της κλίσης Δθως εξής:

$$\Delta \theta(t) = K_{p} \Delta \Omega(t) + K_{I} \int \Delta \Omega(t) dt + K_{D} \Delta \dot{\Omega}(t) .$$

Ως άθροισμα δηλαδή ενός όρου ανάλογου της μεταβαλλόμενης ταχύτητας (K_P), ενός όρου ανάλογου του ολοκληρώματος της μεταβαλλόμενης ταχύτητας στροφών (K_I) και ενός όρου αναλόγου της παραγώγου της μεταβαλλόμενης ταχύτητας των στροφών (K_D).

Για να επιτύχουμε βέλτιστη απόκριση στο σύστημά(σταθερό σύστημα κλειστών βρόγχων) μας θα πρέπει να καθορίσουμε τις τιμές των K_p, K_I, και K_D. Έτσι λοιπόν εργαζόμαστε ως εξής:

Αρχικά εφαρμόζουμε μετασχηματισμό Laplace και η εξίσωση που προκύπτει είναι η παρακάτω:

$$\Delta\theta(s) = K_p \Delta\Omega(s) + K_I \frac{1}{s} \Delta\Omega(s) + K_D s \Delta\Omega(s),$$

Όπου ΔΩ(s) και Δθ(s) είναι οι μετασχηματισμοί Laplace για το ΔΩ(t) και το Δθ(t) αντίστοιχα.

Χρησιμοποιώντας μετασχηματισμό Laplace και στις δύο πλευρές της εξίσωσης και μεταφέροντας τον όρο που έχει σχέση με την ΑΔΩ στην αριστερή πλευρά, παίρνουμε:

$$\Delta\Omega(s)[s-a] = B\Delta\theta(s) + B_D\Delta w(s)$$

= $B(K_p\Delta\Omega(s) + K_I \frac{1}{s}\Delta\Omega(s) + K_D s\Delta\Omega(s) + B_d\Delta w(s)$

Όπου Δw(s) αποτελεί το μετασχηματισμό Laplace του Δw(t).

Έτσι κατασκευάζουμε τη συνάρτηση μεταφοράς

$$T_c(s) = \frac{\Delta\Omega(s)}{\Delta w(s)} = \frac{B_d s}{(1 - BK_D)s^2 + (-A - BK_p)s + (-BK_i)}$$

Για να είναι αυτό το σύστημα κλειστού βρόγχου σταθερό θα πρέπει οι ρίζες στον παρονομαστή της εξίσωσης να είναι ίσες με το μηδέν. Συγκεκριμένα:

$$(1 - BK_D)s^2 + (-A - BK_p)s + (-BK_i) = 0$$

Δηλαδή, να βρίσκονται στο αριστερό μισό του μιγαδικού ημιεπιπέδου. Για να έχουμε ρίζα στο μιγαδικό ημιεπίπεδο, θα πρέπει οι συντελεστές του τριωνύμου να είναι θετικοί αριθμοί και επομένως θα πρέπει να ισχύει:

$$1 - BK_D > 0$$
, $-A - BK_p > 0$, кал $-BK_i > 0$.

Για να μπορέσουμε να προσδιορίσουμε κατάλληλο σημείο λειτουργίας ώστε να αξιολογήσουμε τις παραμέτρους Α και Β, θα πρέπει για την πρώτη περίπτωση να δώσουμε κάποιες αρχικές συνθήκες, οι οποίες έχουν να κάνουν με την ταχύτητα του ανέμου, την ταχύτητα του δρομέα καθώς και με τη γωνία του βήματος της έλικας. Οι αρχικές αυτές συνθήκες θα είναι: w₀ = 18m/s, Ω₀=41.7 rpm και θ₀= 11 μοίρες.

Λύνοντας τώρα το γραμμικοποιημένο σύστημα, χρησιμοποιώντας αυτές τις αρχικές συνθήκες, παίρνουμε τα εξής αποτελέσματα: A= -0.194, B=-2.650 και B_d=0.069 και άρα η χαρακτηριστική μας εξίσωση θα είναι η $(1 + 2.650K_D)s^2 + (0.194 + 2.650K_D)s + (2.650K_i) = 0$.

Λύνοντας τώρα ως προς τις παραμέτρους K_D, K_P και K_I βρίσκουμε το εύρος ζώνης στο οποίο θα κινηθούμε. Συγκεκριμένα $K_D > -0.3774$, $K_p > -0.0732$, και $K_L > 0$.

Βάσει των αποτελεσμάτων παρατηρούμε ότι για θετικές τιμές των τιμών K_D,K_P και K_I αυξάνεται η αποτελεσματική αδράνεια, η απόσβεση και η ακαμψία του συστήματος (στο συγκεκριμένο σύστημα πάντα). Έτσι αποκτούμε μία πρώτη εκτίμηση όσον αφορά τις τιμές των κερδών, που θα εξασφαλίσουν τη σταθερότητα του συστήματος. Αλλά δεν μπορούμε να δούμε ποια ακριβώς είναι τα κέρδη που θα μας δώσουν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Έτσι προχωρούμε στην παρακάτω διαδικασία.

Παίρνουμε ξανά την χαρακτηριστική εξίσωση:

$$(1 - BK_D)s^2 + (-A - BK_p)s + (-BK_i) = 0$$

και τη μετατρέπουμε στη μορφή:

$$s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2 = 0 \tag{6}$$

Όπου $2\zeta \omega = \frac{-A - BK_p}{1 - BK_p}$, $\omega^2 = \frac{-BK_i}{1 - BK_p}$.

Στη συνέχεια λύνουμε ως προς Κ i και Κ P:

$$K_i = \frac{-\omega^2(1-BK_D)}{B}$$
, ка
ц $K_p = -\frac{A}{B} - \frac{2\zeta\omega(1-K_D)}{B}$

Οι ρίζες της εξίσωσης (6) είναι $s=-\zeta\omega\pm\omega\sqrt{\zeta^2-1}$.

Στην περίπτωση υποαπόσβεσης, όταν το ζ< 1, θα έχουμε δύο μιγαδικές συζυγείς ρίζες $s = -\zeta \omega \pm j \omega_d$, όπου $\omega_D = \omega \sqrt{1 - \zeta^2}$.

Στην περίπτωση κρίσιμης απόσβεσης , ζ=1, έχουμε μία διπλή ρίζα s=- $\omega\pm j0$.

Στην περίπτωση υπεραπόσβεσης, όταν το ζ >1, έχουμε δύο πραγματικές ρίζες : $s = -\zeta \omega \pm \omega \sqrt{\zeta^2 - 1}$. Διαφορετική απόδοση ελέγχου μπορεί να επιτευχθεί πειραματικά αν επιλέξουμε διαφορετικές τιμές για τις παραμέτρους ζ και ω.

Όπου,

ω= καλείται η υποαποσβεσμένη φυσική συχνότητα,
 ω_D = η αποσβεσμένη φυσική συχνότητα και
 ζ= ο λόγος απόσβεσης.

Οι τιμές για τις οποίες παίρνουμε τις βέλτιστες αποκρίσεις (ως αναφορά τον χρόνο αποκατάστασης και τη μέγιστη υπερύψωση) εξαρτώνται από το είδος της τουρμπίνας, ωστόσο τιμές του ζ μεταξύ 0,5 και 0,8 δίνουν συνήθως καλή συμπεριφορά.

Τιμές οι οποίες βοηθούν επίσης στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι οι παρακάτω:

t_r: Είναι ο χρόνος ανύψωσης. Δηλαδή ο χρόνος που χρειάζεται για να φτάσει από το 10% στο 90% η απόκριση του συστήματος. Ο χρόνος ανύψωσης προσεγγίζεται γραμμικά από τη σχέση: $t_r \cong \frac{0.8+2.5\zeta}{\omega_n}$ Ts: κάποιος χρόνος είναι πάλι αλλά δεν το βρίσκω

M_p: Μέγιστη υπερύψωση. Πρόκειται για τη τιμή της μέγιστης κορυφής της καμπύλης απόκρισης μετρούμενη από τη μονάδα. Όταν η τελική τιμή της μόνιμης κατάστασης της απόκρισης διαφέρει από την μονάδα, ο συνήθης ορισμός είναι:

$$M_P = \frac{y(t_P) - y(\infty)}{y(\infty)}$$

5.2- PID ΕΛΕΓΚΤΗΣ

5.2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Τα αρχικά PID προέρχονται από τις λέξεις proportional–integral–derivative που στα ελληνικά σημαίνουν αναλογικό-ολοκληρωτικό-διαφορικός ελεγκτής.

Η γενική μορφή της συνάρτησης μεταφοράς του ελεγκτή είναι η εξής:

$$G_c(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s = \frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{s}$$

Παρατηρούμε ότι ο ελεγκτής αυτός έχει τρεις παραμέτρους (K_D, K_P και K_I), τα επονομαζόμενα κέρδη. Πολλές παράμετροι ισοδυναμούν με αυξημένη πολυπλοκότητα,η οποία ισοδυναμεί με αυξημένη ευαισθησία στο σύστημα και κατ' επέκταση σε πολύ καλές αποκρίσεις. Ωστόσο το ίδιο αυτό πλεονέκτημα καθιστά δύσκολη την εύρεση των ριζών του συστήματος.

Παρακάτω βλέπουμε τη γενική μορφή ενός PID ελεγκτή:



Διάγραμμα 5.1 – Μπλοκ διάγραμμα PID ελεγκτή

Η αλλαγή στην τιμή του εκάστοτε κέρδους (K_D,K_P και K_I) αλλάζει και τη συμπεριφορά του ελεγκτή. Οι βέλτιστες τιμές θα αποκτηθούν μετά από πολλές δοκιμές και θα είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με το σύστημα ,που ελέγχουμε.

5.2.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΕΛΕΓΚΤΩΝ Ρ, Ι, Ο ΣΤΗΝ ΤΕΛΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Ο **αναλογικός ελεγκτής (P)** μειώνει τον χρόνο ανύψωσης του συστήματος (ταχύτερο σύστημα), αλλά δεν εξαλείφει το μόνιμο σφάλμα.

Ο ολοκληρωτικός ελεγκτής (Ι) εξαλείφει το μόνιμο σφάλμα, αλλά αυξάνει τη μεταβατική απόκριση (ταλαντώσεις μέχρι την τελική ισορροπία).

Ο διαφορικός ελεγκτής (D) αυξάνει τη σταθερότητα του συστήματος, μειώνει την υπερύψωση και βελτιώνει τη μεταβατική απόκριση.

