



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

Πτυχιακή Εργασία

ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ ΜΙΚΡΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Τηλέμαχος Λογγιζίδης

A.M.: HN07367

Επιβλέποντες:
Αναστάσιος Τσιάκαλος, Καθηγητής
Γεώργιος Χριστοφορίδης, Καθηγητής

(Υπογραφή)

.....

Τηλέμαχος Λογγιζίδης

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Τ.Ε., Τ.Ε.Ι. ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

© 2022 – All rights reserved

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι ανεμογεννήτριες μεγάλης κλίμακας έχουν εξεταστεί εκτενώς όπως προκύπτει από το σύνολο της βιβλιογραφίας για μία σειρά δεκαετιών, ενώ αντίστοιχα πολύ λίγες μελέτες έχουν διεξαχθεί για τις ανεμογεννήτριες μικρής κλίμακας και ειδικότερα, όταν πρόκειται για εφαρμογές κοντά στο επίπεδο του εδάφους όπου η ταχύτητα του ανέμου είναι της τάξης των λίγων μέτρων ανά δευτερόλεπτο.

Η παρούσα μελέτη, αποτελεί μία προσπάθεια ανάλυσης του σχεδιασμού και της ανάπτυξης μικρών ανεμογεννητριών αλλά και της μεγάλης σημασίας μελέτης και ελέγχου σύνδεσής τους με το δίκτυο ηλεκτροδότησης.

Λέξεις Κλειδιά: Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ανεμογεννήτριες, σύνδεση σε δίκτυο

ABSTRACT

Large-scale wind turbines have been extensively examined in the literature for a number of decades, while very few studies have been conducted on small-scale wind turbines and in particular, when it comes to applications near ground level where the wind speed is of the order of a few meters per second.

This study is an attempt to analyze the design and development of small wind turbines, but also the important study and control of their connection to the power grid.

Keywords: Renewable energy sources, wind turbines, grid connection

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας, οφείλω αρχικά ένα μεγάλο ευχαριστώ στον επιβλέποντα της εργασίας, τον κύριο Αναστάσιο Τσιάκαλο. Η εν λόγω εργασία μου έδωσε τη δυνατότητα να ψάξω και να ενημερωθώ επάνω σε έναν ιδιαίτερα σημαντικό τομέα της επιστήμης που σπούδασα, που δεν είναι άλλος από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Οι συγκεκριμένες αστείρευτες και φιλικές προς το περιβάλλον πηγές ενέργειας, αποτελούν ιδιαίτερα σημαντικό κομμάτι που έρχεται σήμερα να συμπληρώσει επαρκώς τις διάφορες άλλες ενεργειακές πηγές. Η αξιοπιστία των συγκεκριμένων πηγών, αλλά και η ολοένα και περισσότερο αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας, έκανε το συγκεκριμένο θέμα για εμένα ιδιαίτερα σημαντικό, ενώ η βοήθεια του κυρίου Τσιάκαλου ήταν καθοριστική από την ανάληψη του θέματος έως και την ολοκλήρωσή του.

Από αυτή τη σελίδα, δεν θα μπορούσα να παραλείψω κάθε συμφοιτητή μου και κάθε συμφοιτήτρια που περάσαμε μαζί όλα αυτά τα χρόνια στο Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας.

Τέλος, θέλω να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους ανθρώπους που με έφεραν στον κόσμο και είναι δίπλα μου έως και σήμερα, τους γονείς μου.



ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ABSTRACT

Κατάλογος Εικόνων

Κατάλογος Πινάκων

Κατάλογος Σχημάτων

	Εισαγωγή	1
1	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και αιολική ενέργεια	4
1.1	Γενικά στοιχεία για Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	4
1.2	Ιστορική εξέλιξη των ανεμογεννητριών	4
1.3	Τρέχουσα κατάσταση της αιολικής ενέργειας	8
1.4	Ταξινόμηση ανεμογεννητριών	11
1.4.1	Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα και ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα	11
1.4.2	Ανεμογεννήτριες τύπου μεταφοράς και τύπου ανύψωσης	19
1.4.3	Ανεμογεννήτριες μεγάλης κλίμακας και ανεμογεννήτριες μικρής κλίμακας	22
1.5	Βασικές τεχνολογίες για τις ανεμογεννήτριες	23
1.6	Ανάγκη και εφαρμογές ανεμογεννητριών μικρής κλίμακας (SSWT)	26
2	Παραγωγή και μετάδοση ενέργειας από ανεμογεννήτριες	28
2.1	Γενικά	28
2.2	Στοιχεία του συστήματος	29
2.3	Δίκτυο ανεφοδιασμού	30

2.4	Περίληψη της διαδικασίας διασύνδεσης	32
2.5	Μείωση της ρύπανσης από το θόρυβο	33
2.6	Διασύνδεση μικρών ανεμογεννητριών	35
2.7	Διαδικασία Περιφερειακού Διαχειριστή Μεταφοράς	36
2.8	Μελέτη Σκοπιμότητας	36
2.9	Μελέτη Επιπτώσεων Συστήματος	37
2.10	Μελέτη Εγκαταστάσεων	37
2.11	Προαιρετική Μελέτη	38
2.12	Συμφωνία Διασύνδεσης	38
3	Συστήματα Γεννήτριας για Ανεμογεννήτριες	40
3.1	Γενικά	40
3.2	Ανεμογεννήτριες Σταθερής Ταχύτητας	40
3.3	Ανεμογεννήτριες Μεταβλητής Ταχύτητας	41
3.4	Συστήματα Μετατροπών	42
4	Αλληλεπίδραση με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας	44
4.1	Γενικά	44
4.2	Επίπεδο ισχύος βραχυκυκλώματος	45
4.3	Διακυμάνσεις τάσης και τρεμόπαιγμα	46
4.4	Αρμονικές	47
4.5	Συχνότητα	48
5	Προσομοίωση μέσω του προγράμματος Power Factory	50
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	50
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	52

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1:	Αμερικανικοί ανεμόμυλοι (Western windmills): Διαφήμιση από την εταιρία U.S. Wind Engine & Pumping Co., κατασκευαστή των αμερικανικών ανεμόμυλων (Ironmanwindmill., 2020).	7
Εικόνα 1.2:	Αιολικό πάρκο που χρησιμοποιεί τους αμερικανικούς ανεμόμυλους για άντληση νερού (http://www.midamericawindmillmuseum.org/imgs/home/windmill_2.jpg .)	8
Εικόνα 1.3:	Ανεμογεννήτρια Οριζόντιου άξονα Siemens (μοντέλο: SWT-2.3-82 VS)	14
Εικόνα 2.1:	Εξαρτήματα της ανεμογεννήτριας και πλέγματος σύνδεσης	30
Εικόνα 2.2:	Γραμμές μεταφοράς με πρωτεύουσες και δευτερεύουσες γραμμές διανομής.	34
Εικόνα 4.1	Ισοδύναμο κάλυμα	41
Εικόνα 4.3	Παραμόρφωση από 3 ^η αρμονική	48

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1:	Σωρευτική προοπτική δυναμικότητας αιολικής ενέργειας από το 2008 έως το 2012 (GWEC, 2012; Gsänger & Pitteloud., 2012).	10
Πίνακας 1.2:	Οι σημαντικότερες διαφορές μεταξύ ανεμογεννητριών οριζόντιου και κάθετου άξονα (Erickson et. al., 2008)	18
Πίνακας 2.1:	Μεταδιδόμενη ισχύς και σύνδεση ανεμογεννητριών σε διαφορετικά επίπεδα ηλεκτρικού δικτύου	31
Πίνακας 4.1:	Σχεδιασμός «τρεμοπαίγματος» και επίπεδα εκπομπών για μέση τάση (MV) και υψηλή τάση (HV)	48

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1 :	Μερικοί από τους παλαιότερους ανεμόμυλους του κόσμου. (α) Ερείπια ανεμόμυλου κάθετου άξονα στο Αφγανιστάν, περ. 700 μ.Χ. (εικόνα τραβηγμένη το 1977). (β) Περσικός ανεμόμυλος. (γ) Κινεζικός ανεμόμυλος με πανιά που φτερουγίζουν, περ. 1000 μ.Χ. (δ) Ανεμόμυλοι κάθετου άξονα με πανιά Γαλλία 1719 μ.Χ. (ε) Ανεμόμυλοι κατακόρυφου άξονα με σώματα που κινούνται από δυνάμεις οπισθέλκουσας, Ιταλία, περ. 1600 μ.Χ. (στ) Μεσογειακός πύργος μύλος με πανιά. (Gash & Twele, 2012).	5
Σχήμα 1.2:	Συνολική εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας (MW) και ρυθμός ανάπτυξης της παγκόσμιας αγοράς αιολικής ενέργειας (%) 1996-2012. (GWECR, 2012)	9
Σχήμα 1.3:	Οι στατιστικές αιολικής ενέργειας και η αιολική δυναμικότητα της Ελλάδας. (HWEA, 2012)	10
Σχήμα 1.4:	Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα: (α) ρότορας Savonius, (β) ρότορας Darrieus με καμπύλη λεπίδα και (γ) ρότορας Darrieus ευθείας λεπίδας (Πηγή: https://elite.tugraz.at/Jungbauer/3.htm)	13
Σχήμα 1.5:	Τυπική διαμόρφωση μίας σύγχρονης ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα (Crossley et. al., 2012).	16
Σχήμα 1.6:	Σύρσιμο και ανύψωση των στοιχείων αεροδυναμικής	19
Σχήμα 1.7:	Απλοποιημένο μοντέλο για την ανεμογεννήτρια Savonius.	20
Σχήμα 1.8:	Βασικές ορολογίες που σχετίζονται με την αεροτομή	23
Σχήμα 3.1:	Αριθμός διαφορετικών τύπων ανεμογεννητριών στην αγορά της Γερμανίας το έτος 2000	40
Σχήμα 3.2:	Βασικά μέρη ανεμογεννήτριας σταθερής ταχύτητας	41
Σχήμα 3.3:	Βασικά μέρη ανεμογεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας	43
Σχήμα 5.1:	Η πτώση τάσεως στα φορτία του ζυγού BB 1-3.	50

Σχήμα 5.2: Η πτώση τάσης στα φορτία του ζυγού Β.Β. 1-3 είναι εντός των ορίων

51

Σχήμα 5.3:	Η ανύψωση τάσης στα φορτία του ζυγού B.B. 1-3	52
Σχήμα 5.4:	Η αλλαγή της διατομής του αγωγού λόγω πολύ μεγάλης ανύψωσης τάσης	53

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αιολική ενέργεια έχει πλέον καθιερωθεί σταθερά ως μια ώριμη τεχνολογία για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και πάνω από 13.900 MW είναι πλέον εγκατεστημένα σε παγκόσμια κλίμακα. Είναι μία από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και διαθέτει ενεργειακά σχέδια και στις πέντε ηπείρους, τόσο στον βιομηχανοποιημένο όσο και στον αναπτυσσόμενο κόσμο. Διαφέρει, ωστόσο, από πολλές απόψεις από τις «συμβατικές» θερμικές πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι βασικές διαφορές είναι τα μικρά μεγέθη των επιμέρους μονάδων, η μεταβλητή φύση του ανέμου και ο τύπος της ηλεκτρικής γεννήτριας.

Σε ότι αφορά στα μικρά μεγέθη μονάδων, τόσο τα αιολικά πάρκα όσο και οι μεμονωμένες ανεμογεννήτριες (WT) συνδέονται συνήθως σε δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης αντί στα συστήματα μετάδοσης υψηλής τάσης και αυτό σημαίνει ότι ορισμένα ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν στις περιπτώσεις αυτές σχετίζονται με τις ροές ισχύος και τα συστήματα προστασίας. Άλλωστε, η ηλεκτρική ασφάλεια αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό ζήτημα το οποίο πρέπει πάντοτε να εξετάζεται.

Η μεταβλητή φύση του ανέμου συχνά γίνεται αντιληπτή ως δυσκολία, αλλά στην πραγματικότητα δημιουργεί λίγα προβλήματα. Οι διακυμάνσεις στην παραγωγή δεν προκαλούν καμία δυσκολία στη λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς συνήθως δεν είναι ανιχνεύσιμες πάνω από τις κανονικές διακυμάνσεις της προσφοράς και της ζήτησης. Με σημαντικές ποσότητες αιολικής ενέργειας - περίπου 30 % ή περισσότερο της ζήτησης - μπορούν να βρεθούν λύσεις χαμηλού κόστους και ορισμένα νησιωτικά συστήματα λειτουργούν με υψηλά ποσοστά αιολικής ενέργειας. Η μεταβλητότητα πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη σε τοπικό επίπεδο, για να διασφαλιστεί ότι οι καταναλωτές δεν επηρεάζονται από το «τρεμόπαιγμα». Η κατάλληλη φροντίδα στον ηλεκτρικό σχεδιασμό, ωστόσο, μπορεί να εξαλείψει αυτό το πρόβλημα.

Σε ότι αφορά τις ηλεκτρικές ιδιότητες, πρόμη WT ακολουθούσε την πρακτική του ατμοστρόβιλου με σύγχρονες γεννήτριες, αλλά πολλά σύγχρονα WT έχουν γεννήτριες επαγωγής. Αυτά αντλούν άεργο ισχύ από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, απαιτώντας προσεκτική σκέψη για τις ροές ηλεκτρικής ενέργειας. Άλλα μηχανήματα, ωστόσο, είναι ικανά να ρυθμίζουν την ηλεκτρική έξοδο και να παρέχουν έναν ελεγχόμενο συντελεστή

ισχύος. Αυτό είναι ένα πλεονέκτημα, ειδικά στις αγροτικές περιοχές, όπου μπορεί να είναι ανεπιθύμητη η άντληση άεργου ισχύος από το δίκτυο.