Αντίδραση	πίδραση Χρόνος		Χρόνος	Μόνιμο Σφάλμα
Ελεγκτή	Ανύψωσης		Αποκατάστασης	
K _P	Μείωση	Αύξηση	Μικρή Αλλαγή	Μείωση
Kı	Μείωση	Αύξηση	Αύξηση	Εξάλειψη
K _D	Μικρή Αλλαγή	Μείωση	Μείωση	Μικρή Αλλαγή

Πίνακας 5.1- Αποτελέσματα της επίδρασης καθενός από τους όρους (P,I,D) σ' ένα σύστημα κλειστών βρόγχων.

Η αλλαγή στην τιμή του εκάστοτε κέρδους (K_D,K_P και K_I), αλλάζει και την συμπεριφορά του συστήματος καθώς τα K_D,K_P και K_I αλληλοεξαρτώνται. Έτσι η μεταβολή κάποιου κέρδους, διαφοροποιεί και την επίδραση που έχουν τα άλλα δύο στο εκάστοτε σύστημα. Οι βέλτιστες τιμές θα αποκτηθούν πειραματικά, μετά από πολλές δοκιμές και θα είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με το σύστημα που ελέγχουμε.

Ανάλογα με το σύστημα που έχουμε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και απλοποιημένες μορφές του συστήματος PID, όπως PI, PD,P ή Ι ελεγκτή, μηδενίζοντας την εκάστοτε παράμετρο. Σκοπός είναι να αποκτήσουμε βέλτιστη απόκριση, χρησιμοποιώντας όσο το δυνατόν πιο απλοποιημένο σύστημα γίνεται.

Στο σύστημά μας χρησιμοποιούμε PI και PID ελεγκτές.

5.2.3 ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ PID ΕΛΕΓΚΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΑΓΟΡΑ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Αν και υπάρχει πληθώρα ερευνητικών εργασιών πάνω στους ελεγκτές ανεμογεννητριών, που κυμαίνονται από τον πιο απλό PID ελεγκτή μέχρι και σε πιο εξωτικές ασαφείς ή και νευρωνικές εκδόσεις, η απόδοση των περισσότερων έχει κριθεί από προσομοιώσεις με υπολογιστή, των μαθηματικών μοντέλων του συστήματος της ανεμογεννήτριας.

Ανεξαρτήτως της πληθώρας σε θεωρητικές εργασίες πάνω σχεδόν σε όλους τους διαθέσιμους τύπους ελεγκτών, η βιομηχανία εξακολουθεί και χρησιμοποιεί τον απλό PID ελεγκτή, με διάφορες τροποποιήσεις σε όλους τους τύπους μηχανών.

5.3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΚΤΡΟΠΗΣ (YAW)

Ο έλεγχος εκτροπής είναι απαραίτητος για γεννήτριες στραμμένες στον άνεμο (ανάντη) ώστε να αιχμαλωτίσουν πλήρως την εισερχόμενη ισχύ του ανέμου. Όπως φαίνεται στο σχήμα 41, μεταβολή ισχύος είναι ανάλογη του τετραγώνου του συνημίτονου γ (cosγ), έτσι μία λάθος ευθυγράμμιση έχει ως αποτέλεσμα σημαντική απώλεια σε ηλεκτροπαραγωγή.



Διάγραμμα 5.3 - Έλεγχος μετασχηματιστή ρεύματος DC/AC . Αναδημοσιεύτηκε από τους Sikorski A και Kuzma A (2009). Συνεργασία ολοκληρωτικής γεννήτριας κλωβού με συνδεδεμένης με μετασχηματιστή AC/DC/AC πλέγματος. – Πολωνική Ακαδημία Τεχνικών Επιστημών 57: 317–322 -



Γράφημα 5.3: Γωνία εκτροπής συναρτήσει μέγιστου δείκτη ταχύτητας. Αναδημοσιεύτηκε από τον Medici D (2004) -Wind turbine wakes – έλεγχος και αποβολή δίνης. KTH. Μηχανική Τεχνική Έκθεση. Στοκχόλμη, Σουηδία: Βασιλικό Ινστιτούτο Τεχνολογίας

Αν και ο έλεγχος εκτροπής μπορεί να επιτευχθεί μηχανικά, είτε με τη χρήση ανεμοδείκτη τοποθετημένου στη νασέλλα ή με ελεύθερη εκτροπή της κατάντης, σχεδόν όλες οι μοντέρνες ανεμογεννήτριες μεγαβατώρων χρησιμοποιούν μηχανοκίνητη εκτροπή.

Το υποσύστημα εκτροπής αποτελείται από τα παραπάνω τμήματα:

<u>Ρουλεμάν Αζιμουθίου.</u> Αυτό εξασφαλίζει ομαλή λειτουργία, μακρόχρονη υπηρεσία ζωής, και επαρκή απόσβεση. Χρησιμοποιείται είτε ένα ρουλεμάν 4 σημείων ή ρουλεμάν τριβής . Όσον αφορά τα τελευταία, υπάρχει το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτούνται περίπλοκα φρένα ή δαχτυλίδια.

<u>Κινητήρα εκτροπής</u>. Αν και ο κινητήρας εκτροπής μπορεί είτε να είναι είτε υδραυλικός είτε ηλεκτρικός, τρέχουσες τάσεις τείνουν προς το δεύτερο. Ακόμα κινητήρες ηλεκτρικής εκτροπής με ενσωματωμένα φρένα βρίσκονται υπό κατασκευή.

<u>Φρένα εκτροπής</u>. Αυτά είναι απαραίτητα για την απορρόφηση αδράνειας εκτροπής. Συνήθως είναι ενσωματωμένα στο σύστημα κίνησης. Δύο ή περισσότερα φρένα εκτροπής είναι συνήθη για μεγάλες γεννήτριες. Αυτά ενεργούν σε ένα δαχτυλίδι φρένου στο εσωτερικό του πύργου ή με ένα δαχτυλίδι στη νασέλλα.



Διάγραμμα 5.4 - Έλεγχος εκτροπής

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6-ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

6.1 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Αποσυμπιέζουμε όλα τ' αρχεία που μας δίνονται στο ίδιο directory και στη συνέχεια προσθέτουμε το συγκεκριμένο directory στο path του MATLAB.

<u>Εγκατάσταση</u>

- 1. Αποσυμπιέζουμε το αρχείο FAST_v70000a-bjj.exe σε κάποιο directory.
- 2. Αποσυμπιέζουμε το αρχείο MBC_v1.00.00a-gsb.exe στο ίδιο directory.
- 3. Αποσυμπιέζουμε το αρχείο cart2.zip στο ίδιο directory.
- 4. Προσθέτουμε στο path του MATLAB το directory + subdirectories.

Τα αρχεία που θα χρησιμοποιήσουμε για την προσομοίωση είναι τα εξής:

Όνομα αρχείου	Περιεχόμενο	Μεταβλητή	Τύπος
cart_Towersoft.dat	ιδιότητες πύργου	TwrFile	Σταθερό
cart_Blades.dat	ιδιότητες πτερυγίων	BldFile	Σταθερό
AWT_ADAMS.dat	Αρχείο εισόδου Adams	ADAMSFile	Σταθερό
AeroDyn01sim.ipt	Αεροδυναμικές ιδιότητες	ADFile	μεταβλητό
STEP9MPS-18.wnd	Δεδομένα αέρα		μεταβλητό
art15.air	Δεδομένα πτερυγίων	FoilNm	Σταθερό
art25.air	Δεδομένα πτερυγίων	FoilNm	Σταθερό
art35.air	Δεδομένα πτερυγίων	FoilNm	Σταθερό
art45.air	Δεδομένα πτερυγίων	FoilNm	Σταθερό
art55.air	Δεδομένα πτερυγίων	FoilNm	Σταθερό
art65.air	Δεδομένα πτερυγίων	FoilNm	Σταθερό
art75.air	Δεδομένα πτερυγίων	FoilNm	Σταθερό
art75-5.air	Δεδομένα πτερυγίων	FoilNm	Σταθερό
art85.air	Δεδομένα πτερυγίων	FoilNm	Σταθερό
art85-5.air	Δεδομένα πτερυγίων	FoilNm	Σταθερό

art95.air Δεδομένα πτερυγίων Fo	FoilNm	Σταθερό
---------------------------------	--------	---------

Πίνακας 6.1 – Πίνακας Περιεχομένων

Για τη γραμμικοποίηση τώρα, χρησιμοποιούμε όλα τα παραπάνω συν το :

yaw_cp_Linear.dat	Δεδομένα γραμμικοποίησης	LinFile	Μεταβλητό
-------------------	--------------------------	---------	-----------

Γραμμικό σύστημα:

Για τη γραμμικοποίηση θα πρέπει να παράξουμε τα παρακάτω αρχεία:

- 4. Το **βασικό** αρχείο του fast, cp_lin.fst.
- 5. Το αρχείο γραμμικοποίησης, cp_lin.dat
- 6. Το αρχείο αεροδυναμικών παραμέτρων, AeroDyn01_lin.ipt

<u>Βασικό αρχείο γραμμικοποίησης (cp lin.fst)</u>

Οι μεταβλητές που μας ενδιαφέρουν και οι οποίες μεταβάλλονται σ' αυτό το αρχείο είναι οι εξής:

Τιμή Περιγραφή

- 2 AnalMode Analysis mode {1: Run a time-marching simulation, 2: create a periodic linearized model}
- YCMode Yaw control mode {0: none, 1: user-defined from routine UserYawCont, 2: user-defined from Simulink}
- **0** PCMode Pitch control mode {0: none, 1: user-defined from routine PitchCntrl, 2: user-defined from Simulink}
- **41.7** RotSpeed Linearization point of rotor speed (rpm)
- **11.0** BlPitch(1) Blade 1 initial guess pitch for linearization (degrees)
- **11.0** BlPitch(2) Blade 2 initial guess pitch for linearization (degrees)

"cp_lin.dat LinFile - Name of file containing FAST linearization parameters

"AeroDyn0 ADFile - Name of file containing AeroDyn input parameters 1_lin.ipt"

True GenDOF - Generator DOFkai

True CompAero - Compute aerodynamic forces

<u>Το αρχείο γραμμικοποίησης (cp lin.dat)</u>

Σ' αυτό το αρχείο οι μεταβλητές που μας ενδιαφέρουν είναι οι εξής:

Τιμή Περιγραφή

п

- **True** CalcStdy Calculate periodic steady state condition {False: linearize about initial conditions}
 - 3 TrimCase Trim case {1: find nacelle yaw, 2: find generator torque,
 3: find collective blade pitch} (switch) [used only when CalcStdy=True and GenDOF=True]
 - **1** NInputs Number of control inputs [0 (none) or 1 to 4+NumBl]
 - 4 CntrlInpt List of control inputs [1 to NInputs] {1: nacelle yaw angle, 2: nacelle yaw rate, 3: generator torque, 4: collective blade pitch, 5: individual pitch of blade 1, 6: individual pitch of blade 2}
 - 1 NDisturbs Number of wind disturbances [0 (none) or 1 to 7]
 - 1 Disturbnc List of input wind disturbances [1 to NDisturbs] {1: horizontal hub-height wind speed, 2: horizontal wind direction, 3: vertical wind speed, 4: horizontal wind shear, 5: vertical power law wind shear, 6: linear vertical wind shear, 7: horizontal hub-height wind gust}

<u>Το αρχείο αεροδυναμικών παραμέτρων, (AeroDyn01_lin.ipt)</u>.

Οι σημαντικότερες μεταβλητές του αρχείου αυτού είναι οι εξής:

STEP_18_20_18_16.WND - Name of file containing wind data

Παραγωγή γραμμικοποιημένου συστήματος

Για να δημιουργήσουμε το γραμμικοποιημένο σύστημα, ανοίγουμε το παράθυρο του MS-DOS και χρησιμοποιώντας την εντολή "cd.." πηγαίνουμε στο directory που έχουμε βάλει τα αρχεία μας. Εκεί, θα εκτελέσουμε το εκτελέσιμο αρχείο του FAST (fast.exe), δίνοντας το αρχείο με την κατάληξη *.fst που έχουμε δημιουργήσει.

Στη δική μας περίπτωση γράφουμε fast cp_lin.fst.

<u>Για το μη γραμμικό σύστημα</u>

Τα αρχεία που θα χρειαστεί να παράξουμε είναι τα εξής:

- 3. Το αρχείο του FAST "cp_sim.fst"
- 4. Το αρχείο των αεροδυναμικών παραμέτρων "AeroDyn01_sim.ipt".

Το αρχείο του μη γραμμικού μοντέλου "cp sim.fst"

Οι μεταβλητές που μας ενδιαφέρουν στο συγκεκριμένο αρχείο είναι οι εξής:

Τιμή

Περιγραφή

- AnalMode Analysis mode {1: Run a time-marching simulation, 2: create a periodic linearized model}
- O YCMode Yaw control mode {0: none, 1: user-defined from routine UserYawCont, 2: user-defined from Simulink}
- 2 PCMode Pitch control mode {0: none, 1: user-defined from routine PitchCntrl, 2: user-defined from Simulink}
- 41.7 RotSpeed Initial rotor speed (rpm)
- **11.0** BIPitch(1) Blade 1 initial pitch (degrees)
- **11.0** BIPitch(2) Blade 2 initial pitch (degrees)
- "AeroDyn01_sim.ipt" ADFile Name of file containing AeroDyn input parameters

<u>Το αρχείο αεροδυναμικών παραμέτρων, (AeroDyn01 lin.ipt)</u>.

Οι σημαντικότερες μεταβλητές του αρχείου αυτού είναι οι εξής:

STEP 18 20 18 16.WND - Name of file containing wind data

Προσομοίωση συστήματος

Για να προσομοιώσουμε το σύστημά μας στη MATLAB, βρίσκουμε το path που έχουμε αποθηκεύσει το directory μας και εκτελούμε τις παρακάτω εντολές:

>>GetMats

(Με την εντολή αυτή παράγουμε το «μέσο γραμμικοποιημένο σύστημα»)

>>cp

(ανακαλούμε το μοντέλο)

>>cp

(δίνοντας αυτή την εντολή, γίνεται η αρχικοποίηση παραμέτρων ελεγκτή και γραμμικοποιημένου συστήματος, καθώς και η αρχικοποίηση παραμέτρων του μη γραμμικού υποδείγματος της Simulink.)

Αναλόγως τώρα με το πιο μοντέλο θέλουμε να προσομοιώσουμε (γραμμικοποιημένο ή μη γραμμικοποιημένο), ανοίγουμε τη Simulink και ανοίγουμετρέχουμε το **cp_lin.mdl** ή το **cp_sim.mdl** αντίστοιχα.

Στην περίπτωση τώρα που η απόκριση δεν είναι η επιθυμητή, επιστρέφουμε στο περιβάλλον της κεντρικής σελίδας της MATLAB και αφού αλλάξουμε τις τιμές των μεταβλητών ω και ζ, επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία.

<u>Σημείωση:</u>

Οι μονάδες του γραμμικοποιημένου υποδείγματος είναι **rps** και **rad**, ενώ του μη γραμμικού στη Simulink **rpm** και **deg**. Επομένως χρειάζεται μετατροπή στον ελεγκτή.

Για τη σύγκλιση της ρίζας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ode3 (Bogacki-Shampine) σταθερού βήματος DT/10.

6.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ Α/Γ CART ΜΕ ΧΡΗΣΗ SIMULINK

Το μοντέλο Simulink που θα χρησιμοποιήσουμε είναι το παρακάτω:



Διάγραμμα 6.1- Μοντέλο της ανεμογεννήτριας στη Simulink

Όπως βλέπουμε ως είσοδοι της γεννήτριας (πράσινο μπλοκ) είναι ο ελεγκτής ροπής, ο ελεγκτής εκτροπής και ο ελεγκτής γωνίας κλίσης στο μη γραμμικοποιημένο σύστημα. Το μπλοκ της γεννήτριας επεξεργάζεται τα δεδομένα και διανέμει τα εξαγόμενα με τη βοήθεια ενός bus selector block. Τα εξαγόμενα αυτά είναι οι είσοδοι του ελεγκτή του γραμμικοποιημένου μοντέλου, του ελεγκτή γωνίας κλίσης (ανάδραση), αλλά και των γραφημάτων wind m, real rotor vel (rpm) και του sink block parameters με το όνομα plot vars.

Ο ελεγκτής της γωνίας κλίσης αλλά και ο ελεγκτής του γραμμικοποιημένου συστήματος, είναι αυτοί που μας παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την απόκριση του συστήματος. Συγκεκριμένα:



Διάγραμμα 6.22 – Αναπαράσταση του ελεγκτή κλίσης (Μη γραμμικοποιημένο σύστημα)

Ελεγκτής κλίσης

Ο ελεγκτής αυτός μας δίνει ουσιαστικά τα δεδομένα του μη γραμμικοποιημένου συστήματος. Όπως βλέπουμε, το υποσύστημα αυτό δέχεται 2 εισόδους, η μία είναι η ταχύτητα του δρομέα (rotor velocity) και η άλλη η rotor op (rad/s). Αφού τα δεδομένα περάσουν από το sum block διακλαδώνονται. Η πρώτη διακλάδωση εξάγει το σχεδιάγραμμα της γωνιακής ταχύτητας συναρτήσει του χρόνου, ενώ η δεύτερη οδηγεί σε έναν PI ελεγκτή, με εξαγόμενα τα δβ, β (σχεδιαγράμματα) και τα pitch meas και pitch control ως εξαγόμενα (outputs) από το υποσύστημα.



Διάγραμμα 6.3 – Αναπαράσταση του γραμμικοποιημένου συστήματος

<u>Γραμμικό σύστημα</u>

Το γραμμικό σύστημα τώρα, δέχεται ως εισόδους τα th_lin, ln1, w_lin και v_lin και με τη βοήθεια ενός PID ελεγκτή και της συνάρτησης με το όνομα turbine, εξάγει την γωνιακή ταχύτητα(ως Output) και την γωνία κλίσης συναρτήσει του χρόνου (σχεδιάγραμμα).

Για να μπορέσουμε να δούμε καλύτερα την απόκριση του μοντέλου μας και κατά συνέπεια να καταλήξουμε σε πιο αξιόπιστα συμπεράσματα σχετικά με τις τιμές του, χρησιμοποιούμε ένα αρχείο ανέμου το οποίο καλύπτει ολόκληρο το φάσμα των ταχυτήτων (για όλες τις περιοχές ανέμου) που μπορεί να συναντήσει η ανεμογεννήτρια.

Το συγκεκριμένο αρχείο (STEP_16_18_20_18.wnd) που θα χρησιμοποιήσουμε θα ξεκινάει από ταχύτητα 16 m/s όπου και θα παραμένει στην ίδια σταθερή ταχύτητα για 60 sec. Στην συνέχεια η ταχύτητα αυξάνει στα 18 m/s όπου και το σύστημα αγγίζει το κρίσιμο σημείο, κατά το οποίο μεταβαίνουμε από τη φάση 2 στη φάση 3. Η ταχύτητα αυξάνει στα 20 m/s και τώρα βρισκόμαστε επίσημα στην 3^η φάση (έλεγχος γωνίας κλίσης πτερυγίου) και τέλος ξαναπέφτει στα 18 m/s.

6.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Αλλάζοντας τις τιμές των ω και ζ, προσπαθούμε να προσδιορίσουμε τις τιμές των κερδών για τις οποίες παίρνουμε βέλτιστη Μρ (μέγιστη υπερύψωση). Έτσι καταλήγουμε στα παρακάτω αποτελέσματα:

ω	ζ	Α	В	С	M _P	tr	ts	K _P	Kı
0.7	0.1	-0.10238	- 2.6499	0.68651	72.925	-2.1115	57.143	0.014195	0.18491





Σ' αυτή την περίπτωση ο λόγος απόσβεσης ζ είναι πολύ χαμηλός και αρκετά μακριά από τη βέλτιστη τιμή του, καθώς βλέπουμε ότι ο χρόνος ανύψωσης είναι αρκετά υψηλός και στα τρία διαγράμματα ελέγχου (Pitch limitations, rotor angular velocity, pitch angle) με αποτέλεσμα να έχουμε παρατεταμένη μεταβατική απόκριση και μειωμένη την απόκριση σταθεράς κατάστασης. Ωστόσο οι αποκρίσεις της γωνιακής ταχύτητας μεταξύ γραμμικού και μη γραμμικού συστήματος φαίνονται να ταυτίζονται σε μεγάλο βαθμό.

ω	ζ	Α	В	С	M _P	tr	ts	K _P	Kı
0.3	0.3	-0.10238	-2.6499	0.068651	37.233	-4.4241	44.444	0.02929	0.033963





Μειώνοντας το ω και αυξάνοντας το ζ, βελτιώνουμε την απόκριση του συστήματός μας. Παρατηρείται ότι οι αποκρίσεις μεταξύ γραμμικού και μη γραμμικού συστήματος ταυτίζονται. Ωστόσο, αν και παίρνουμε σωστό εύρος τιμών στην ταχύτητα κλίσης και στην γωνιακή επιτάχυνση, οι τιμές της μεταβατικής απόκρισης και της απόκρισης σταθεράς κατάστασης μπορούν να βελτιωθούν. Άρα συνεχίζουμε την αναζήτηση για εύρεση βέλτιστου σημείου λειτουργίας.