Οι ανάγκες για ενέργεια, έχουν οδηγήσει μοιραία στην περεταίρω ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ως πιο προσιτές και αξιόπιστες πηγές ηλεκτρισμού. Είναι αλήθεια ότι τα μικρά αιολικά ηλεκτρικά συστήματα μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στις ενεργειακές ανάγκες κάθε χώρας. Βέβαια, είναι ιδιαίτερα σημαντικό το γεγονός ότι οι ανεμογεννήτριες είναι αρκετά μεγάλες ώστε να παρέχουν ένα σημαντικό μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας που χρειάζεται ένα μέσο σπίτι, αλλά από την άλλη το μέγεθος τους, επιβάλλει ιδιοκτησία χώρου στον οποίο πρέπει να εγκατασταθούν για να μπορέσουν να λειτουργήσουν και να παράγουν ενέργεια (EERE, 2007).

Ένα μικρό αιολικό σύστημα μπορεί να λειτουργήσει εάν:

- Υπάρχει αρκετός αέρας στην περιοχή
- Επιτρέπεται η εγκατάσταση ψηλών πύργων στην περιοχή
- Υπάρχει αρκετός χώρος για την εγκατάσταση
- Μπορεί να καθοριστεί η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας η οποία χρειάζεται

Τα μικρά συστήματα αιολικής ενέργειας που χρησιμοποιούνται για την ηλεκτροδότηση σπιτιών, έχει αποδειχτεί ότι μπορούν να μειώσουν το κόστος ενέργειας από 50 έως 90% και να βοηθήσουν στο να αποφευχθεί το υψηλό κόστος επέκτασης των γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας σε απομακρυσμένες τοποθεσίες. Επίσης, είναι ιδιαίτερα σημαντικά, καθώς αφενός με τη χρήση τους αποτρέπονται οι διακοπές ρεύματος, ενώ αφετέρου δεν ρυπαίνεται το περιβάλλον (EERE, 2007).

Οι ανεμογεννήτριες λειτουργούν με βάση τον άνεμο. Ο άνεμος δημιουργείται από την άνιση θέρμανση της επιφάνειας της γης από τον ήλιο. Οι ανεμογεννήτριες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική, η οποία οδηγεί στη λειτουργία γεννήτριας που παράγει καθαρό ηλεκτρισμό. Οι σημερινοί στρόβιλοι αποτελούν ευέλικτες αρθρωτές πηγές ηλεκτρικής ενέργειας. Οι λεπίδες τους είναι αεροδυναμικά σχεδιασμένες ώστε να μπορούν να συλλαμβάνουν τη μέγιστη δυνατή ενέργεια από τον άνεμο. Ο άνεμος γυρίζει τα πτερύγια, τα οποία περιστρέφουν έναν άξονα συνδεδεμένο με γεννήτρια, η οποία παράγει ηλεκτρισμό.

Τα μικρά συστήματα αιολικής ενέργειας μπορούν να συνδεθούν με το σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και ονομάζονται συστήματα συνδεδεμένα με το δίκτυο. Μια ανεμογεννήτρια συνδεδεμένη στο δίκτυο μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται από τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας για φωτισμό, συσκευές και

ηλεκτρική θερμότητα. Εάν ο στρόβιλος δεν μπορεί να αποδώσει την ποσότητα ενέργειας που χρειάζεται μία κατοικία ή μία επιχείρηση, τότε η διαφορά ενέργειας μπορεί να προκύψει από το σύστημα ηλεκτροδότησης (EERE, 2007).

Η πρόοδος στην τεχνολογία των ανεμογεννητριών και τα αποτελέσματα σχεδόν δύο δεκαετιών έρευνας σημαίνουν ότι η ενσωμάτωση των WT και των αιολικών πάρκων στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας γενικά δημιουργεί λίγα προβλήματα. Τα χαρακτηριστικά του δικτύου και των στροβίλων πρέπει ωστόσο να αξιολογηθούν, αλλά σήμερα υπάρχει μεγάλη εμπειρία η οποία πλέον μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Το γεγονός ότι χώρες όπως η Δανία, σχεδιάζουν να καλύψουν το 30% των αναγκών τους σε ηλεκτρική ενέργεια από αιολική ενέργεια είναι ίσως η μεγαλύτερη απόδειξη ότι οι δυνατότητες είναι πλέον ιδιαίτερα σημαντικές (EEDD, 2001).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

1.1 Γενικά στοιχεία για τις Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας αποτελούν πηγές ενέργειας οι οποίες προέρχονται από φυσικές μεθόδους. Τέτοιες πηγές είναι η ηλιακή ακτινοβολία, ο άνεμος, η γεωθερμία, πλήθος οργανικών υλών, αλλά και ένα σύνολο άλλων πηγών, οι οποίες ανανεώνονται συνεχώς με ρυθμό πιο γρήγορο σε σχέση με τον αντίστοιχο ρυθμό με τον οποίο καταναλώνονται (IEA, 2020).

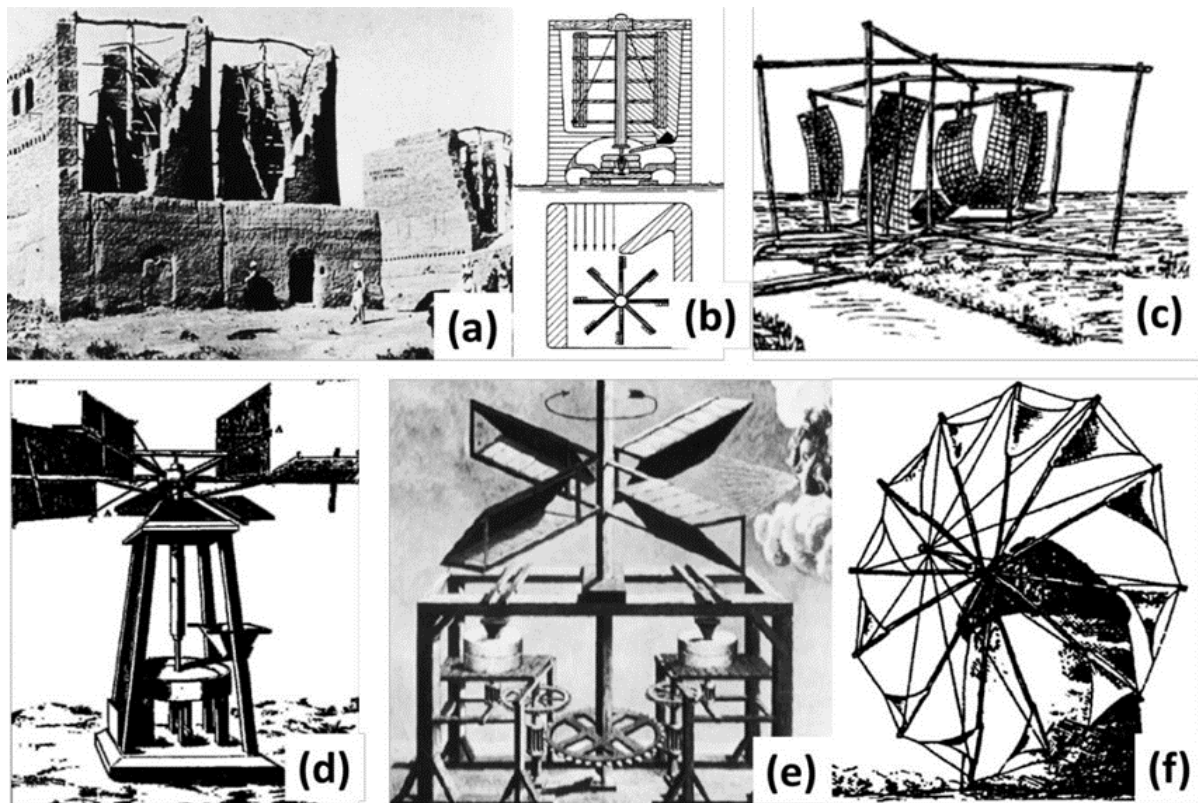
Οι ανάγκες της παγκόσμιας κοινότητας σε ενέργεια, φαίνεται ότι χρόνο με το χρόνο αυξάνονται ολοένα και περισσότερο. Στην αύξηση της ζήτησης της ενέργειας έχει συμβάλει ένα σύνολο καταστάσεων, ανάμεσα στις οποίες μπορεί να αναφερθεί η συνεχόμενη αύξηση του πληθυσμού της γης, η περιβαλλοντική ρύπανση, η αύξηση της θερμοκρασίας της γης, το φαινόμενο του θερμοκηπίου κ.α. Οι ανανεώσιμες πηγές, ενέργειας, αποτελούν ενεργειακές πηγές ιδιαίτερης αξίας, καθώς είναι περισσότερο φιλικές για το περιβάλλον σε σχέση με τις υπόλοιπες ενεργειακές πηγές. Βέβαια, δεν μπορεί να πει κανείς πως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν έχουν απολύτως καμία περιβαλλοντική επίπτωση.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, είναι το γεγονός ότι πρόκειται για ανεξάντλητες πηγές οι οποίες συναντώνται οπουδήποτε στη γη, με αποτέλεσμα να μπορούν να καλύψουν ενεργειακές ανάγκες οπουδήποτε, ανακουφίζοντας τα διάφορα συστήματα υποδομών και μειώνοντας τις απώλειες μεταφοράς.

1.2 Ιστορική Εξέλιξη των ανεμογεννητριών

Η αιολική ενέργεια είναι μια από τις πιο άφθονες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στη γη η οποία φαίνεται πως έχει χρησιμοποιηθεί εδώ και αιώνες. Σύμφωνα με ιστορικά στοιχεία, φαίνεται ότι τα ανθρώπινα όντα χρησιμοποιούν την αιολική ενέργεια στην καθημερινή τους εργασία για περίπου 4.000 χρόνια (WWEA, 2011). Ήδη από το 1.700 π.Χ., ο βασιλιάς Χαμουραμί της Βαβυλώνας χρησιμοποίησε σέσουλα με αιολική ενέργεια για να ποτίσει τις πεδιάδες της Μεσοποταμίας (Gash & Twele, 2012). Ο άνεμος χρησιμοποιήθηκε επίσης για το άλεσμα των σιτηρών και αυτός είναι ο λόγος που εξακολουθούμε να μιλάμε για

«ανεμόμυλους», παρόλο που σήμερα δεν χρησιμοποιούνται σχεδόν καθόλου για την άλεση σιτηρών (WWEA, 2011). Το Σχήμα 1.1 δείχνει μερικούς από τους πρωτόγονους ανεμόμυλους που χρησιμοποιήθηκαν από τους πρώιμους ανθρώπινους πολιτισμούς (Gash & Twele, 2012).



Σχήμα 1.1: Μερικοί από τους παλαιότερους ανεμόμυλους του κόσμου. (α) Ερείπια ανεμόμυλου κάθετου άξονα στο Αφγανιστάν, περ. 700 μ.Χ. (εικόνα τραβηγμένη το 1977). (β) Περσικός ανεμόμυλος. (γ) Κινεζικός ανεμόμυλος με πανιά που φτερουγίζουν, περ. 1000 μ.Χ. (δ) Ανεμόμυλοι κάθετου άξονα με πανιά Γαλλία 1719 μ.Χ. (ε) Ανεμόμυλοι κατακόρυφου άξονα με σώματα που κινούνται από δυνάμεις οπισθέλκουσας, Ιταλία, περ. 1600 μ.Χ. (στ) Μεσογειακός πύργος μύλος με πανιά. (Gash & Twele, 2012).

Μπορεί να σημειωθεί ότι οι περισσότεροι από τους παλαιότερους ανεμόμυλους του κόσμου είχαν κάθετο άξονα περιστροφής. Όπως προκύπτει από τα αρχικά σχέδια των ανεμόμυλων, αυτά ήταν πολύ απλά, ειδικά από κατασκευαστική άποψη. Διάφορα πλεκτά ψάθες ή πανιά χρησιμοποιήθηκαν για να δημιουργήσουν έλξη και έτσι να περιστρέψουν τους ανεμόμυλους γύρω από τον κεντρικό άξονα. Οι ανεμόμυλοι κάθετου άξονα είχαν ένα άλλο λειτουργικό πλεονέκτημα ότι ήταν ανεξάρτητοι από την κατεύθυνση του ανέμου. Στα σχήματα 1.1(d) και 1.1(e) φαίνονται μερικές μεταγενέστερες εκδόσεις μύλων κάθετου άξονα που αναπτύχθηκαν

στη Γαλλία και την Ιταλία, αντίστοιχα. Στο Σχήμα 1.1(d), η μυλόπετρα συνδέεται απευθείας στον κατακόρυφο κινητήριο άξονα χωρίς ενδιάμεσο γρανάζι ή άλλο μηχανισμό για να ανακατευθύνει την περιστροφική κίνηση. Το σχήμα 1.1(e) δείχνει έναν από τους προηγμένους ανεμόμυλους που δημιούργησε ο Fausto Veranzio στην Ιταλία (Gash & Twele, 2012). Μπορεί να φανεί ότι αυτός ο ανεμόμυλος είναι κατασκευασμένος με λεπίδες ρότορα σε σχήμα κυπέλλου που βελτιώνει την απόδοση της συσκευής. Ο Veranzio ανέπτυξε επίσης έναν μηχανισμό μετάδοσης κίνησης για τους ανεμόμυλούς του, που επιτρέπει στις μυλόπετρες να τρέχουν με πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα, παρόλο που οι ρότορες σχεδιάστηκαν για χαμηλό λόγο ταχύτητας κορυφής (Gash & Twele, 2012).

Οι ανεμόμυλοι οριζόντιου άξονα είναι μια σχετικά νεότερη εφεύρεση από τους ανεμόμυλους κάθετου άξονα. Αν και η πρώτη τεκμηρίωση των ανεμόμυλων οριζόντιου άξονα χρονολογείται από τον 12ο αιώνα, οι θεωρητικές περιγραφές σχετικά με την κινητήρια δύναμη των διατάξεων οριζόντιου άξονα, δηλαδή τις δυνάμεις ανύψωσης στα πτερύγια, διερευνήθηκαν μόνο στις αρχές του 20ού αιώνα (Gash & Twele, 2012).

Μία από τις πιο δημοφιλείς ανεμογεννήτριες πρώιμου οριζόντιου άξονα ήταν οι πύργοι μύλοι, που φαίνονται στο Σχήμα 1.1(f), οι οποίοι υπήρχαν στη νότια Ευρώπη. Οι πρώτες γραπτές μαρτυρίες τέτοιων ανεμόμυλων χρονολογούνται από τον 13ο αιώνα (Gash & Twele, 2012).

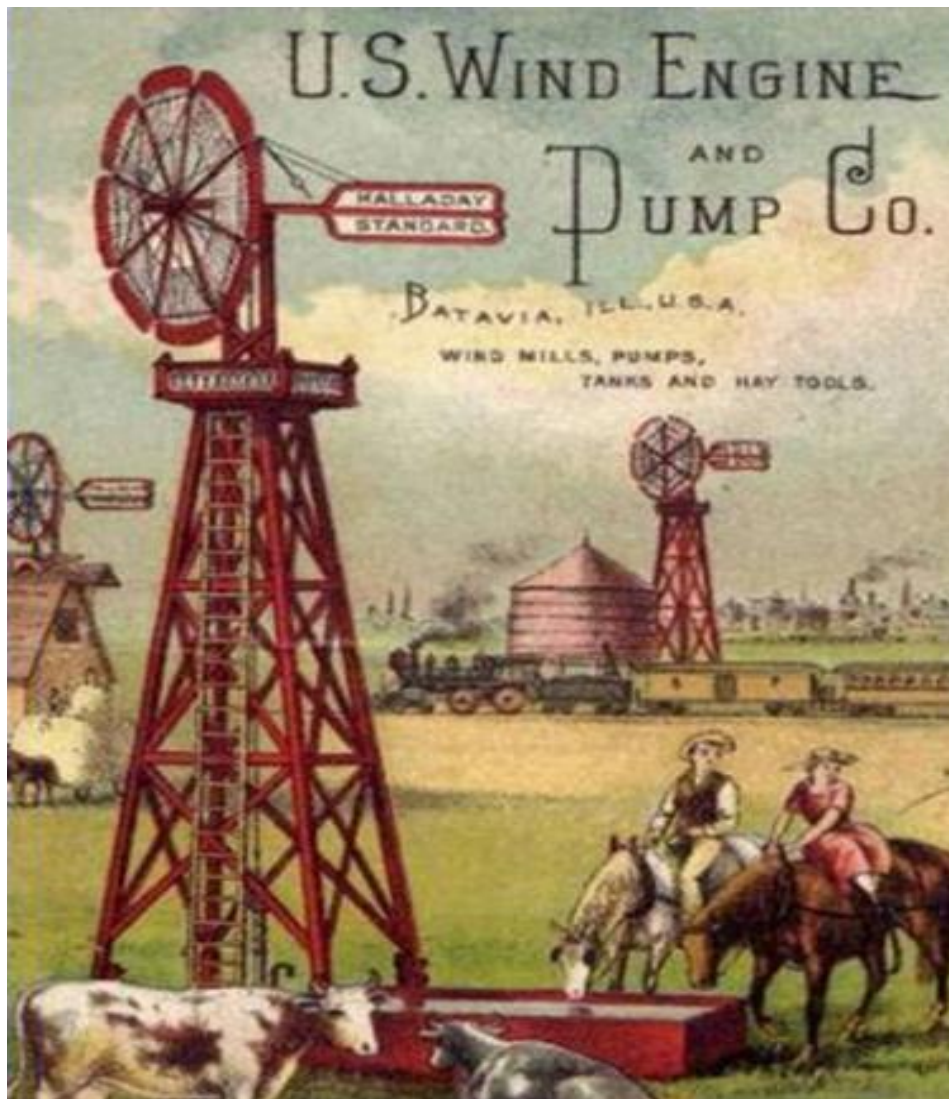
Υπήρχαν μερικοί άλλοι τύποι ανεμόμυλων οριζόντιου άξονα που υπήρχαν σε διάφορα μέρη του κόσμου (κυρίως στη Δύση) κατά τη διάρκεια διαφορετικών χρονικών περιόδων: Post windmill (1100), Wipmolen Dutch (1400s), Dutch Smock Mill (1500), Paltrock mill. (1600) και Gallery Smock Mill (δεκαετία 1700) (Gash & Twele, 2012).

Ωστόσο, καμία από τις ιστορικές ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα δεν κέρδισε τόση δημοτικότητα όσο ο αμερικανικός ανεμόμυλος φάρμας (μερικές φορές αποκαλούμενος και Δυτικός μύλος). Αυτοί οι ανεμόμυλοι αναπτύχθηκαν στα μέσα του 19ου αιώνα κυρίως για να παρέχουν πόσιμο νερό σε ανθρώπους και βοοειδή στη Βόρεια Αμερική. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε για τη διασφάλιση της παροχής νερού για τις ατμομηχανές των νέων σιδηροδρόμων που επεκτείνονται στη Δύση (Gash & Twele, 2012).

Η εικόνα 1.1, απεικονίζει μια πρώιμη διαφήμιση για τους αμερικανικούς ανεμόμυλους από την U.S. Wind Engine & Pumping Co., την εταιρεία που ανέπτυξε αυτόν τον ανεμόμυλο (Ironmanwindmill., 2020).

Το πιο σημαντικό συστατικό αυτού του ανεμόμυλου είναι ο ρότορας, ο οποίος ονομάζεται επίσης «ροζέτα του ρότορα» λόγω του δομικού σχεδιασμού του. Η διάμετρός του κυμαίνεται μεταξύ 3m και 5m και έχει περισσότερες από 20 λεπίδες από μεταλλικό φύλλο. Αποτελείται επίσης από μια ουρά που επιτρέπει στον ρότορα να περιστρέφεται αυτόματα έτσι ώστε να βλέπει πάντα τον προσπίπτοντα άνεμο. Χρησιμοποιεί έναν στροφαλοφόρο άξονα για την κίνηση μιας αντλίας εμβόλου. Οι αμερικανικοί μύλοι εξακολουθούν να υπάρχουν, ενώ αρκετοί από αυτούς έχουν εγκατασταθεί με σχεδόν αμετάβλητο σχεδιασμό στην Αυστραλία, την Αργεντινή και τις ΗΠΑ (Ironmanwindmill., 2020).

Στην εικόνα 1.2, απεικονίζεται ένα από αυτά τα αιολικά πάρκα που χρησιμοποιεί τους αμερικανικούς μύλους για άντληση νερού.



Εικόνα 1.1: Αμερικανικοί ανεμόμυλοι (Western windmills): Διαφήμιση από την εταιρία U.S. Wind Engine & Pumping Co., κατασκευαστή των αμερικανικών ανεμόμυλων (Ironmanwindmill., 2020).

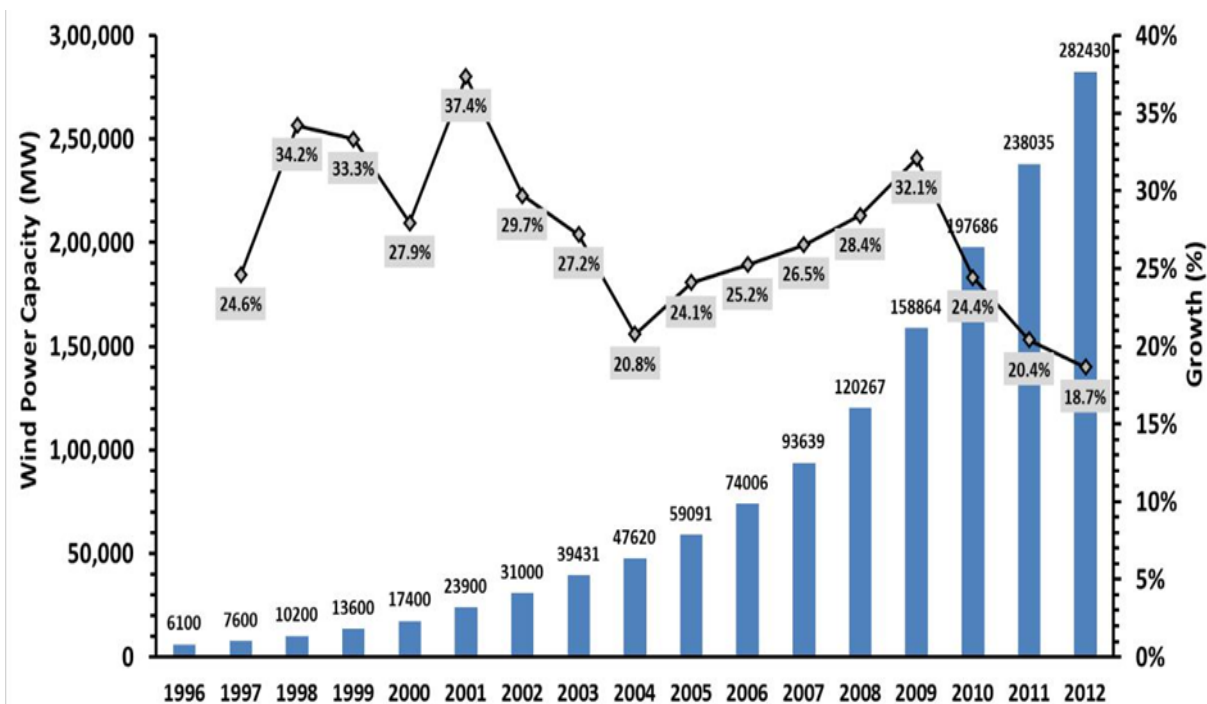


Εικόνα 1.2: Αιολικό πάρκο που χρησιμοποιεί τους αμερικανικούς ανεμόμυλους για άντληση νερού (http://www.midamericawindmillmuseum.org/imgs/home/windmill_2.jpg.)

1.3. Τρέχουσα κατάσταση της αιολικής ενέργειας

Η τέταρτη έκδοση του Global Wind Energy Outlook που κυκλοφόρησε στις 14 Νοεμβρίου 2012 στο Πεκίνο από την Greenpeace International και το Παγκόσμιο Συμβούλιο Αιολικής Ενέργειας αναφέρει ότι η αιολική ενέργεια μοιράζεται επί του παρόντος περίπου το 3,5% της παγκόσμιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και αναμένεται ότι το μερίδιο μπορεί να φτάσει έως 12% έως το 2020 (GWEC, 2012). Το Σχήμα 1.2 δείχνει την παγκόσμια αθροιστική εγκατεστημένη δυναμικότητα αιολικής ενέργειας τα τελευταία 17 χρόνια (GWEC, 2012).

Στο τέλος του έτους 2012, η παγκόσμια συνολική χωρητικότητα αιολικής ενέργειας ήταν 282 γιγαβάτ (GW), παρουσιάζοντας αύξηση περίπου 18,7 % (44 GW) σε σχέση με το προηγούμενο έτος. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι παρόλο που το έτος 2012 σημείωσε νέο ρεκόρ στη συνολική εγκατεστημένη ισχύ αιολικής ενέργειας, η αγορά αιολικής ενέργειας έχει κρυσώσει σε σχετικούς όρους. Αν δούμε τον ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης, συνέχισε να αυξάνεται από το 2004, φτάνοντας στο 32,1 % το 2009. Ωστόσο, έκτοτε η ανάπτυξη μειώθηκε σημαντικά. Το 2012, η παγκόσμια ανάπτυξη μειώθηκε στο 18,7%, που είναι το χαμηλότερο ποσοστό των τελευταίων δύο δεκαετιών, σύμφωνα με έκθεση της Παγκόσμιας Ένωσης Αιολικής Ενέργειας (WWEA) (Gsänger & Pitteloud., 2012).



Σχήμα 1.2: Συνολική εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας (MW) και ρυθμός ανάπτυξης της παγκόσμιας αγοράς αιολικής ενέργειας (%) 1996-2012. (GWECR, 2012)

Ο Πίνακας 1.1 παρουσιάζει τη σωρευτική ικανότητα αιολικής ενέργειας από το έτος 2008 έως το 2012 στις 10 κορυφαίες χώρες και την ίδια μεταβλητή παγκοσμίως (GWEC, 2012; Gsänger & Pitteloud., 2012). Τα δεδομένα δείχνουν ότι παρόλο που η παγκόσμια αιολική δυναμικότητα παρουσίασε το χαμηλό ρυθμό ανάπτυξης (18,7 %) το έτος 2012, αυξήθηκε πάνω από 133,5% κατά την τελευταία πενταετία. Είναι επίσης πολύ ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι το 73,7% της συνολικής ισχύος (282.430 MW) το 2012 συγκεντρώθηκε από μόλις 5 χώρες, ενώ ανάμεσα σε αυτές ήταν η Κίνα, οι ΗΠΑ, η Γερμανία, η Ισπανία και η Ινδία.