ω	ζ	Α	В	С	M _P	tr	ts	K _P	Kı
0.3	0.7	-0.10238	-2.6499	0.068651	4.5988	-3.7126	19.048	0.11986	0.33963



Γράφημα 6.3

Για αποσβεσμένη φυσική συχνότητα $ω_n=0,3$ και λόγο απόσβεσης ζ=0,7 παίρνουμε τη βέλτιστη λύση. Η ταχύτητα κλίσης του πτερυγίου δεν υπερβαίνει τα 2,5 Deg/s<<18 Deg/s ενώ ούτε η επιτάχυνση ξεπερνάει τις 150 Deg/s² (μόλις 30 Deg/sec².

Όσον αφορά τώρα την γωνιακή ταχύτητα του δρομέα, εκτός από τις αναμενόμενες αποκλίσεις στα σημεία που αλλάζει η ταχύτητα του ανέμου, παραμένει σταθερή στα επιθυμητά επίπεδα 41rpm.

Τέλος όσον αφορά την γωνία κλίσης του δρομέα παρατηρούμε ότι για ζ=0,7 ο χρόνος ανύψωσης μειώνεται τόσο ώστε να μπορούμε να πούμε ότι πρόκειται για την βέλτιστη λύση.

Παρατηρούμε ότι ο χρόνος ανύψωσης έχει μειωθεί αισθητά και άρα

ω	ζ	Α	В	С	M _P	tr	ts	K _P	Kı
0.4	0.7	-0.10238	-2.6499	0.068651	4.5988	-2.7845	14.286	0.17269	0.060379



Γράφημα 6.4

Έχοντας υπολογίσει μία ικανοποιητική απόκριση για το σύστημά μας, για ω=0.3 και ζ=0.7, και γνωρίζοντας φυσικά από τη θεωρία ότι για τιμές του ζ που πλησιάζουν το 0.7 παίρνουμε καλά (αν όχι βέλτιστα) αποτελέσματα, θα διατηρήσουμε το ζ σταθερό και θα μελετήσουμε την επίδραση που έχει στο σύστημα η μεταβολή του ω.

Στο διάγραμμα αυτό έχουμε παρατηρούμε ότι αν και χρησιμοποιούμε βέλτιστο λόγο απόσβεσης ζ, έστω και η μικρή αύξηση στην τιμή του ω (αύξηση κατά 0.1) είναι ικανή να επηρεάσει τόσο τα αποτελέσματα ώστε να παίρνουμε απορριπτέες τιμές.





Γράφημα 6.5

Έχοντας πλέον βρει μία λύση με ικανοποιητικά αποτελέσματα (ω=0.3 και ζ=0,7), θέλουμε να εξερευνήσουμε τις αποκρίσεις του συστήματος για τιμές μικρότερες και μεγαλύτερες του ζ=0.7 κρατώντας ταυτόχρονα σταθερό το ω.

Αυξάνοντας λοιπόν την τιμή του ω κατά ένα δέκατο, δηλαδή στο 0.8, παίρνουμε ως αποτελέσματα της προσομοίωσης σχετικά μικρό χρόνο υπερύψωσης, αλλά υψηλές τιμές για την μέγιστη υπερύψωση, ενώ παράλληλα βλέπουμε ότι οι τιμές της επιτάχυνσης της γωνίας κλίσης υπερβαίνουν την τιμή των 150 rad/s² που έχει

ω	ζ	Α	В	С	M _P	tr	ts	K _P	Kı
0.2	0.7	-0.10238	- 2.6499	0.068651	4.5988	-5.5689	28.571	0.067027	0.015095

οριστεί ως μέγιστη τιμή στις προδιαγραφές με συνέπεια αυτή η λύση να



Γράφημα 6.6

απορρίπτεται.

Στην συγκεκριμένη προσομοίωση μειώνουμε την τιμή του ω κατά 0.1 διατηρώντας παράλληλα σταθερή τιμή για το ζ. Παρατηρούμε ότι παίρνουμε πάλι πολύ καλές αποκρίσεις για το σύστημα, αν και έχουμε μεγαλύτερο χρόνο ανύψωσης.

Στο σύνολο των προσομοιώσεων φαίνεται ότι τα αποτελέσματα του γραμμικού με τα αποτελέσματα του μη γραμμικού συστήματος δεν έχουν μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ τους. Η 'σύμπτωση' αυτή γραμμικού και μη γραμμικού συστήματος είναι ικανή να πείσει για την ακρίβεια των υπολογισμών και κατά συνέπεια, τη σωστή πρόβλεψη της απόκρισης του συστήματος.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αποτίμηση του συστήματος ελέγχου FAST της ανεμογεννήτριας είναι γενικότερα θετική:

- Το σύστημα παράγει αναλυτικά μοντέλα ανεμογεννήτριας δίνοντας λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τη δυναμική του ανέμου.
- Εκτός από μη γραμμικά, παράγει και γραμμικά μοντέλα, επιτρέποντας την καλύτερη σύγκριση των αποτελεσμάτων, αλλά και από πλευρά σχεδίασης, τη σχεδίαση του ελεγκτή.
- Για την εκτέλεσή του χρησιμοποιεί τη MATLAB, ένα ευρέως διαδεδομένο πρόγραμμα, με σχετικά εύχρηστο περιβάλλον και ένα από τα πλέον καθιερωμένα προγράμματα για επιστημονικές εφαρμογές σε παγκόσμιο επίπεδο. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιεί το Simulink, μία εύχρηστη εφαρμογή του προγράμματος της Matlab, άμεσα προσβάσιμη, με πολλαπλές λειτουργίες.
- Χρησιμοποιεί ένα καλό περιβάλλον προσομοίωσης, αν και ιδιαίτερα περίπλοκο (πολλές παράμετροι και αρχεία εισόδου). Βέβαια, μπορεί να θεωρηθεί, ότι ένας τέτοιος βαθμός πολυπλοκότητας είναι αναμενόμενος ,καθώς το φυσικό σύστημα που μελετάται είναι η ανεμογεννήτρια, ένα άκρως περίπλοκο σύστημα πριν τη μοντελοποίηση, πόσο μάλλον μετά από αυτήν.
- Η χρήση απλών PID ελεγκτών για τη μοντελοποίηση του συστήματος έχει ως αποτέλεσμα καλές αποκρίσεις, με τη χρήση απλών σχεδίων ελέγχου (σε αντίθεση με άλλα συστήματα που χρησιμοποιούν πιο περίπλοκες μεθόδους πχ ασαφή λογική) κάνοντάς το μοντέλο ευρέως κατανοητό σε ένα σχετικά μεγάλο αριθμό ειδικοτήτων.
- Παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου εκτροπής (yaw), μία λειτουργία που δεν είναι ευρέως διαδεδομένη.
- Τέλος παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα που δίνει το γραμμικό σύστημα σχεδόν ταυτίζονται με αυτά του μη γραμμικού. Έτσι το γραμμικό σύστημα θεωρείται ιδιαίτερα αξιόπιστο για την πρόβλεψη της απόκρισης.

Για τους παραπάνω λόγους συστήνεται η χρήση του CART για τη μοντελοποίηση ανεμογεννητριών

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1.Ινστιτούτο Τεχνολογίας και Εφαρμογών Στερεών Καυσίμων (ΙΤΕΣΚ), http://allaboutenergy.gr/Diaxeirisi 42.html

2.http://scienceinschool.org/print/1093

3.http://www.allaboutenergy.gr/Piges2.html

4.http://www.allaboutenergy.gr/Intro13html

5. http://www.allaboytenergy.gr/Diaxeirisi423.html

6. http://www.allaboutenergy.gr/Diaxeirisi421.html

7. http://www.env-edu/Documents/Εθνικό Πρόγραμμα Μείωσης Αερίων Θερμοκηπίου 2000-2010. pdf

8. http://pacific.jour.auth.gr/emmeis/issues/01/1diethni2.htm

9. http://www.physics4u.gr/energy.ape.html

10. http://www.allaboutenergy.gr/Piges23.html

11. http://el.wikipedia.org/wiki/Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

12.http://www.piraeus.org/Documents/internet/Economic_Research/Kladikes_Mele tes/2010/Eolika_Parka.pdf

13. http://www.el.wikipedia.org/wiki/Αιολική ενέργεια

14. Εθνικό Σχέδιο Δράσης για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής

15.Κέντρο Ανανεώσιμων πηγών και εξοικονόμησης ενέργειας, Ετήσια Έκθεση ΚΑΠΕ CRES,2009, Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής.

16.Φυσική Γ Γυμνασίου, ΟΕΔΒ, Έκδοση 2001, σελ. 116, Κεφ. 4-Έργο και Ενέργεια.

17. <u>http://www.selasenergy.gr/energy.php</u>

18. <u>http://www.allaboutenergy.gr/Paragogi 32.html</u>

19. http://www.physics4u.gr/energy/windenergy.html

20. <u>www.nautilia.gr/forum/showthread.php</u>

21. www.cres.gr/Kape/energeia_politis/energeia_politis_windmill.htm

22. http://www.allaboutenergy.gr/AiolikiEnergeia.html

23.Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής. Υπηρεσία εξυπηρέτησης επενδυτών για έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ετήσια Έκθεση της Υπηρεσίας ΑΠΕ. Έτος 2010.

24. Περισκόπιο της Επιστήμης, τεύχος 258, Φεβρουάριος 2002, σελ.80-84

25. Οικολογική κίνηση Πάτρας

http://www.oikipa.gr/index/index.php ?option=com_content&task...58k

26. www.ewindtech.net/docs/UNIT 3 summary el.pdf

27. http://www.eletaen.gr/drupal

28. ΗΜΥ 445/681 Αιολική Ενέργεια, Δρ Ηλίας Κυριακίδης, Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών,Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Κύπρου.

http://www.eng.ucy.ac.cy/elias/Courses/ECE 445/presentations/Lectures 2010/ECE 445_Lecture_Wind Energy.pdf

29.www.cres.gr/kape/education/students_quide.pdf

30. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ΥΠΕΚΑ

www.ypeka.gr/Default.aspx?tabit=285-81K

31. Αιολική ενέργεια, ΥΠΕΚΑ

www.ypeka.gr/Default.aspx?tabit=287-74K

- 32. www.cres,gr/kape/datainfo/maps.htm
- 33. Θάλασσα κα Ενέργεια
- http://www.nautilia.gr/forum/showhread.php?34578-...99k
- 34. aims.cres.gr/grwind150/viewer.htm
- 35. ODHGOS_TERESS
- 36. publishedoneletaen <u>www.eletaen.gr/drupal</u>
- 37. <u>www.selasenergy.gr/environment.pht</u>

Ελεγκτές

38. <u>http://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller</u>

39.Αλγόριθμοι ελέγχου PID- (Μεϊντάνης Ιωάννης) - ΤΕΙ Πειραιά- Τμήμα Αυτοματισμού

40.Συστήματα αιολικής ενέργειας (Λευτέρης Πισκιτζής, αρχιτέκτονας, υποψήφιος Διδάκτωρ ΕΜΠ)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