Η δυναμικότητα αιολικής ενέργειας της Κίνας συνέχισε να αυξάνεται με ρυθμό άνω του 21% το 2012. Οι Ηνωμένες Πολιτείες κέρδισαν επίσης τη δυναμική και παρουσίασαν ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης 27,9% το 2012, που είναι ο υψηλότερος ρυθμός ανάπτυξης τα τελευταία τρία συνεχόμενα χρόνια. Η εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας στις ΗΠΑ έφτασε τα 60.007MW μέχρι το τέλος του 2012. Το 2012, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από την αιολική ενέργεια στις Ηνωμένες Πολιτείες ανήλθε συνολικά σε περίπου 140 τεραβατώρες, που αντιστοιχεί περίπου στο 3,5 % της καθαρής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από όλες τις πηγές ενέργειας (Gsänger & Pitteloud., 2012).

Το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ έχει ξεκινήσει «το πρόγραμμα αιολικής και υδάτινης ενέργειας» για να επιταχύνει την ανάπτυξη πηγών αιολικής ενέργειας. Η κυβέρνηση των ΗΠΑ έχει εκδώσει πολλά φορολογικά κίνητρα για να τονώσει τη δημόσια αποδοχή της

αιολικής ενέργειας. Σύμφωνα με μια έκθεση του Προγράμματος Αιολικής και Υδατικής Ενέργειας του Υπουργείου Ενέργειας των ΗΠΑ που δημοσιεύθηκε τον Μάιο του 2011, η ομοσπονδιακή κυβέρνηση επιτρέπει στους ιδιοκτήτες των εγκεκριμένων εγκαταστάσεων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας να λαμβάνουν πιστώσεις φόρου 2,2 λεπτών για κάθε κιλοβατώρα (kWh) ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από την εγκατάσταση σε περίοδο δέκα ετών (WWPP, 2011).

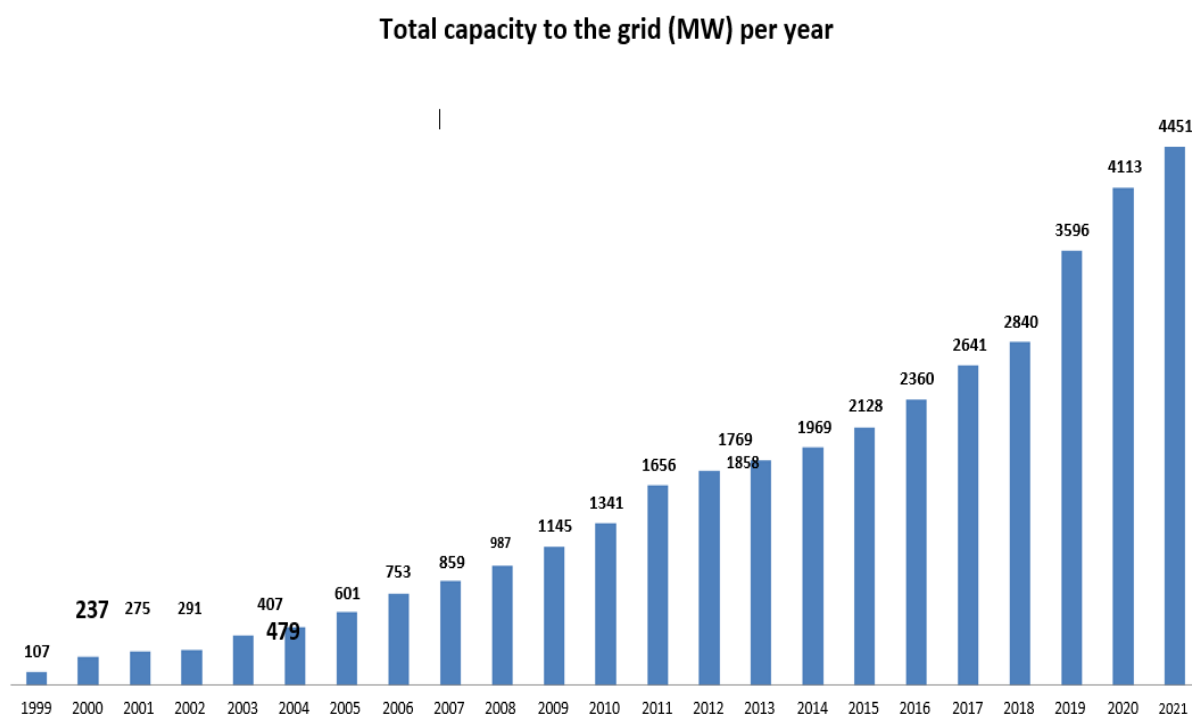
Έχουν δοθεί πολλά κίνητρα για την προώθηση της ανάπτυξης μικρής κλίμακας παραγωγής αιολικής ενέργειας. Οι ιδιοκτήτες μικρών ανεμογεννητριών (100 kW ή λιγότερο) δικαιούνται να λάβουν εκπτώσεις φόρου ύψους 30% της αξίας της εγκατάστασης (WWPP, 2011). Επιπλέον, η DOE προσφέρει εγγυήσεις δανείων για να βοηθήσει τις εταιρείες αιολικής ενέργειας να αναπτύξουν καινοτόμες τεχνολογίες καθαρής ενέργειας που μειώνουν, αποφεύγουν ή δεσμεύουν το διοξείδιο του άνθρακα και άλλες εκπομπές. Το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ προβλέπει την παροχή 20% της ηλεκτρικής ενέργειας των ΗΠΑ από αιολική ενέργεια έως το 2030 (Gsänger & Pitteloud., 2012).

Πίνακας 1.1: Σωρευτική προοπτική δυναμικότητας αιολικής ενέργειας από το 2008 έως το 2012 (GWEC, 2012; Gsänger & Pitteloud., 2012).

Χώρα	Συνολική Παραγωγή (Megawatt)					Ρυθμός Ανάπτυξης
	2008	2009	2010	2011	2012	2012
Κίνα	12210	25810	44733	62364	75564	21.2%
ΗΠΑ	25237	35159	40180	46919	60007	27.9%
Γερμανία	23897	25777	27215	29075	31332	7.8%
Ισπανία	16689	19149	20676	21673	22796	5.2%
Ινδία	9587	11807	13065	15880	18421	16.0%
Ηνωμένο Βασίλειο	3195	4092	5203	6018	8445	40.3%
Ιταλία	3736	4850	5797	6737	8144	20.9%

Γαλλία	3404	4574	5660	6640	7196	8.4%
Καναδάς	2369	3319	4008	5265	6200	17.8%
Πορτογαλία	2862	3357	3702	4093	4525	10.6%
Παγκόσμια	120986	159837	197040	238035	282482	18.7%

Παρακάτω παρουσιάζονται οι στατιστικές αιολικής ενέργειας και η αιολική δυναμικότητα της Ελλάδος έως το 2021.



Σχήμα 1.3: Οι στατιστικές αιολικής ενέργειας και η αιολική δυναμικότητα της Ελλάδας. (HWEA, 2012)

1.4. Ταξινόμηση ανεμογεννητριών

Υπάρχουν γενικά τρεις τρόποι ταξινόμησης των ανεμογεννητριών:

- Με βάση τον προσανατολισμό του άξονα περιστροφής (κάθετος ή οριζόντιος),
- Με βάση τη συνιστώσα των αεροδυναμικών δυνάμεων (ανύψωση ή οπισθέλκουσα) που τροφοδοτεί την ανεμογεννήτρια και

-
- Με βάση την ικανότητα παραγωγής ενέργειας (μικρό, μεσαίο ή μεγάλο).

1.4.1. Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα και ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα

Υπάρχουν ουσιαστικά δύο είδη ανεμογεννητριών, όταν κατηγοριοποιούνται με βάση τον προσανατολισμό τους στον άξονα περιστροφής: Ανεμογεννήτριες Κατακόρυφου Άξονα (Vertical Axis Wind Turbines -VAWTs) και Ανεμογεννήτριες Οριζόντιου Άξονα (Horizontal Axis Wind Turbines - HAWTs). Όπως υποδηλώνει το όνομα, ο ρότορας των κατακόρυφων ανεμογεννητριών περιστρέφεται κάθετα προς το έδαφος ενώ αυτός των οριζόντιων περιστρέφεται παράλληλα με το έδαφος.

Είναι αλήθεια πως οι περισσότερες από τις πρώιμες ανεμογεννήτριες ήταν κατακόρυφου άξονα επειδή ήταν σχετικά απλές στην κατασκευή τους και επίσης δεν απαιτούσαν κανένα μηχανισμό για να προσανατολιστούν προς την κατεύθυνση του ανέμου. Παρά αυτά τα χαρακτηριστικά, κανένα από τα παλιά σχέδια των κατακόρυφων ανεμογεννητριών δεν επιβίωσε για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Επί του παρόντος, υπάρχουν τρία πιο δημοφιλή σχέδια κατακόρυφων ανεμογεννητριών:

- (α) Κατακόρυφη ανεμογεννήτρια Savonius
- (β) Κατακόρυφη ανεμογεννήτρια Darrieus με καμπύλη λεπίδα και
- (γ) Κατακόρυφη ανεμογεννήτρια με ευθεία λεπίδα (Islam et. al., 2008)

Το σχήμα 1.3 παρουσιάζει τους ρότορες Savonius, Darrieus με καμπύλη λεπίδα και Darrieus με ευθεία λεπίδα, αντίστοιχα. Οι τουρμπίνες Savonius είναι τύπου έλξης ενώ οι τουρμπίνες Darrieus είναι ανυψωτικού τύπου. Οι ρότορες Savonius έχουν συνήθως δύο κύπελλα ή μισά τύμπανα προσαρτημένα σε έναν κεντρικό άξονα σε αντίθετες κατευθύνσεις, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.3(α). Το τύμπανο, που είναι ενάντια στη ροή του ανέμου, πιάνει τον άνεμο και δημιουργεί μια στιγμή κατά μήκος του άξονα. Η αεροδυναμική ροπή από το πρώτο τύμπανο περιστρέφει τον ρότορα και φέρνει το αντίθετο τύμπανο ενάντια στη ροή του ανέμου. Το δεύτερο τύμπανο πιάνει τώρα τον άνεμο και κάνει τον ρότορα να περιστραφεί ακόμη περισσότερο και έτσι ολοκληρώνει μια πλήρης περιστροφή. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου υπάρχει αρκετός άνεμος για να περιστρέψει τον άξονα που συνήθως συνδέεται με μια αντλία ή μια γεννήτρια (Islam et. al., 2008).

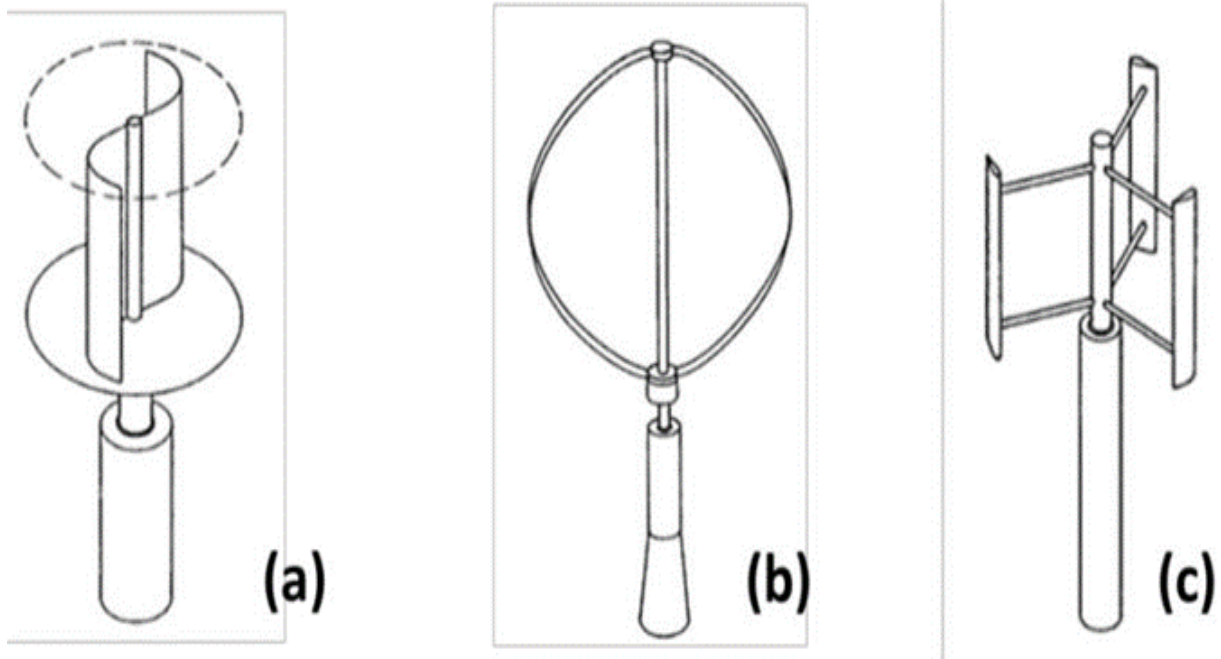
Οι τουρμπίνες Savonius έχουν γενικά χαμηλή απόδοση (λιγότερο από 25%) και γι' αυτό δεν είναι τόσο εμπορικά επιτυχημένοι, αλλά υπάρχουν μερικά πλεονεκτήματα όπως η απλή τους κατασκευή με σχετικά χαμηλό κόστος, η υψηλή στατική και δυναμική ροπή, η αποδοχή ανέμου από οποιαδήποτε κατεύθυνση, ο χαμηλός θόρυβος και η γωνιακή ταχύτητα λειτουργίας και τέλος, η μειωμένη φθορά σε κινούμενα μέρη που δικαιολογεί τη λειτουργία τους για εφαρμογές χαμηλής ισχύος (Akwa et. al., 2012).

Οι ανεμογεννήτριες τύπου Darrieus αποτελούνται από δύο ή περισσότερες λεπίδες που είναι προσαρτημένες σε έναν κατακόρυφο κεντρικό άξονα. Αυτές οι λεπίδες μπορούν να είναι καμπύλες (όπως φαίνεται στο Σχ. 1.3(β)) ή μπορεί να είναι ίσιες (όπως φαίνεται στην Εικ. 1.3(γ)). Ανεξάρτητα από την καμπυλότητα, τα πτερύγια έχουν πάντα προφίλ αεροτομής που δημιουργεί αεροδυναμική ανύψωση, όταν εκτίθενται στον προσπίπτοντα άνεμο. Αυτό το φαινόμενο δημιουργεί ροπή κατά μήκος του άξονα και προκαλεί την περιστροφή του κεντρικού άξονα, ο οποίος τελικά οδηγεί τη γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ανεμογεννήτριες Darrieus με καμπύλη λεπίδα έχουν χαμηλότερη τάση κάμψης στα πτερύγια σε σύγκριση με τις ανεμογεννήτριες Darrieus με ευθεία λεπίδα και επομένως οι πρώτες είναι πιο επιτυχημένες εμπορικά (Islam et. al., 2008).

Ωστόσο, στη μικρής κλίμακας παραγωγή ισχύος, οι ανεμογεννήτριες Darrieus με ευθεία λεπίδα είναι πιο δημοφιλείς λόγω του απλού σχεδιασμού των λεπίδων τους (Akwa et. al., 2012). Οι ίσιες λεπίδες ανεμογεννητριών Darrieus μερικές φορές μπορεί να έχουν μεταβλητή γωνία βήματος. Έχει βρεθεί ότι οι ανεμογεννήτριες Darrieus με ευθεία λεπίδα σταθερού βήματος δεν έχουν ικανότητα αυτοεκκίνησης (Kirke, 1998). Η διαμόρφωση μεταβλητού βήματος των πτερυγίων επιτρέπει στις ανεμογεννήτριες Darrieus να ξεπεράσουν το πρόβλημα της ροπής εκκίνησης, αλλά είναι υπερβολικά περίπλοκο, καθιστώντας τα αρκετά πρακτικά για παραγωγή ενέργειας μικρής κλίμακας (Islam et. al., 2008).

Επί του παρόντος, οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα είναι οι πιο δημοφιλείς μεταξύ όλων των σχεδίων ανεμόμυλων. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι οι οριζόντιες ανεμογεννήτριες έχουν γενικά πολύ υψηλότερη απόδοση από τις ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα. Ο μέγιστος συντελεστής ισχύος μίας σύγχρονης ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα έχει αναφερθεί από 45% έως και 50% ενώ αυτός ενός αποδοτικού κάθετου άξονα είναι συνήθως κάτω από 40% (Eriksson et. al., 2008). Αντίστοιχα, σε ότι αφορά το συντελεστή ισχύος μίας ανεμογεννήτριας κάθετου άξονα τύπου Savonius είναι ακόμη χαμηλότερος, συνήθως κάτω από 25% (Akwa et. al., 2012). Στην εικόνα 1.3 παρουσιάζεται μία ανεμογεννήτρια οριζόντιου

άξονα που διατίθεται στο εμπόριο από την εταιρία SIEMENS (μοντέλο: SWT-2.3-82 VS) (Siemens, 2022).



Σχήμα 1.4: Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα: (α) ρότορας Savonius, (β) ρότορας Darrieus με καμπύλη λεπίδα και (γ) ρότορας Darrieus ευθείας λεπίδας (Πηγή: <https://elite.tugraz.at/Jungbauer/3.htm>)



Εικόνα 1.3: Ανεμογεννήτρια Οριζόντιου άξονα Siemens (μοντέλο: SWT-2.3-82 VS)

Όπως εξηγήθηκε στην προηγούμενη ενότητα, ο άξονας του ρότορα μίας ανεμογεννήτριας οριζόντιου τύπου είναι τοποθετημένος σε οριζόντια κατεύθυνση, δηλαδή παράλληλα με το έδαφος. Η ηλεκτρική γεννήτρια που συνδέεται με τον ρότορα του στροβίλου μέσω του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος άξονα αποθηκεύεται μέσα σε ένα κιβώτιο ατράκτου στην κορυφή του πύργου. Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου τύπου είναι ανεμογεννήτριες ανυψωτικού τύπου και είναι πολύ ευαίσθητες σε αλλαγές στο προφίλ των πτερυγίων, στο σχεδιασμό και στην τραχύτητα της επιφάνειας. Ένας άλλος περιορισμός των ανεμογεννητριών οριζόντιου τύπου είναι ότι δεν μπορούν να πιάσουν τον άνεμο από κάθε κατεύθυνση. Χρειάζονται ειδικό μηχανισμό για να περιστρέφεται ο ρότορας ώστε να είναι πάντα στραμμένος προς τον άνεμο. Αυτός ήταν ίσως ένας από τους κύριους λόγους για τους οποίους καμία από τις ιστορικές ανεμογεννήτριες οριζόντιου τύπου δεν ήταν τόσο επιτυχημένη. Στην πραγματικότητα, ο αμερικανικός ανεμόμυλος ήταν η πρώτη ανεμογεννήτρια οριζόντιου τύπου που διέθετε πλήρως αυτόματα ελεγχόμενο σύστημα εκτροπής. Το σύστημα εκτροπής μίας ανεμογεννήτριας οριζόντιου τύπου είναι βασικά ένα εξάρτημα που είναι υπεύθυνο για τον προσανατολισμό του ρότορα της ανεμογεννήτριας προς τον άνεμο. Σε μικρού μεγέθους οριζόντιες ανεμογεννήτριες, το σύστημα εκτροπής αποτελείται από ένα απλό ρουλεμάν κυλίνδρου που συνδέεται μεταξύ του πύργου και της ατράκτου. Μια ουρά με ένα πτερύγιο στο άκρο είναι τοποθετημένη στο πίσω μέρος της ατράκτου η οποία παράγει διορθωτική ροπή για να μετατρέψει τον ρότορα της ανεμογεννήτριας στον άνεμο. Αυτός ο τύπος συστήματος εκτροπής ονομάζεται «παθητικό σύστημα εκτροπής». Ωστόσο, οι μεγάλης κλίμακας (Mw) οριζόντιου τύπου ανεμογεννήτριες χρειάζονται έναν ενεργό μηχανισμό εκτροπής.

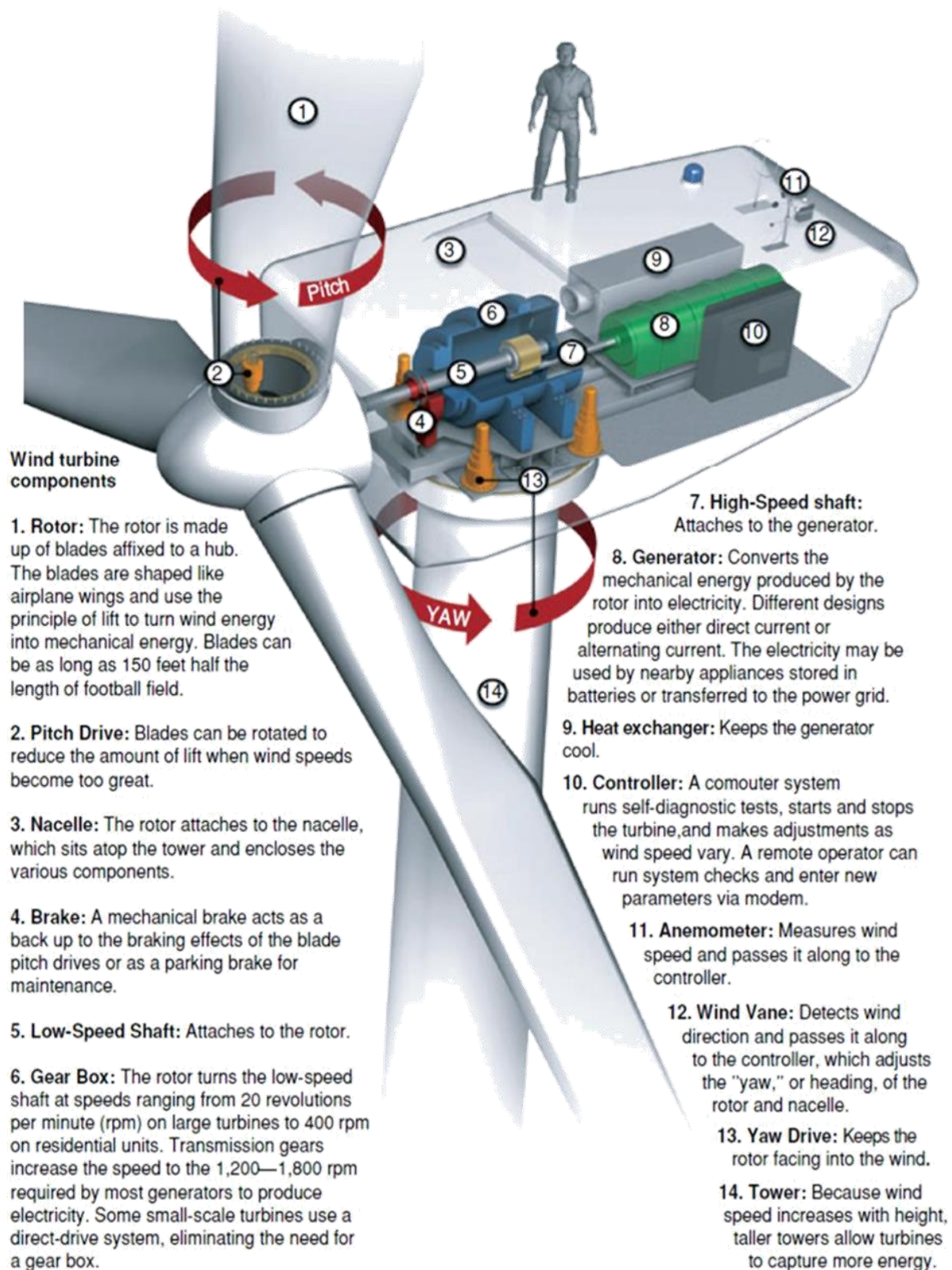
Τα ενεργά συστήματα εκτροπής είναι κανονικά εξοπλισμένα με έναν αισθητήρα ανέμου που ανιχνεύει την κατεύθυνση του ανέμου και έναν σερβοκινητήρα που παράγει την απαιτούμενη ροπή για να περιστρέψει τον αυλό της ανεμογεννήτριας ενάντια στον ακίνητο πύργο. Μία ανεμογεννήτρια οριζόντιου τύπου, γενικά, αποτελείται από έναν ρότορα, ένα κιβώτιο ταχυτήτων, μια γεννήτρια και ένα σύστημα εκτροπής.

Ο ρότορας μίας οριζόντιου τύπου ανεμογεννήτριας περιλαμβάνει δύο έως τρία πτερύγια συνδεδεμένα μεταξύ τους με μια πλήμνη. Η πλήμνη είναι προσαρτημένη σε έναν κύριο άξονα (μερικές φορές ονομάζεται επίσης πρωτεύων άξονας ή άξονας χαμηλής ταχύτητας), ο οποίος διέρχεται από ρουλεμάν και συνδέεται με ένα σύστημα μετάδοσης.

Το κιβώτιο ταχυτήτων ενισχύει την ταχύτητα περιστροφής και παρέχει υψηλότερες στροφές ανά λεπτό σε έναν δευτερεύοντα άξονα (μερικές φορές ονομάζεται επίσης άξονας υψηλής ταχύτητας). Ο δευτερεύων άξονας κινεί μια γεννήτρια που παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Το κιβώτιο ταχυτήτων, ο πρωτεύων και δευτερεύων άξονες και η γεννήτρια βρίσκονται μέσα σε ένα κιβώτιο ατράκτου.

Το κιβώτιο ατράκτου περιέχει επίσης ένα σύστημα εκτροπής για τον προσανατολισμό του ρότορα και έναν εναλλάκτη θερμότητας για την ψύξη της γεννήτριας.

Το Σχήμα 1.4 δείχνει όλα τα κύρια συστατικά μίας σύγχρονης ανεμογεννήτριας μεγάλης κλίμακας (Crossley et. al., 2012).



Σχήμα 1.5: Τυπική διαμόρφωση μίας σύγχρονης ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα (Crossley et. al., 2012).