CART_Towersoft.dat

_____ _____ _____ Standard AWT-27CR tower data. Used for FAST Certification Tests. _____ 13 NTwInpSt - Number of input stations to specify tower geometry False CalcTMode - Calculate tower mode shapes internally {T: ignore mode shapes from below, F: use mode shapes from below} [CURRENTLY IGNORED] (switch) TwrFADmp(1) - Tower 1st fore-aft mode structural damping 0.15 ratio (%) 0.0 TwrFADmp(2) - Tower 2nd fore-aft mode structural damping ratio (%) 0.15 TwrSSDmp(1) - Tower 1st side-to-side mode structural damping ratio (%) 0.3 TwrSSDmp(2) - Tower 2nd side-to-side mode structural damping ratio (%) ----- TOWER ADJUSTMUNT FACTORS ------------1.0 FAStTunr(1) - Tower fore-aft modal stiffness tuner, 1st mode (-) FAStTunr(2) - Tower fore-aft modal stiffness tuner, 2nd 1.0 mode (-) SSStTunr(1) - Tower side-to-side stiffness tuner, 1st 1.0 mode (-) SSStTunr(2) - Tower side-to-side stiffness tuner, 2nd 1.0 mode (-) AdjTwMa - Factor to adjust tower mass density (-) AdjFASt - Factor to adjust tower fore-aft stiffness 1.0 1.0 (-) 1.0 AdjSSSt - Factor to adjust tower side-to-side stiffness (-) ----- DISTRIBUTED TOWER PROPERTIES -------_____ TwSSStif TwGJStif TwEAStif HtFract TMassDen TwFAStif

 TwFAIner
 TwSSIner
 TwFAcgOf
 TwS

 (-)
 (kg/m)
 (Nm^2)

 (N)
 (kg m)
 (m)

 0.0000
 1548.
 8.210e10

 TwSScgOf (Nm^2) (Nm^2) (m)

 0.0000
 1548.
 8.210e10
 8.210e10

 1
 0.1
 0.0
 0.0
 0.0

 0.0658
 1361.
 5.480e10
 5.480e10

 1
 0.1
 0.0
 0.0
 0.0

 0.1 0.0 0.1 0.0

......

0.1970	1428.	2	.96e1	.0	2.960	e10	
0.1	0.1	0.0		0.0	0.0)	0.0
0.2623	1311.	1	.75e1	_0	1.750	e10	
0.1	0.1	0.0		0.0	0.0)	0.0
0.3293	1311.	1	.75e1	0	1.756	-10	
0 1	0 1	0 0		0 0	0 ()	0 0
0 4299	1311	1	75e1	0	1 754	ر 10	0.0
0.1	0 1	0 0	• / 0 0 1	0 0	1.750)	0 0
0 5137	0.1	1	1101	0.0	1 1 1 /	10	0.0
0.3137	0 1	0 0 ¹	.1461		1.1.4 0 (510	0 0
0 6142	0.1	1	1/01	0.0	1 1 1 /	10	0.0
0.0143	0.1	0 0 ¹	.1461		T.T.46) ETO	0 0
0.1	0.1	0.0	1 / - 1	0.0	1 1 1 .	10	0.0
0.6982	0 1	1 0 0	.1401		1.140	€T0	0 0
0.1	0.1	0.0	C D = C	0.0	7 (2)		0.0
0.7816	599.	/	.63el	19	1.636	209	0 0
0.1	0.1	0.0	60.0	0.0	0.0)	0.0
0.8814	599.	/	.63el)9	1.636	909	
0.1	0.1	0.0		0.0	0.0)	0.0
0.9656	1311.	1	.75e0)9	1.750	≥09	
0.1	0.1	0.0		0.0	0.0)	0.0
1.0000	1311.	1	.75eC)9	1.750	e09	
0.1	0.1	0.0		0.0	0.0)	0.0
	'	TOWER	FORE-	-AFT MODE SHA	APES		
0.408	TwFAM1Sh(2)	- Mod	e 1,	coefficient	of x^2	2 term	
0.949	TwFAM1Sh(3)	-	,	coefficient	of x^3	3 term	
0.612	TwFAM1Sh(4)	-	,	coefficient	of x^4	l term	
-1.630	TwFAM1Sh(5)	-	,	coefficient	of x^s	5 term	
0.661	TwFAM1Sh(6)	-	,	coefficient	of x^0	5 term	
-23.056	TwFAM2Sh(2)	- Mod	e 2,	coefficient	of x^2	2 term	
-78.410	TwFAM2Sh(3)	-	,	coefficient	of x^3	3 term	
197.460	TwFAM2Sh(4)	-	,	coefficient	of x^4	1 term	
-102.757	TwFAM2Sh(5)	_	,	coefficient	of x^s	5 term	
7.763	TwFAM2Sh(6)	_	,	coefficient	of x^(5 term	
	` '	TOWER	, SIDE-	-TO-SIDE MODE	E SHAPI	ES	
0.408	TwFAM1Sh(2)	– Mod	e 1.	coefficient	of x^2	? term	
0 949	TwFAM1Sh(3)	-		coefficient	of x^{\prime}	3 term	
0.612	TwFAM1Sh(4)	_	,	coefficient	of x^{4}	1 term	
-1 630	$T_{WF} M1Sh(5)$	_	,	coefficient	of v^{1}	5 torm	
1.000	$T_{W}F\Delta M1Ch(S)$	_	,		of v^{\prime}	5 torm	
-23 056	TWPAPITOII(0) TWPAPITOII(0)	- Mod	~ ^ ′		$of v^{\prime}$) torm	
-78 /10	TWPAPIZOII(Z) TWPAPIZOII(Z)	- 1100	= 4,			torm	
- /0.410 107 /60	IWEAM2SH(S)	_	'		of wh	1 torm	
100 757	IWEAM2SII(4)	-	,				
-102.151	IWFAM2SD(5)	-	'	coefficient	OI XA	cerm	
1.163	TWFAMZSh(6)	-	,	coerricient	OI X^(o term	

CART_Blades.dat

......

----- FAST INDIVIDUAL BLADE FILE -------Standard AWT-27CR blade data. Used for FAST Certification Tests. NBlinpSt False Calory - Number of blade input stations (-) CalcBMode - Calculate blade mode shapes internally {T: ignore mode shapes from below, F: use mode shapes from below} [CURRENTLY IGNORED] (switch) 0.0 BldFlDmp(1) - Blade flap mode #1 structural damping in percent of critical (%) 0.0 BldFlDmp(2) - Blade flap mode #2 structural damping in percent of critical (%) 0.2 BldEdDmp(1) - Blade edge mode #1 structural damping in percent of critical (%) ----- BLADE ADJUSTMENT FACTORS ------1.0 FlStTunr(1) - Blade flapwise modal stiffness tuner, 1st mode (-) FlStTunr(2) - Blade flapwise modal stiffness tuner, 2nd 1.0 mode (-) 1.0AdjBlMs- Factor to adjust blade mass density (-)1.0AdjFlSt- Factor to adjust blade flap stiffness (-)1.AdjEdSt- Factor to adjust blade edge stiffness (-) ----- DISTRIBUTED BLADE PROPERTIES ------_____ BlFract AeroCent StrcTwst BMassDen FlpStff EdgStff (-) (-) (deg) (kg/m) (Nm^2) (Nm^2) (-)(-)(deg)(kg/m)(Nm^2)(Nm^2)0.0000.0003.440282.9216500000283000000.0220.0003.370290.241610000031800000 0.000 0.000 0.053 3.270 261.88 142000000 328000000 98700000 307000000 0.114 3.080 201.28 0.000 0.175 2.880 186.52 78400000 34000000 0.236 0.000 2.690 169.10 59200000 342000000 0.299 0.000 2.450 149.28 45400000 278000000 0.000 2.210 133.19 34100000 237000000 0.364 0.427 0.000 1.910 111.74 25000000 169000000 96.86 78.57 0.000 0.491 1.610 17900000 138000000 0.000 0.000 0.555 1.240 12300000 94000000

 0.555
 0.000
 1.240
 78.57
 12300000
 94000000

 0.618
 0.000
 0.860
 65.03
 8190000
 72500000

 0.682
 0.000
 0.380
 49.68
 5140000
 46700000

 0.745
 0.000
 -0.110
 37.59
 3020000
 32600000

 0.809
 0.000
 -0.770
 25.01
 1620000
 19000000

 0.873
 0.000
 -1.430
 16.01
 868000
 13000000

 0.936
 0.000
 -2.370
 10.73
 468000
 8850000

 1.000
 0.000
 -3.310
 6.02
 209000
 6800000

 ----- BLADE MODE SHAPES -----_____ 0.558 BldFl1Sh(2) - Flap mode 1, coeff of x^2 0.796 BldFl1Sh(3) -, coeff of x^3 -0.718 BldFl1Sh(4) -, coeff of x^4 $\begin{array}{ccc} \text{protection}(5) & - & , & \text{coeff of } x^{5} \\ \text{BldFllSh}(6) & - & , & \text{coeff of } x^{6} \\ \text{BldFl2Sh}(2) & - & \text{Flammada} \end{array}$ 0.877 -0.513 BldFl2Sh(2) - Flap mode 2, coeff of x^2 -1.198 $BldFl2Sh(3) - , coeff of x^{3}$ 0.805 BldFl2Sh(4) -, coeff of x^4 -4.554 $\begin{array}{c} \text{Diversion}(5) = & , \text{ coeff of } x^{-5} \\ \text{BldFl2Sh}(6) = & , \text{ coeff of } x^{-6} \\ \text{BldEdect}(2) \end{array}$ 12.777 -6.830 1.778BldEdgSh(2) - Edge mode 1, coeff of x^2-2.071BldEdgSh(3) -, coeff of x^3
2.445	BldEdgSh(4)	-	,	coeff	of	x^4
-1.350	BldEdgSh(5)	-	,	coeff	of	x^5
0.198	BldEdgSh(6)	-	,	coeff	of	x^6

AWT_ADAMS.dat

...........

_____ _____ ----- FAST 2 ADAMS PREPROCESSOR, ADAMS-SPECIFIC DATA FILE -----Standard AWT-27CR ADAMS-specific data. Used for FAST Certification Tests. _____ SaveGrphcs - Save GRAPHICS output (flag) False False MakeLINacf - Make an ADAMS/LINEAR control / command file (flag) 0.01 CRatioTGJ - Ratio of damping to stiffness for the tower torsion deflection (-) 0.01 CRatioTEA - Ratio of damping to stiffness for the tower extensional deflection (-) 0.01 CRatioBGJ - Ratio of damping to stiffness for the blade deflections (-) torsion CRatioBEA - Ratio of damping to stiffness for the blade 0.01 extensional deflections (-) ----- BLADE PITCH ACTUATOR PARAMETERS ------_____ 1.0E13 BPActrSpr - Blade pitch actuator spring stiffness constant (N-m/rad) 1.0E12 BPActrDmp - Blade pitch actuator damping constant (N-m/rad/s) _____ 12 - Number of sides used in GRAPHICS CYLINDER NSides and FRUSTUM statements (-) 1.2 TwrBaseRad - Tower base radius used for linearly tapered tower GRAPHICS CYLINDERs (m) 0.6 TwrTopRad - Tower top radius used for linearly tapered tower GRAPHICS CYLINDERs (m) NacLength - Length of nacelle used for the nacelle 3.6 GRAPHICS (m) 0.5 NacRadBot - Bottom (opposite rotor) radius of nacelle FRUSTUM used for the nacelle GRAPHICS (m) 0.6 NacRadTop - Top (rotor end) radius of nacelle FRUSTUM used for the nacelle GRAPHICS (m) 0.5 GBoxLength - Length, width, and height of the gearbox BOX for gearbox GRAPHICS (m) 1.5 GenLength - Length of the generator CYLINDER used for generator GRAPHICS (m) 0.5 HSSLength - Length of the high-speed shaft CYLINDER used for HSS GRAPHICS (m)

2.432 LSSLength - Length of the low-speed shaft CYLINDER used for LSS GRAPHICS (m) - Radius of the generator CYLINDER used for 0.5 GenRad generator GRAPHICS (m) 0.05 HSSRad - Radius of the high-speed shaft CYLINDER used for HSS GRAPHICS (m) 0.1 LSSRad - Radius of the low -speed shaft CYLINDER used for LSS GRAPHICS (m) 0.2 HubCylRad - Radius of hub CYLINDER used for hub GRAPHICS (m) 0.1 ThkOvrChrd - Ratio of blade thickness to blade chord used for blade element BOX GRAPHICS (-) 0.0 BoomRad - Radius of the tail boom CYLINDER used for tail boom GRAPHICS (m)

AeroDyn01_sim.ipt

CART aerodynamic parameters for FAST. SI SysUnits - System of units for used for input and output [must be SI for FAST] (unquoted string) STEADY StallMod - Dynamic stall included [BEDDOES or STEADY] (unquoted string) NO CM UseCm - Use aerodynamic pitching moment model? [USE CM or NO CM] (unquoted string) !JASON:DYNIN InfModel - Inflow model [DYNIN or EOUIL EQUIL] (unquoted string) IndModel - Induction-factor model [NONE or WAKE WAKE or SWIRL] (unquoted string) 0.001 !JASON: 0.001 AToler - Induction-factor tolerance (convergence criteria) (-) TLModel - Tip-loss model (EQUIL only) PRANDTL [PRANDtl, GTECH, or NONE] (unquoted string) HLModel - Hub-loss model (EQUIL only) [PRANdtl or NONE NONE] (unquoted string) "STEP 18 20 18 16.WND" - Name of file containing wind data (quoted string) 37. НН - Wind reference (hub) height [TowerHt+Twr2Shft+OverHang*SIN(NacTilt)] (m) 0.05 !JASON: 0.3 TwrShad - Tower-shadow velocity deficit (-) 3.0 ShadHWid - Tower-shadow half width (m) 4.0 T Shad Refpt - Tower-shadow reference point (m) 1.03 - Air density (kg/m^3) Rho KinVisc - Kinematic air viscosity [CURRENTLY 1.4639e-5 IGNORED] (m^2/sec) DTAero - Time interval for aerodynamic 0.002 calculations (sec)

NumFoil - Number of airfoil files (-) 11 "art15.air" FoilNm - Names of the airfoil files [NumFoil lines] (quoted strings) "art25.air" "art35.air" "art45.air" "art55.air" "art65.air" "art75.air" "art75-5.air" "art85.air" "art85-5.air" "art95.air" 20 BldNodes - Number of blade nodes used for analysis (-) RNodes AeroTwst DRNodes Chord NFoil PrnElm 3.3740 1.8799 0.998 1.1929 1 PRINT 3.1895 2.8777 0.998 1.3286 1 PRINT 3.0569 0.998 3.8754 1.4276 1 PRINT 0.998 2.8685 1.5637 4.8731 1 PRINT 0.998 1.6633 5.8709 2.7371 2 PRINT 0.998 6.8686 2.5294 1.6575 2 PRINT 7.8663 2.3700 0.998 1.6163 3 PRINT 2.1379 0.998 1.5555 8.8641 3 PRINT 9.8618 1.9386 0.998 1.5017 4 PRINT 1.6665 10.8595 0.998 1.4274 4 PRINT 11.8573 1.4339 5 PRINT 0.998 1.3735 12.8550 1.0945 0.998 1.3000 5 PRINT 13.8528 0.8374 0.998 1.2461 6 PRINT 1.1718 6 PRINT 14.8506 0.4020 0.998 15.8483 0.0770 0.998 1.1179 7 PRINT 7 PRINT 16.8460 -0.4568 0.998 1.0444 17.8438 -0.8951 0.998 0.9906 8 PRINT 18.8416 -1.5209 0.998 0.9171 9 PRINT 0.998 0.8626 10 PRINT 0.998 0.7889 11 PRINT 19.8393 -2.1452

STEP_18_20_18_16.WND

20.8371 -2.9979

...................

!UAE Pł	nase VI	(Ames)	wind for	for a sim	ple pow	ver curve.	
!Time	Wind	Wind	Vert.	Horiz.	Vert.	LinV	Gust
!	Speed	Dir	Speed	Shear	Shear	Shear	Speed
0.0	18.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15.0	18.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
45.0	18.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
60.0	18.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
61.0	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
85.0	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
110.0	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

120.0	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
121.0	18.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
155.0	18.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
170.0	18.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
180.0	18.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
181.0	16.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
215.0	16.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
235.0	16.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
240.0	16.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9999.9	16.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

art15.air

AR	F15.air		
FRO	OM Dayton	Griffin, Au	ug20, '98
1	Numk	per of airfo	oil tables in this file
0	Tabl	le ID parame	eter
	16.00)	Stall angle (deg)
0	No	Longer used	, enter zero
0	No	longer used	enter zero
0	No	Longer used	enter zero
	-1.00)	zero lift angle
	6.308	3	Cn slope
	0.45		Cn at stall
	-0.5		Cn at negative stall
	0.01		Alpha for Cd min
	0.738	3	Cd min
	-180.0	0.00	0.7384
	-170 0	0 32	0 7409
	-160 0	0 44	0 7961
	-150 0	0 49	0 9000
	-140 0	0 54	1 0676
	-130 0	0.53	1 1992
	-120 0	0.46	1 2983
	-110 0	0 36	1 3618
	-100.0	0.25	1.4052
	-90 0	0.00	1 4439
	-80.0	-0 25	1 4052
	-70 0	-0.36	1 3618
	-60 0	-0.46	1 2983
	-50 0	-0 53	1 1992
	-40 0	-0 54	1 0676
	-30 0	-0.50	0 9000
	-20.0	-0 44	0 7961
	-10 0	-0.32	0 7417
	-8 0	-0.26	0 7409
	-6.0	-0 19	0 7403
	-4 0	-0 13	0 7389
	-2 0	-0.06	0 7383
	0 0	0 01	0 7384
	2.0	0.07	0.7384
	4.0	0.14	0.7384
	6.0	0.21	0.7385
	8 0	0.26	0 7402
	10.0	0.32	0.7409
	12.0	0.39	0.7417

14.0	0.43	0.7428
16.0	0.45	0.7463
18.0	0.46	0.7649
20.0	0.44	0.7961
40.0	0.54	1.0676
50.0	0.53	1.1992
60.0	0.46	1.2983
70.0	0.36	1.3618
80.0	0.25	1.4052
90.0	0.00	1.4439
100.0	-0.25	1.4052
110.0	-0.36	1.3618
120.0	-0.46	1.2983
130.0	-0.53	1.1992
140.0	-0.54	1.0676
150.0	-0.49	0.9000
160.0	-0.44	0.7961
170.0	-0.32	0.7409
180.0	0.00	0.7384

art25.air

AR	T25.air							
FRO	OM Dayto	n Griffi	ln, Aug	g20, '	98			
1	Nur	mber of	airfoi	ll tab	les	in	this	file
0	Tal	ole ID p	paramet	cer				
	16.0	0 0		Stall	ang	gle	(deg))
0	No	longer	used,	enter	zei	20		
0	No	longer	used,	enter	zei	20		
0	No	longer	used,	enter	zei	20		
	-0.0	00		zero	lift	ar ar	ngle	
	6.30	28		Cn sl	ope			
	1.10	C		Cn at	sta	all		
	-1.1			Cn at	neg	gati	ive st	tall
	0.03	1		Alpha	foi	c Co	d min	
	0.00	07		Cd mi	n			
-	-180.0	0.01	0.	.02				
-	-170.0	0.72	0.	.05				
-	-160.0	0.84	Ο.	.31				
-	-150.0	1.08	0.	. 62				
-	-140.0	1.15	0.	.96				
-	-130.0	1.09	1.	. 3				
-	-120.0	0.88	1.	.52				
-	-110.0	0.60	1.	.66				
-	-100.0	0.31	1.	.76				
-	-90.0	0.00	1.	. 8				
-	-80.0	-0.31	1.	.76				
-	-70.0	-0.60	1.	.66				
-	-60.0	-0.88	1.	.52				
-	-50.0	-1.09	1.	. 3				
-	-40.0	-1.15	Ο.	.96				
-	-30.0	-1.08	Ο.	. 62				
-	-20.0	-0.84	0.	.31				

-10.0	-0.72	0.0170
-8.0	-0.60	0.0146
-6.0	-0.54	0.0127
-4.0	-0.36	0.0086
-2.0	-0.18	0.0074
0.0	-0.01	0.0075
2.0	0.17	0.0077
4.0	0.35	0.0077
6.0	0.53	0.0077
8.0	0.65	0.0127
10.0	0.82	0.0146
12.0	0.97	0.0170
14.0	1.05	0.0199
16.0	1.10	0.0379
18.0	1.08	0.0948
20.0	1.04	0.1809
40.0	1.35	0.8750
50.0	1.33	1.2150
60.0	1.15	1.4650
70.0	0.89	1.6250
80.0	0.60	1.7350
90.0	0.31	1.8000
100.0	-0.31	1.76
110.0	-0.6	1.66
120.0	-0.88	1.52
130.0	-1.09	1.3
140.0	-1.15	0.96
150.0	-1.08	0.62
160.0	-0.84	0.31
170.0	-0.72	0.05
180.0	0.01	0.02

art35.air

a20. '98
oil tables in this file
ter
Stall angle (deg)
enter zero
enter zero
enter zero
zero lift angle
Cn slope
Cn at stall
Cn at negative stall
Alpha for Cd min
Cd min
0.02
0.05
0.31
0.62
0.96
1.3
1.52

-110.0	0.60	1.66
-90.0	0.00	1.8
-80.0	-0.31	1.76
-70.0	-0.60	1.66
-60.0	-0.88	1.52
-50.0	-1.09	1.3
-40.0	-1.15	0.96
-20.0	-0.84	0.31
-10.0	-0.69	0.0166
-8.0	-0.55	0.0144
-6.0	-0.44	0.0119
-4.0	-0.27	0.0089
-2.0	-0.11	0.0071
2 0	0.08	0.0074
4.0	0.38	0.0075
6.0	0.55	0.0084
8.0	0.69	0.0124
10.0	0.87	0.0144
12.0	1.02	0.0166
16.0	1.13	0.0192
18.0	1.18	0.1012
20.0	1.13	0.1901
40.0	1.32	0.8818
50.0	1.29	1.2218
60.0	1.12	1.4694
/0.0	0.85	1.62/8 1.7270
90.0	0.37	1 8000
100.0	-0.31	1.76
110.0	-0.6	1.66
120.0	-0.88	1.52
130.0	-1.09	1.3
140.0	-1.15	0.96
160 0	-1.U8 -0.84	U.62 0 31
170.0	-0.69	0.05
180.0	-0.06	0.02

art45.air

.....