Σύμφωνα με το σχήμα 1.4, μία ανεμογεννήτρια μεγάλης κλίμακας απαρτίζεται από τα εξής μέρη (Crossley et. al., 2012):

1. **Ρότορας (Rotor):** Ο ρότορας αποτελείται από λεπίδες στερεωμένες σε μια πλήμνη. Τα πτερύγια έχουν σχήμα φτερού αεροπλάνου και χρησιμοποιούν την αρχή της ανύψωσης για να μετατρέψουν την αιολική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια. Οι λεπίδες μπορούν να έχουν μήκος έως και 150 πόδια, ένα μέγεθος που αντιστοιχεί στο μισό από το μήκος του γηπέδου ποδοσφαίρου.
2. **Pitch drive:** τα πτερύγια μπορούν να περιστραφούν για να μειωθεί η ποσότητα ανύψωσης όταν οι ταχύτητες του ανέμου γίνονται μεγάλες
3. **Άτρακτος (Nacelle):** Ο ρότορας συνδέεται με την ατρακτίδα, η οποία βρίσκεται στην κορυφή του πύργου και περικλείει τα διάφορα εξαρτήματα
4. **Φρένο (Brake):** Ένα μηχανικό φρένο λειτουργεί ως εφεδρικό στα αποτελέσματα πέδησης των μηχανισμών κίνησης της λεπίδας ή ως χειρόφρενο για συντήρηση
5. **Άξονας χαμηλής ταχύτητας (Low speed shaft):** Προσαρμόζεται στον ρότορα
6. **Κιβώτιο ταχυτήτων (Gear Box):** Ο ρότορας περιστρέφει τον άξονα χαμηλής ταχύτητας με ταχύτητες που κυμαίνονται από 20 στροφές ανά λεπτό (rpm) σε μεγάλους στρόβιλους έως 400rpm σε οικιακές μονάδες. Τα γρανάζια μετάδοσης αυξάνουν την ταχύτητα στις 1200-1800rpm που απαιτούνται από τις περισσότερες γεννήτριες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ορισμένοι στρόβιλοι μικρής κλίμακας χρησιμοποιούν σύστημα άμεσης μετάδοσης κίνησης, εξαλείφοντας την ανάγκη για κιβώτιο ταχυτήτων.
7. **Άξονας υψηλής ταχύτητας (High speed shaft):** Προσαρμόζεται στη γεννήτρια
8. **Γεννήτρια (Generator):** Μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια που παράγεται από τον ρότορα σε ηλεκτρική. Διαφορετικά σχέδια παράγουν είτε συνεχές είτε εναλλασσόμενο ρεύμα. Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί από κοντινές συσκευές όπου αποθηκεύεται σε μπαταρίες ή μεταφέρεται στο ηλεκτρικό δίκτυο
9. **Εναλλάκτης θερμότητας (Heat exchanger):** Διατηρεί τη γεννήτρια δροσερή
10. **Ελεγκτής (Controller):** Ένα σύστημα υπολογιστή εκτελεί αυτοδιαγνωστικές δοκιμές, εκκινεί και σταματά τον στρόβιλο και κάνει ρυθμίσεις καθώς η ταχύτητα του ανέμου ποικίλλει. Ένας απομακρυσμένος χειριστής μπορεί να εκτελέσει ελέγχους συστήματος και να εισάγει νέες παραμέτρους μέσω του μόντεμ
11. **Ανεμόμετρο (Anemometer):** Μετρά την ταχύτητα του ανέμου και τη μεταφέρει στον ελεγκτή

12. **Ανεμοδείκτης (Wind Vane):** ανιχνεύει την κατεύθυνση του ανέμου και τη μεταφέρει στον ελεγκτή, ο οποίος προσαρμόζει την "εκτροπή" ή την κατεύθυνση του ρότορα και της ατράκτου

13. **Κίνηση Εκτροπής (Yaw drive):** κρατά τον ρότορα στραμμένο στον άνεμο

14. **Πύργος (Tower):** Επειδή η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται με το ύψος, οι ψηλότεροι πύργοι επιτρέπουν στις τουρμπίνες να συλλαμβάνουν περισσότερη ενέργεια

Στον παρακάτω πίνακα, παρουσιάζονται οι σημαντικότερες διαφορές ανάμεσα στις ανεμογεννήτριες οριζόντιου και κάθετου άξονα (Erickson et. al., 2008)

Πίνακας 1.2: Οι σημαντικότερες διαφορές μεταξύ ανεμογεννητριών οριζόντιου και κάθετου άξονα (Erickson et. al., 2008)

	Οι σημαντικότερες διαφορές μεταξύ ανεμογεννητριών οριζόντιου και κάθετου άξονα		
	Darrieus VAWT	Curved-blade Darrieus VAWT	HAWT
Προφίλ λεπίδας	Απλό	Περίπλοκο	Περίπλοκο
Ανάγκη για μηχανισμό εκτροπής	Όχι	Όχι	Ναι
Δυνατότητα μηχανισμού pitch	Ναι	Όχι	Ναι
Πύργος	Ναι	Όχι	Ναι
Καλωδίωση	Προαιρετική	Ναι	Όχι
Θόρυβος	Χαμηλός	Μέτριος	Υψηλός
Επιφάνεια πτερυγίου έλικας	Μέτρια	Μεγάλη	Μικρή
Θέση γεννήτριας	Στο έδαφος	Στο έδαφος	Στο έδαφος
Φορτίο λεπίδας	Μέτριο	Χαμηλό	Υψηλό
Αυτοεκκίνηση	Όχι	Όχι	Ναι
Παρεμβολή πύργου	Μικρή	Μικρή	Μεγάλη
Θεμελίωση	Μέτρια	Απλή	Εκτενής
Συνολική κατασκευή	Απλή	Απλή	Περίπλοκη

1.4.2. Ανεμογεννήτριες τύπου μεταφοράς και τύπου ανύψωσης

Όταν ένα επίπεδο αντικείμενο εκτίθεται σε έναν προσπίπτοντα άνεμο, αντιμετωπίζει μια επιφανειακή δύναμη, κοινώς γνωστή ως αεροδυναμική δύναμη (Σχήμα 1.5). Η συνιστώσα της αεροδυναμικής δύναμης που είναι παράλληλη προς την κατεύθυνση της ροής ονομάζεται οπισθέλκουσα ενώ αυτή που είναι κάθετη στην κατεύθυνση του ανέμου ονομάζεται ανύψωση. Το μέγεθος της δύναμης οπισθέλκουσας και η δύναμη ανύψωσης καθορίζονται από τις ακόλουθες εκφράσεις:

$$D = C_D \frac{\rho}{2} a u_{\infty}^2$$

$$L = C_L \frac{\rho}{2} a u_{\infty}^2$$

Όπου:

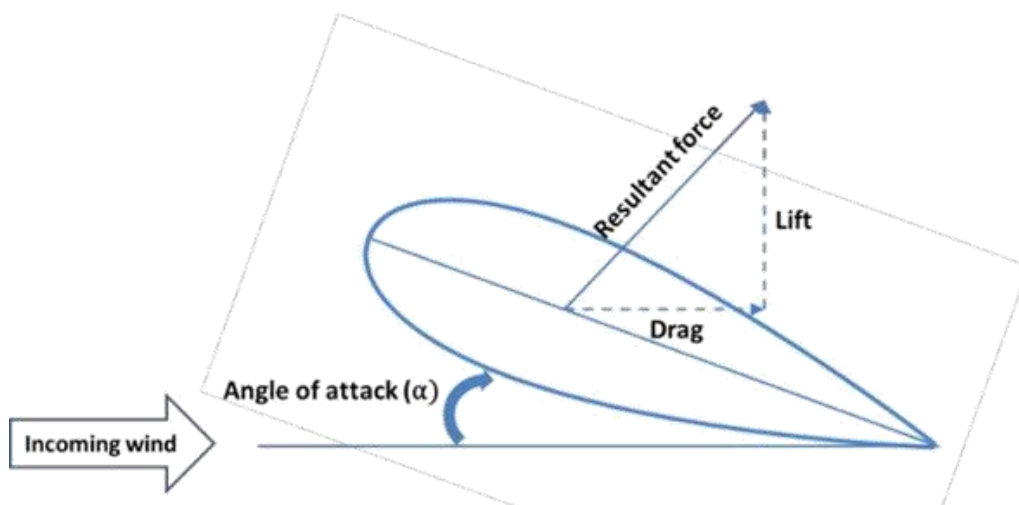
a : η περιοχή κάτοψης (προβαλλόμενη περιοχή κάθετη στην ταχύτητα ροής) του αντικειμένου

ρ : η πυκνότητα του αέρα

u_{∞} : η ταχύτητα του ανέμου ανάντι

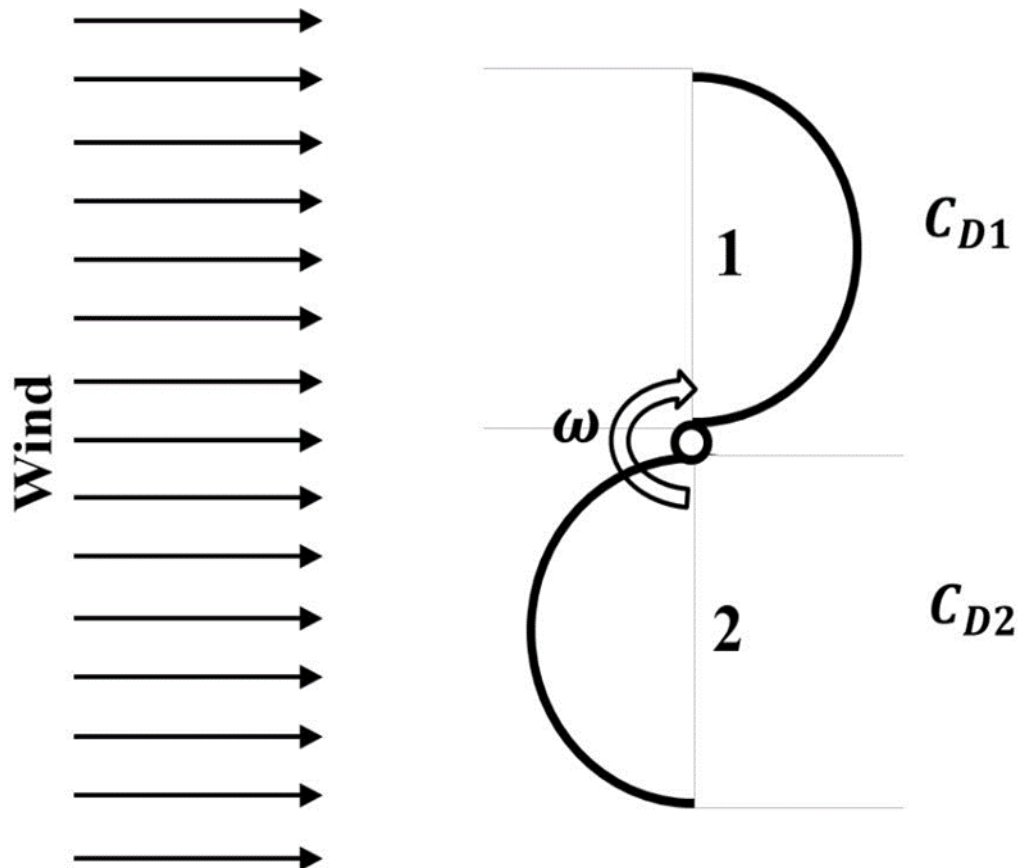
C_D / C_L : σταθερές που ονομάζονται συντελεστές έλξης και ανύψωσης

Οι σταθερές εξαρτώνται από την «αεροδυναμική ποιότητα» του αντικειμένου: Όσο καλύτερη είναι η αεροδυναμική ποιότητα του αντικειμένου, τόσο υψηλότερος είναι ο συντελεστής ανύψωσης αλλά και χαμηλότερος ο συντελεστής οπισθέλκουσας, και επομένως υψηλότερη η δύναμη ανύψωσης αλλά χαμηλότερη η δύναμη οπισθέλκουσας.



Σχήμα 1.6: Σύρσιμο και ανύψωση των στοιχείων αεροδυναμικής

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο ρότορας τύπου Savonius είναι μια ανεμογεννήτρια που βασίζεται στην οπισθέλκουσα, επειδή είναι η συνιστώσα οπισθέλκουσας της αεροδυναμικής δύναμης που τροφοδοτεί την τουρμπίνα Savonius να περιστρέφεται. Μπορούμε να υπολογίσουμε τη ροπή και τη μηχανική ισχύ εξόδου ενός ρότορα Savonius χρησιμοποιώντας ένα απλοποιημένο μοντέλο (Σχήμα 1.6). Ωστόσο, αυτό το απλοποιημένο μοντέλο αγνοεί την επίδραση του δρομέα στα χαρακτηριστικά της ροής του ανέμου.



Σχήμα 1.7: Απλοποιημένο μοντέλο για την ανεμογεννήτρια Savonius.