ART45.air FROM Dayton Griffin, Aug20, '98 1 Number of airfoil tables in this file 0 Table ID parameter 18.00 Stall angle (deg) No longer used, enter zero 0 No longer used, enter zero 0 0 No longer used, enter zero -2.00 zero lift angle

6.30	8	Cn slope
1.27	1	Cn at stall
-1.1		Cn at negative stall
0.01		Alpha for Cd min
0.00)7	Cd min
-180.0	-0.12	0.02
-170.0	0.58	0.05
-160.0	0.84	0.31
-150.0	1.08	0.62
-140.0	1.15	0.96
-130.0	1.09	L.3 1 E0
-120.0	0.88	1.52
-110.0	0.60	1.00
-90 0	0.31	1 8
-80 0	-0 31	1 76
-70.0	-0.60	1.66
-60.0	-0.88	1.52
-50.0	-1.09	1.3
-40.0	-1.15	0.96
-30.0	-1.08	0.62
-20.0	-0.84	0.31
-10.0	-0.58	0.0142
-8.0	-0.42	0.0123
-6.0	-0.34	0.0111
-4.0	-0.19	0.0092
-2.0	-0.04	0.0068
0.0	0.12	0.0072
2.0	0.27	0.0073
4.0 6 0	0.42	0 0095
8.0	0.74	0.0123
10.0	0.92	0.0142
12.0	1.09	0.0163
14.0	1.20	0.0187
16.0	1.27	0.0453
18.0	1.27	0.1115
20.0	1.20	0.2042
40.0	1.29	0.8920
50.0	1.25	1.2320
60.0	1.07	1.4760
70.0	0.81	1.6320
80.0	0.52	1.7400
90.0	-0.31	1.0000
110 0	-0.31	1 66
120.0	-0.88	1.52
130.0	-1.09	1.3
140.0	-1.15	0.96
150.0	-1.08	0.62
160.0	-0.84	0.31
170.0	-0.58	0.05
180.0	-0.12	0.02

art55.air

ART55.air FROM Davton (Griffin, A	ug20, '98
1 Number 0 Table	er of airf	oil tables in this file
16.00		Stall angle (deg)
0 No 10	onger used	, enter zero
0 No lo	onger used	, enter zero
0 No lo	onger used	, enter zero
-2.00	2	zero lift angle
6.308		Cn slope
1.32		Cn at stall
-1.1		Cn at negative stall
0.01		Alpha for Cd min
0.007		Cd min
-180.0	-0.17	0.02
-1/0.0	0.64	0.05
-150.0	1 00	0.51
-140 0	1 15	0.02
-130.0	1.09	1.3
-120.0	0.88	1.52
-110.0	0.60	1.66
-100.0	0.31	1.76
-90.0	0.00	1.8
-80.0	-0.31	1.76
-70.0	-0.60	1.00
-50.0	-0.88	1.32
-40.0	-1.15	0.96
-30.0	-1.08	0.62
-20.0	-0.84	0.31
-10.0	-0.64	0.0144
-8.0	-0.48	0.0124
-6.0	-0.29	0.0104
-4.0	-0.14	0.0093
-2.0	0.02	0.0070
2 0	0.17	0 0072
4.0	0.48	0.0076
6.0	0.64	0.0105
8.0	0.82	0.0124
10.0	0.99	0.0144
12.0	1.15	0.0166
14.0	1.26	0.0214
16.0	1.32	0.0566
18.0	1.31	0.1289
40 0	1 26	0.2249
50.0	1.22	1.2456
60.0	1.04	1.4848
70.0	0.77	1.6376
80.0	0.48	1.7440
90.0	0.19	1.8000
100.0	-0.31	1.76
110.0	-0.6	1.66
120.0	-0.88	1.52
140 0	-1.09 -1.15	1.3
150 0	-1.08	0.50
160.0	-0.84	0.31
170.0	-0.64	0.05

art65.air

ART65.air FROM Dayton Griffin, Aug20, '98 1 Number of airfoil tables in this file 0 Table ID parameter 16.00 Stall angle (deg) No longer used, enter zero 16.00 0 0 No longer used, enter zero No longer used, enter zero 0 zero lift angle -6.00 6.308 Cn slope 1.27 Cn at stall -1.1 Cn at negative stall Alpha for Cd min 0.01 0.007 Cd min

60.0	1.01	1.4958
70.0	0.73	1.6446
80.0	0.44	1.7490
90.0	0.15	1.8000
100.0	-0.31	1.76
110.0	-0.6	1.66
120.0	-0.88	1.52
130.0	-1.09	1.3
140.0	-1.15	0.96
150.0	-1.08	0.62
160.0	-0.84	0.31
170.0	-0.69	0.05
180.0	-0.21	0.02

art75.air

...........

<pre>FROM Dayton Griffin, Aug20, '98 1 Number of airfoil tables in this file 0 Table ID parameter 14.00 </pre>	
 Number of airfoil tables in this file Table ID parameter Acceleration (dec) 	
0 Table ID parameter	
14.00 Stall angle (deg)	
0 No longer used, enter zero	
0 No longer used, enter zero	
0 No longer used, enter zero	
-2.00 zero lift angle	
6.308 Cn slope	
1.34 Cn at stall	
-1.1 Cn at negative stall	
0.01 Alpha for Cd min	
0.007 Cd min	
-180.0 -0.26 0.02	
-170.0 0.67 0.05	
-160.0 0.84 0.31	
-150.0 1.08 0.62	
-140.0 1.15 0.96	
-130.0 1.09 1.3	
-120.0 0.88 1.52	
-110.0 0.60 1.66	
-100.0 0.31 1.76	
-90.0 0.00 1.8	
-80.0 -0.31 1.76	
-70.0 -0.60 1.66	
-60.0 -0.88 1.52	
-500 -109 13	
-40.0 -1.15 0.96	
-30.0 -1.08 0.62	
-20.0 -0.84 0.31	
-6.0 -0.34 0.0085	
-2 0 0.06 0.0071	
4 0 0 67 0 0097	
6.0 0.87 0.0116	
8.0 1.05 0.0134	

10.0	1.18	0.0155
12.0	1.27	0.0191
14.0	1.34	0.0371
16.0	1.33	0.0942
18.0	1.24	0.1806
20.0	1.03	0.2833
40.0	1.23	0.9430
50.0	1.18	1.2830
60.0	0.98	1.5090
70.0	0.70	1.6530
80.0	0.41	1.7550
90.0	0.12	1.8000
100.0	-0.31	1.76
110.0	-0.6	1.66
120.0	-0.88	1.52
130.0	-1.09	1.3
140.0	-1.15	0.96
150.0	-1.08	0.62
160.0	-0.84	0.31
170.0	-0.67	0.05
180.0	-0.26	0.02

art75-5.air

AR	T75-5.air		
FR 1	.OM Dayton Numb	Griiin, er of air	Aug20, '98 foil tables in this file
0	Tabl	e ID para	meter
	14.00)	Stall angle (deg)
0	No 1	onger use	d, enter zero
0	No]	.onger use	d, enter zero
0	No l	.onger use	d, enter zero
	-4.00)	zero lift angle
	6.308	3	Cn slope
	1.39		Cn at stall
	-1.1		Cn at negative stall
	0.01		Alpha for Cd min
	0.007	7	Cd min
	-180.0	-0.30	0.02
	-170.0	0.71	0.05
	-160.0	0.84	0.31
	-150.0	1.08	0.62
	-140.0	1.15	0.96
	-130.0	1.09	1.3
	-120.0	0.88	1.52
	-110.0	0.60	1.66
	-100.0	0.31	1.76
	-90.0	0.00	1.8
	-80.0	-0.31	1.76
	-70.0	-0.60	1.66
	-60.0	-0.88	1.52
	-50.0	-1.09	1.3
	-40.0	-1.13 _1 00	0.90
	-30.0	-1.00	0.02
	20.0	U.U.	0.JT

-10 0	-0 71	0 0116
-8 0	-0.51	0 0097
-6.0	-0.32	0.0097
-0.0	-0.52	0.0000
-4.0	-0.12	0.0079
-2.0	0.10	0.0071
0.0	0.30	0.0070
2.0	0.51	0.0076
4.0	0.71	0.0097
6.0	0.92	0.0116
8.0	1.10	0.0134
10.0	1.24	0.0155
12.0	1.33	0.0191
14.0	1.39	0.0371
16.0	1.38	0.0942
18.0	1.27	0.1806
20.0	1.01	0.2833
40.0	1.21	0.9430
50.0	1.16	1.2830
60.0	0.96	1.5090
70.0	0.68	1.6530
80.0	0.40	1.7550
90.0	0.10	1.8000
100.0	-0.31	1.76
110.0	-0.6	1.66
120.0	-0.88	1.52
130.0	-1.09	1.3
140.0	-1.15	0.96
150.0	-1.08	0.62
160 0	-0.84	0 31
170 0	-0.67	0 05
180 0	-0.30	0.02
T00.0	0.00	0.02