Υποθέτοντας ότι ο ρότορας έχει μέση ακτίνα R και περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω . Η περιφερειακή ταχύτητα του ρότορα στη μέση ακτίνα είναι ίση με:

$$u = \omega R$$

Οι μέσες σχετικές ταχύτητες του ανέμου u_{r1} και u_{r2} στο πρώτο και το δεύτερο περιστρεφόμενο τύμπανο δίνονται από τις ακόλουθες εκφράσεις, αντίστοιχα.

$$u_{r1} = u_{\infty} - u$$

$$u_{r2} = u_{\infty} + u$$

Οι προκύπτουσες δυνάμεις οπισθέλκουσας D_1 και D_2 στα περιστρεφόμενα τύμπανα δίνονται ως:

$$D_1 = C_{D1} \frac{1}{2} a u_{r1}^2 = C_{D1} \frac{\rho}{2} a (u_\infty - u)^2 = C_{D1} \frac{\rho}{2} a u_\infty^2 \left(1 - \frac{u}{u_\infty}\right)^2$$

$$D_2 = C_{D2} \frac{1}{2} a u_{r2}^2 = C_{D2} \frac{\rho}{2} a (u_\infty + u)^2 = C_{D2} \frac{\rho}{2} a u_\infty^2 \left(1 + \frac{u}{u_\infty}\right)^2$$

όπου, δηλώνει την προβαλλόμενη περιοχή των τυμπάνων. Η αεροδυναμική ροπή κατά μήκος του κεντρικού άξονα υπολογίζεται ως:

$$\tau = (D_1 - D_2) * R = \frac{\rho}{2} a u_\infty^2 R (C_{D1} \left(1 - \frac{u}{u_\infty}\right)^2 - C_{D2} \left(1 + \frac{u}{u_\infty}\right)^2)$$

Η μηχανική ισχύς από τον στρόβιλο μπορεί στη συνέχεια να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

$$P = \tau * \omega = \frac{\rho}{2} a u_\infty^2 \omega R (C_{D1} \left(1 - \frac{u}{u_\infty}\right)^2 - C_{D2} \left(1 + \frac{u}{u_\infty}\right)^2)$$

$$P = \tau * \omega = \frac{\rho}{2} (2a) u_\infty^3 \left\{ \frac{1}{2} \frac{u}{u_\infty} \left(C_{D1} \left(1 - \frac{u}{u_\infty}\right)^2 - C_{D2} \left(1 + \frac{u}{u_\infty}\right)^2 \right) \right\} = C_P \frac{\rho}{2} a u_\infty^3$$

Η παρακάτω έκφραση ορίζεται ως ο συντελεστής ισχύος:

$$\left\{ \frac{1}{2} \frac{u}{u_\infty} \left(C_{D1} \left(1 - \frac{u}{u_\infty}\right)^2 - C_{D2} \left(1 + \frac{u}{u_\infty}\right)^2 \right) \right\}$$

Η μηχανική ισχύς που παράγεται από έναν στρόβιλο Savonius είναι ευθέως ανάλογη με τη συνολική προβαλλόμενη περιοχή από τον ρότορα και τον κύβο της ταχύτητας ανέμου ανάντη.

Οι ανεμογεννήτριες τύπου Darrieus τόσο κάθετου όσο και οριζόντιου άξονα βασίζονται σε «ανεγκυστήρα», δηλαδή εξάγουν ισχύ από τον άνεμο χρησιμοποιώντας κυρίως το συστατικό ανύψωσης της αεροδυναμικής δύναμης στα πτερύγια τους. Το αναλυτικό μοντέλο για την πρόβλεψη της ισχύος από μια ανεμογεννήτρια Darrieus είναι αρκετά περίπλοκο. Κανονικά, οι άνθρωποι χρησιμοποιούν Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD) για να αναλύσουν τα χαρακτηριστικά ενός ρότορα Darrieus. Ωστόσο, υπάρχουν αρκετές αναλυτικές θεωρίες και

μοντέλα για τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα. Μερικά από τα κύρια μοντέλα, τα οποία χρησιμοποιούνται επί του παρόντος στην πράξη, είναι η θεωρία δίσκου ενεργοποιητή, η θεωρία δίσκου ρότορα, το μοντέλο κυλίνδρου στροβιλισμού και η θεωρία λεπίδων ρότορα (Burton, 2001).

1.4.3. Ανεμογεννήτριες μεγάλης κλίμακας και ανεμογεννήτριες μικρής κλίμακας

Ο ορισμός του «μικρού» και του «μεγάλου» ανεμόμυλου έχει παραμείνει ασαφής στη βιβλιογραφία της αιολικής ενέργειας. Η μικρή ανεμογεννήτρια ορίστηκε αρχικά με βάση την ικανότητά της να παράγει αρκετή ηλεκτρική ενέργεια για να καλύψει μεμονωμένες ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας (Zhang, 2012).

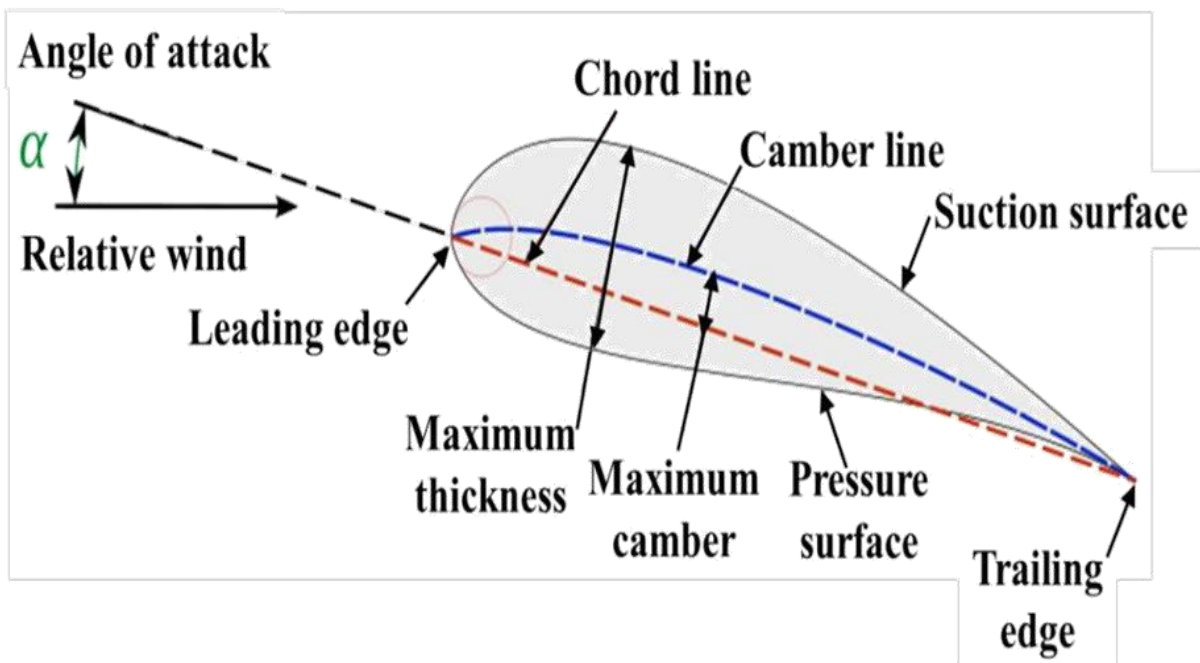
Αλλά το πρόβλημα έγκειται στο γεγονός ότι η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από ένα ίδιο το νοικοκυριό είναι πολύ συζητήσιμη γιατί ποικίλλει ανάλογα με τον χρόνο και τον τόπο. Για παράδειγμα, μια μέση αμερικανική οικογένεια χρειάζεται έναν στρόβιλο 10kW για να καλύψει την πλήρη κατανάλωση, ενώ ένα ευρωπαϊκό νοικοκυριό χρειάζεται έναν στρόβιλο 4kW, ο οποίος μειώνεται περαιτέρω σε έναν στρόβιλο 1kW για ένα μέσο κινεζικό νοικοκυριό (Zhang, 2012). Χωρίς αξιόπιστο ομόφωνο ορισμό, το εύρος της ονομαστικής χωρητικότητας ισχύος των ανεμογεννητριών μικρής κλίμακας ποικίλλει από λίγα watt έως μερικές εκατοντάδες κιλοβάτ. Για να έχουμε συνέπεια στη συζήτηση, ορίζουμε μια ονοματολογία σε αυτήν την έκθεση με βάση το μέγεθος των ρότορων ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα ως εξής (Kishore et. al., 2013):

- Ανεμογεννήτρια μικροκλίμακας (Micro-scale wind turbine - μSWT): διάμετρος ρότορα 10 cm
- Ανεμογεννήτρια μικρής κλίμακας (Small-scale wind turbine - SSWT): διάμετρος ρότορα από 10cm έως 100cm,
- Ανεμογεννήτρια μεσαίας κλίμακας (Mid-scale wind turbine - MSWT): διάμετρος ρότορα από 1m έως 5m
- Ανεμογεννήτρια μεγάλης κλίμακας (Large-scale wind turbine - LSWT): διάμετρος ρότορα μεγαλύτερη των 5m

1.5. Βασικές τεχνολογίες για τις ανεμογεννήτριες

Στο Σχήμα 1.7 παρουσιάζονται διάφοροι όροι, οι οποίοι σχετίζονται με την ονοματολογία μιας αεροτομής. Έτσι, σε μία αεροτομή έχουμε:

- **Μπροστινό άκρο (Leading edge):** Είναι το σημείο στο μπροστινό μέρος μιας αεροτομής, το οποίο έχει τη μέγιστη καμπυλότητα.
- **Ακραίο σημείο (Trailing Edge):** Είναι το σημείο στο πίσω μέρος μιας αεροτομής, που έχει τη μέγιστη καμπυλότητα.
- **Γραμμή χορδής (Chord Line):** Είναι η ευθεία γραμμή που συνδέει το μπροστινό άκρο και το πίσω άκρο μιας αεροτομής
- **Μήκος χορδής (Chord Length) (c):** το μήκος της γραμμής χορδής
- **Επιφάνεια πίεσης (Pressure surface):** Είναι η κάτω επιφάνεια μιας αεροτομής και γενικά σχετίζεται με χαμηλότερη ταχύτητα και υψηλότερη στατική πίεση από την επιφάνεια αναρρόφησης.
- **Μέση γραμμή Camber (Mean Camber Line):** Είναι ο τόπος ενός συνόλου σημείων που βρίσκονται στη μέση μεταξύ της άνω και της κάτω επιφάνειας
- **Μέγιστο πάχος (Maximum thickness):** Είναι το μέγιστο πάχος μιας αεροτομής όταν μετράται κάθετα στη γραμμή camber.



Σχήμα 1.8: Βασικές ορολογίες που σχετίζονται με την αεροτομή

Εκτός από την ονοματολογία της αεροτομής, θα χρησιμοποιήσουμε επίσης λίγους όρους που χρησιμοποιούνται συχνά για να υποδείξουν και να χαρακτηρίσουν την απόδοση μιας ανεμογεννήτριας και ιδιαίτερα μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα.

- **Συντελεστής ισχύος:** Ορίζεται ως η ποσότητα της μηχανικής ισχύος που παράγεται από μια ανεμογεννήτρια έναντι της συνολικής διαθέσιμης αιολικής ισχύος. Μερικές φορές, ονομάζεται επίσης συντελεστής απόδοσης και μαθηματικά υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την ακόλουθη έκφραση [18].

$$C_P = \frac{P_{mech}}{\frac{1}{2}\rho\pi r_t^2 u_\infty^3}$$

Όπου:

- ✓ **P_{mech}** : η μηχανική ισχύς που παράγεται από την ανεμογεννήτρια,
 - ✓ **ρ** : η πυκνότητα
 - ✓ **r_t** : η ακτίνα κορυφής από τον ρότορα
 - ✓ **U_∞** : είναι η ταχύτητα του ελεύθερου ανέμου
 - ✓ Ο παρονομαστής του κλάσματος: υποδηλώνει τη συνολική διαθέσιμη αιολική ισχύ που διέρχεται από την περιοχή σάρωσης του ρότορα της ανεμογεννήτριας.
- **Νόμος Betz:** Υπολογίζει τη μέγιστη μηχανική ισχύ που παράγεται από μια ανεμογεννήτρια σε ανοιχτή ροή ανέμου. Σύμφωνα με το νόμο του Betz, οποιαδήποτε τουρμπίνα δεν μπορεί να εξάγει περισσότερο από 16/27 (59,3 %) της κινητικής ενέργειας του ανέμου. Ο συντελεστής 16/27 (0,593) είναι η μέγιστη τιμή του συντελεστή ισχύος μιας ανεμογεννήτριας και είναι πιο γνωστός ως συντελεστής Betz ή όριο Betz.
 - **Συντελεστής ροπής:** Αυτή η παράμετρος χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της ροπής του άξονα που παράγεται από έναν ρότορα ανεμογεννήτριας. Η υψηλή τιμή του συντελεστή ροπής επιτρέπει στην ανεμογεννήτρια να ξεκινά και να λειτουργεί με χαμηλότερη ταχύτητα ανέμου. Επίσης, υπάρχουν ορισμένες ειδικές εφαρμογές όπως η άντληση νερού όπου η ροπή του άξονα από την ανεμογεννήτρια είναι πιο σημαντική μεταβλητή από την ισχύ εξόδου. Για τέτοιες περιπτώσεις, ο συντελεστής ροπής

γίνεται το κύριο χαρακτηριστικό της ανεμογεννήτριας. Μαθηματικά, ο συντελεστής ροπής δίνεται ως:

$$C_Q = \frac{C_P}{\lambda}$$

Όπου

✓ λ : υποδηλώνει την αναλογία ταχύτητας κορυφής του στροβίλου

- **Λόγος ταχύτητας αιχμής:** Ο λόγος ταχύτητας αιχμής (λ) είναι η πιο συχνά και βολικά χρησιμοποιούμενη παράμετρος κλιμάκωσης, η οποία ενσωματώνει την κύρια αεροδυναμική επίδραση της ταχύτητας ανέμου, του μεγέθους του ρότορα και της γωνιακής ταχύτητας του ρότορα με τον συντελεστή ισχύος του ρότορα της ανεμογεννήτριας. Αξιολογεί την εφαιπτομενική ταχύτητα του πτερυγίου της τουρμπίνας σε σχέση με την ταχύτητα του ελεύθερου ανέμου και δίνεται ως (Burton, 2001):

$$\lambda = \frac{r_t \omega}{u_\infty}$$

Όπου:

- ✓ U_∞ : είναι η ταχύτητα του ελεύθερου ανέμου και
- ✓ r_t και ω : υποδηλώνουν την ακτίνα της κορυφής και τη γωνιακή ταχύτητα του ανέμου
- **Συνολική απόδοση:** Οι συντελεστές ισχύος και ροπής χαρακτηρίζουν την απόδοση μόνο του ρότορα της ανεμογεννήτριας. Δεν υπολογίζουν τις απώλειες που οφείλονται σε άλλα εξαρτήματα της ανεμογεννήτριας όπως η ηλεκτρική γεννήτρια, τα ρουλεμάν και το κιβώτιο ταχυτήτων. Η τρίτη παράμετρος, η συνολική απόδοση ορίζεται ως η καθαρή ηλεκτρική ισχύς που παράγεται έναντι της συνολικής διαθέσιμης αιολικής ισχύος.