Art85.air

ART85	5.air		
FROM	Dayton G	riffin, Aug	g20, '98
1	Number	r of airfo:	il tables in this file
0	Table	ID paramet	ter
	14.00		Stall angle (deg)
0	No lor	nger used,	enter zero
0	No lor	nger used,	enter zero
0	No lor	nger used,	enter zero
	-6.00		zero lift angle
	6.308		Cn slope
	1.43		Cn at stall
	-1.1		Cn at negative stall
	0.01		Alpha for Cd min
	0.007		Cd min
-	-180.0	-0.33	0.02
-	-170.0	0.75	0.05
-	-160.0	0.84	0.31
-	-150.0	1.08	0.62
-	-140.0	1.15	0.96

-130.0 -120.0 -110.0 -90.0 -90.0 -80.0 -70.0 -60.0 -50.0 -40.0 -30.0 -20.0 -10.0 -8.0 -2.0 0.0 2.0 4.0 6.0 8.0 10.0 12.0 14.0 16.0 18.0 20.0 40.0 50.0 60.0 10.0 12.0 14.0 16.0 18.0 20.0 40.0 50.0 60.0 10.0 12.0 14.0 16.0 18.0 20.0 40.0 50.0 60.0 10.0 12.0 14.0 16.0 18.0 20.0 40.0 50.0 60.0 10.0 10.0 10.0 12.0 14.0 16.0 18.0 20.0 40.0 50.0 60.0 70.0 80.0 9	1.09 0.88 0.60 0.31 0.00 -0.31 -0.60 -0.88 -1.09 -1.15 -1.08 -0.75 -0.55 -0.30 -0.09 0.13 0.33 0.55 0.75 0.96 1.15 1.29 1.38 1.43 1.42 1.29 0.99 1.20 1.15 0.94 0.67 0.38 0.09	1.3 1.52 1.66 1.76 1.8 1.76 1.66 1.52 1.3 0.96 0.62 0.31 0.0116 0.0097 0.0071 0.0070 0.0071 0.0070 0.0071 0.0070 0.0071 0.0070 0.0071 0.0070 0.0071 0.0070 0.0071 0.0071 0.0071 0.0070 0.0071 0.0070 0.0071 0.0075 0.0097 0.0075 0.0075 0.0075 0.0071 0.0075 0.0071 0.0075 0.0071 0.0075 0
50.0 60.0 70.0 80.0 90.0 100.0 110.0 120.0 130.0 140.0 150.0 160.0 170.0	1.15 0.94 0.67 0.38 0.09 -0.31 -0.6 -0.88 -1.09 -1.15 -1.08 -0.84 -0.75	1.2830 1.5090 1.6530 1.7550 1.8000 1.76 1.66 1.52 1.3 0.96 0.62 0.31 0.05

art85-5.air

ART85	5-5.air	
FROM	Dayton Griffin, Au	g20, '98
1	Number of airfo	il tables in this file
0	Table ID parame	ter
	14.00	Stall angle (deg)
0	No longer used,	enter zero
0	No longer used,	enter zero

No lo -5.00 6.308 1.485	nger used,	enter zero zero lift angle Cn slope Cn at stall
-1.1 0.01 0.007		Cn at negative stall Alpha for Cd min Cd min
-180.0	-0.38	0.02
-170.0	0.70	0.05
-160.0	0.84	0.31
-130.0	1.08	0.82
-140.0	1.15	0.96
-130.0	1.09	1.3
-120.0	0.88	1.52
-110.0	0.60	1.66
-100.0	0.31	1.76
-90.0	0.00	1.8
-80.0 -70.0 -60.0	-0.31 -0.60 -0.88 -1.09	1.76 1.66 1.52
-40.0	-1.15	0.96
-30.0	-1.08	0.62
-20.0	-0.84	0.31
-10.0	-0.70	0.0116
-8.0	-0.49	0.0097
-6.0	-0.27	0.0085
-4.0	-0.05	0.0079
-2.0	0.17	0.0071
0.0	0.38	0.0070
2.0	0.60	0.0076
4.0 6.0 8.0	0.80 1.01 1.21 1.29	0.0097 0.0116 0.0134 0.0155
12.0	1.36	0.0191
14.0	1.49	0.0371
16.0	1.46	0.0942
18.0 20.0 40.0	1.31 0.94 1.18	0.1806 0.2833 0.9430 1.2830
60.0	0.92	1.5090
70.0	0.64	1.6530
80.0	0.35	1.7550
90.0 100.0 110.0	0.06 -0.31 -0.6	1.8000 1.76 1.66 1.52
130.0	-1.09	1.3
140.0	-1.15	0.96
150.0	-1.08	0.62
160.0	-0.84	0.31
170.0	-0.75	0.05
180.0	-0.38	0.02

art95.air

•••	• • • • • • • • • • • • •	•••••	••••••
יכד גד	mos sir		
AR ED	OM Davton (Criffin Nu	~20 109
1	OM Dayton (or of simfs	yzu, yo
T T		er of airio	ti tables in this life
0	14 00	e in parame	Ctall angle (deg)
\cap	14.00 No 1	ongon ugod	Stall angle (deg)
0	NO IO	onger used,	enter zero
0	NO 10	onger used,	enter zero
0	-4 00	onger useu,	zero lift angle
	6 308		Cn slope
	1 54		Cn at stall
	-1 1		Cn at negative stall
	0.01		Alpha for Cd min
	0.007		Cd min
	-180.0	-0.42	0.02
	-170.0	0.64	0.05
	-160.0	0.84	0.31
	-150.0	1.08	0.62
	-140.0	1.15	0.96
	-130.0	1.09	1.3
	-120.0	0.88	1.52
	-110.0	0.60	1.66
	-100.0	0.31	1.76
	-90.0	0.00	1.8
	-80.0	-0.31	1.76
	-70.0	-0.60	1.66
	-60.0	-0.88	1.52
	-50.0	-1.09	1.3
	-40.0	-1.15	0.96
	-30.0	-1.08	0.62
	-20.0	-0.84	0.31
	-10.0	-0.64	
	-6.0	-0.22	
	-0.0	-0.23	
	-4.0	-0.01	0.0063
	0 0	0.42	0.0065
	2 0	0 64	0 0077
	4.0	0.85	0.0098
	6.0	1.06	0.0116
	8.0	1.26	0.0135
	10.0	1.42	0.0163
	12.0	1.50	0.0197
	14.0	1.54	0.0452
	16.0	1.50	0.1095
	18.0	1.32	0.2003
	20.0	0.88	0.3047
	40.0	1.16	0.9566
	50.0	1.10	1.2966

60.0	0.89	1.5178
70.0	0.61	1.6586
80.0	0.32	1.7590
90.0	0.03	1.8000
100.0	-0.31	1.76
110.0	-0.6	1.66
120.0	-0.88	1.52
130.0	-1.09	1.3
140.0	-1.15	0.96
150.0	-1.08	0.62
160.0	-0.84	0.31
170.0	-0.64	0.05
180.0	-0.42	0.02

cp_lin.dat

.....

----- FAST LINEARIZATION CONTROL FILE ------_____ cp linearization input properties 19-10-11 ----- PERIODIC STEADY STATE SOLUTION ------_____ False CalcStdy - Calculate periodic steady state condition {True: operating points specified, False: linearize about initial conditions} (flag) TrimCase - Trim case {1: find nacelle yaw, 2: find 3 generator torque, 3: find collective blade pitch} (switch) [used only when CalcStdy=True and GenDOF=True] 0.0001 DispTol - Convergence tolerance for the 2-norm of displacements in the periodic steady state calculation (rad) [used only when CalcStdy=True] 0.00001 VelTol - Convergence tolerance for the 2-norm of velocities in the periodic steady state calculation (rad/s) [used only when CalcStdy=True] ----- MODEL LINEARIZATION -----24 NAzimStep - Number of equally-spaced azimuth steps in periodic linearized model (-) MdlOrder - Order of output linearized model {1: 1st 1 order A, B, Bd, C, D, Dd; 2: 2nd order M, C, K, F, Fd, VelC, DspC, D, Dd} (switch) ----- INPUTS AND DISTURBANCES -----1 NInputs - Number of control inputs [0 (none) or 1 to 4+NumBl] (-) 4 CntrlInpt - List of control inputs [1 to NInputs] {1: nacelle yaw angle, 2: nacelle yaw rate, 3: generator torque, 4: collective blade pitch, 5: individual pitch of blade 1, 6: individual pitch of blade 2, 7: individual pitch of blade 3 [unavailable for 2bladed turbines]} (-) [unused if NInputs=0]

1 NDisturbs - Number of wind disturbances [0 (none) or 1 to 7] (-) 1 Disturbnc - List of input wind disturbances [1 to NDisturbs] {1: horizontal hub-height wind speed, 2: horizontal wind direction, 3: vertical wind speed, 4: horizontal wind shear, 5: vertical power law wind shear, 6: linear vertical wind shear, 7: horizontal hub-height wind gust} (-) [unused if NDisturbs=0]

yaw_lin.dat

_____ ----- FAST LINEARIZATION CONTROL FILE ------_____ Yaw linearization input properties. Operating points specified (CalcStdy: False) ----- PERIODIC STEADY STATE SOLUTION ------_____ True CalcStdy - Calculate periodic steady state condition {False: linearize about initial conditions} (flag) 1 TrimCase - Trim case {1: find nacelle yaw, 2: find generator torque, 3: find collective blade pitch} (switch) [used only when CalcStdy=True and GenDOF=True] 0.0001 DispTol - Convergence tolerance for the 2-norm of displacements in the periodic steady state calculation (rad) [used only when CalcStdy=True] 0.0001 VelTol - Convergence tolerance for the 2-norm of velocities in the periodic steady state calculation (rad/s) [used only when CalcStdy=True] ----- MODEL LINEARIZATION -----24 NAzimStep - Number of equally-spaced azimuth steps in periodic linearized model (-) 1 MdlOrder - Order of output linearized model {1: 1st order A, B, Bd, C, D, Dd; 2: 2nd order M, C, K, F, Fd, VelC, DspC, D, Dd} (switch) ----- INPUTS AND DISTURBANCES -----_____ 1 - Number of control inputs [0 (none) or 1 to NInputs 4+NumBl] (-) 1 CntrlInpt - List of control inputs [1 to NInputs] {1: nacelle yaw angle, 2: nacelle yaw rate, 3: generator torque, 4: collective blade pitch, 5: individual pitch of blade 1, 6: individual pitch of blade 2, 7: individual pitch of blade 3 [unavailable for 2bladed turbines]} (-) [unused if NInputs=0] 2 NDisturbs - Number of wind disturbances [0 (none) or 1 to 7] (-) 1,2 Disturbnc - List of input wind disturbances [1 to NDisturbs] {1: horizontal hub-height wind speed, 2: horizontal wind direction, 3: vertical wind speed, 4: horizontal wind shear, 5: vertical power law wind shear, 6: linear vertical wind shear, 7: horizontal hub-height wind gust} (-) [unused if NDisturbs=0]