Η συνολική απόδοση δίνεται ως:

$$\eta = \frac{P_{elec}}{\frac{1}{2}\rho\pi r_t^2 u_\infty^3}$$

Όπου:

- ✓ P_{elec} : η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από την ανεμογεννήτρια
- ✓ **Παρονομαστής:** η μέγιστη διαθέσιμη αιολική ισχύς

1.6. Ανάγκη και εφαρμογές ανεμογεννητριών μικρής κλίμακας (SSWT)

Οι πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα της μικροηλεκτρονικής όχι μόνο έχουν μικρύνει τις ασύρματες συσκευές αλλά έχουν επίσης μειώσει την απαίτησή τους σε ισχύ κατά μια τάξη μεγέθους. Οι κόμβοι ασύρματων αισθητήρων, για παράδειγμα, χρειάζονται τώρα ισχύ μικρότερη από 1mW (Priya, 2005). Τέτοιοι κόμβοι χρησιμοποιούνται σε ποικίλες εφαρμογές όπως αισθητήρες αερίων και χημικών, παρακολούθηση θερμοκρασίας, πίεσης και υγρασίας, ανιχνευτής κίνησης, παρακολούθηση δομικής υγείας και ανίχνευση εκρηκτικών.

Ωστόσο, η υπερβολική επέκταση της χρήσης ασύρματων συσκευών έχει φέρει προκλήσεις όσον αφορά την εύρεση κατάλληλης πηγής ενέργειας, ειδικά για τις απομακρυσμένες εφαρμογές. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων αυτών, επί του παρόντος χρησιμοποιούνται μπαταρίες κυψελών λιθίου, γεγονός που αποτελεί πρόκληση συντήρησης, επειδή αυτές οι μπαταρίες πρέπει να παρακολουθούνται και να αντικαθίστανται τακτικά. Μία από τις πιο βολικές μεθόδους παροχής της απαιτούμενης ισχύος στις μικροσκοπικές ηλεκτρονικές συσκευές είναι η συλλογή της αιολικής ενέργειας. Οι συμβατικές ανεμογεννήτριες μεγάλης κλίμακας (LSWT) είναι αποδοτικές και οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες mega-watt έχουν συντελεστή ισχύος έως και 40%-45% (Ozgener & Ozgener, 2007). Ωστόσο, χρειάζονται υψηλή ταχύτητα ανέμου για να λειτουργήσουν. Η τυπική ονομαστική ταχύτητα ανέμου είναι περίπου 12 m/s-14 m/s. Επιπλέον, οι εγκαταστάσεις τους περιορίζονται σε περιοχές μακριά από την πόλη ή τον δήμο λόγω κάποιων πρακτικών ανησυχιών που σχετίζονται με κινδύνους για την ασφάλεια και την εκπομπή θορύβου. Συγκριτικά, οι ανεμογεννήτριες μικρής κλίμακας (SSWT) μπορούν να λειτουργήσουν με χαμηλή ταχύτητα ανέμου, να παράγουν ελάχιστο θόρυβο και δεν υπάρχουν γνωστοί κίνδυνοι για την ασφάλεια. Παρά τα πολλά πλεονεκτήματα, πολύ λίγα μοντέλα ανεμογεννητριών μικρής κλίμακας έχουν αναπτυχθεί.

Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι οι περισσότερες από αυτές τις ανεμογεννήτριες βρίσκονται σε μεσαία κλίμακα. Η ονομαστική ταχύτητα ανέμου είναι συνήθως πάνω από 10 m/s. Καμία από τις ανεμογεννήτριες εκτός από τη μικροανεμογεννήτρια δεν μπορεί να λειτουργήσει αποτελεσματικά σε συνθήκες ταχύτητας ανέμου κάτω από 5m/s. Η μικροανεμογεννήτρια που λειτουργεί σε εύρος 2 m/s-7 m/s έχει βέλτιστο συντελεστή ισχύος 18% που είναι αρκετά χαμηλός. Το μF500 είναι το μόνο SSWT που έχει καλή συνολική τιμή απόδοσης 25%, αλλά η ονομαστική του ταχύτητα ανέμου είναι 12m/s. Η τρέχουσα κατάσταση των SSWT ουσιαστικά τονίζει την έλλειψη κατάλληλων μοντέλων SSWT που μπορούν να λειτουργούν κοντά στο επίπεδο του εδάφους με ταχύτητες ανέμου της τάξης των λίγων μέτρων ανά δευτερόλεπτο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

2.1. Γενικά

Η ανεμογεννήτρια μετατρέπει την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια, η οποία τροφοδοτείται σε συστήματα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Η σύνδεση του WT με τα συστήματα τροφοδοσίας είναι δυνατή με το σύστημα χαμηλής τάσης, μέσης τάσης, υψηλής τάσης καθώς και με το σύστημα εξαιρετικά υψηλής τάσης. Ενώ οι περισσότερες από τις ανεμογεννήτριες είναι σήμερα συνδεδεμένες με το σύστημα μέσης τάσης του δικτύου, μελλοντικά μεγάλα υπεράκτια αιολικά πάρκα θα συνδεθούν στο επίπεδο υψηλής και εξαιρετικά υψηλής τάσης.

Το σύστημα παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας έχει χαρακτηριστεί ως η πιο περίπλοκη μηχανή που δημιουργήθηκε ποτέ από τον άνθρωπο. Υπάρχουν πολλοί κανόνες και κανονισμοί για να διασφαλιστεί ότι λειτουργεί αξιόπιστα, και ως αποτέλεσμα η διαδικασία διασύνδεσης του οποιουδήποτε ενεργειακού έργου περιλαμβάνει πλήθος συναλλαγών με ρυθμιστικούς φορείς σε κρατικό και περιφερειακό επίπεδο, αλλά και με προσωπικό κοινής ωφελείας, συμβούλους μηχανικών αλλά και δικηγόρους με εμπειρία σε συμβάσεις διασύνδεσης. Μπορεί να χρειαστεί πάνω από ένα χρόνο για να ολοκληρωθούν οι απαιτούμενες μελέτες διασύνδεσης, ενώ κάθε έργο μπορεί να κοστίσει έως και εκατοντάδες χιλιάδες δολάρια. Έτσι, σε όλες τις περιπτώσεις απαιτείται πλήρης στάθμιση των αποτελεσμάτων τόσο των συνομιλιών όσο και των μελετών, ώστε να διαπιστωθεί εάν αξίζει να προχωρήσουμε στην επόμενη φάση των μελετών ή εάν το κόστος της διασύνδεσης δεν θα επιτρέψει την ανάπτυξη κερδοφορίας από τις μικρές ανεμογεννήτριες.

Οι περισσότεροι προγραμματιστές αιολικών έργων επιλέγουν να προσλάβουν έναν σύμβουλο μηχανικό ώστε να τους βοηθήσει να συμπληρώσουν σωστά τις απαιτούμενες φόρμες, να ερμηνεύσουν τα αποτελέσματα της μελέτης και να λειτουργήσουν ως σύνδεσμος μεταξύ του έργου, του Περιφερειακού Διαχειριστή Μεταφοράς (Regional Transmission Operator - RTO) και του βοηθητικού προγράμματος διασύνδεσης (Daniels, 2007).

2.2. Στοιχεία του συστήματος

Τα τρία κύρια στοιχεία για τη μετατροπή ενέργειας στο WT είναι ο ρότορας, το κιβώτιο ταχυτήτων και η γεννήτρια. Ο ρότορας μετατρέπει την κυμαινόμενη αιολική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια και επομένως είναι το κινητήριο στοιχείο στο σύστημα μετατροπής (Daniels, 2007).

Η γεννήτρια και πιθανώς ένας ηλεκτρονικός μετατροπέας απορροφούν τη μηχανική ισχύ ενώ τη μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια, που τροφοδοτείται σε ένα δίκτυο τροφοδοσίας. Το κιβώτιο ταχυτήτων προσαρμόζει τον ρότορα στην ταχύτητα της γεννήτριας. Το κιβώτιο ταχυτήτων δεν είναι απαραίτητο για πολυπολικές γεννήτριες αργής λειτουργίας.

Τα κύρια εξαρτήματα για τη σύνδεση του WT στο δίκτυο είναι ο μετασχηματιστής και ο υποσταθμός με τον διακόπτη κυκλώματος και ο μετρητής ηλεκτρικής ενέργειας μέσα σε αυτόν (Daniels, 2007).

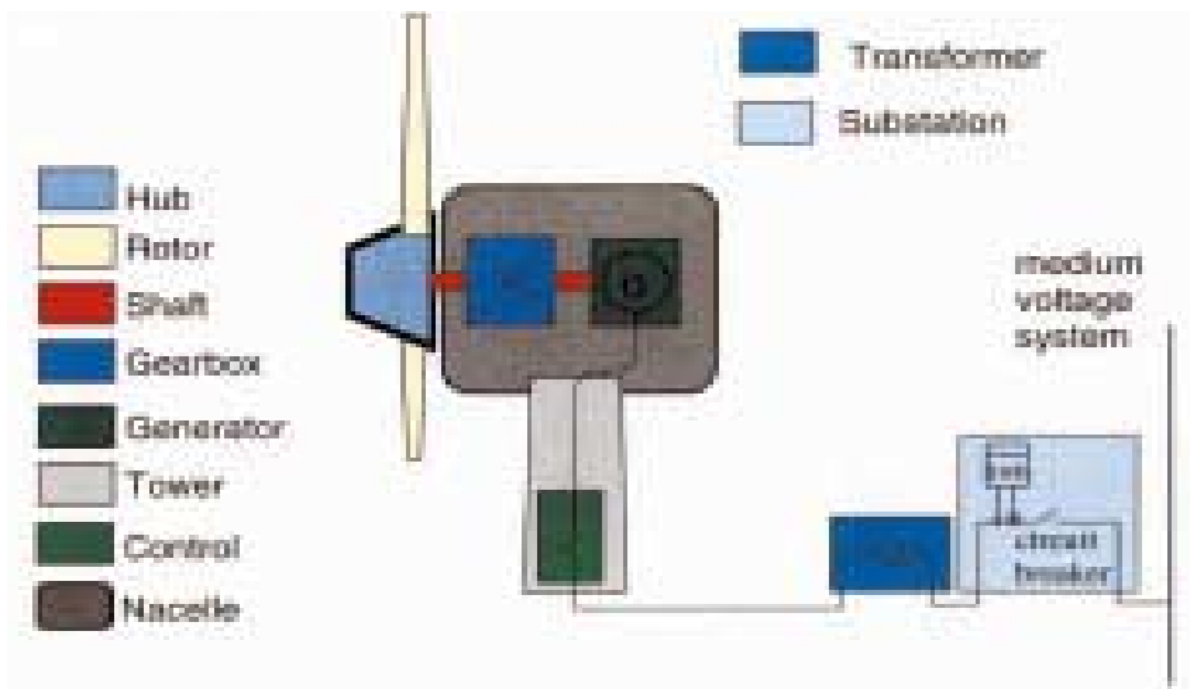
Λόγω των υψηλών απωλειών σε γραμμές χαμηλής τάσης, ο κάθε στρόβιλος μετασχηματιστή από το επίπεδο τάσης της ανεμογεννήτριας (400 ή 690V) στη γραμμή μέσης τάσης. Ο μετασχηματιστής βρίσκεται ακριβώς δίπλα στην ανεμογεννήτρια, ώστε να μπορεί να αποφεύγεται η μεταφορά μεγάλης τάσης σε καλώδια χαμηλής τάσης. Στην περίπτωση των μικρών ανεμογεννητριών (WTGS), είναι δυνατό να συνδεθούν απευθείας στη γραμμή χαμηλής τάσης του δικτύου χωρίς μετασχηματιστή. Σε αιολικά πάρκα με μικρές ανεμογεννήτριες, ενδεχομένως κάποιες από αυτές πρέπει να συνδέονται επάνω σε μετασχηματιστή. Σε ό,τι αφορά τα μεγάλα αιολικά πάρκα, είναι απαραίτητος ένας ξεχωριστός υποσταθμός, ο οποίος θα μετατρέψει την ενέργεια από το σύστημα μέσης τάσης στο σύστημα υψηλής τάσης.

Στο σημείο κοινής σύζευξης (Point of Common Coupling -PCC), μεταξύ της μεμονωμένης ανεμογεννήτριας ή του αιολικού πάρκου και του δικτύου, πρέπει να υφίσταται ένα σύστημα διακοπών για την αποσύνδεση είτε του πάρκου είτε της μεμονωμένης ανεμογεννήτριας. Γενικά, σε τέτοια κυκλώματα, οι συγκεκριμένοι διακόπτες βρίσκονται στο σύστημα μέσης τάσης του υποσταθμού, εντός του οποίου εγκαθίσταται και ένας μετρητής ρεύματος ώστε να ελέγχεται η διανομή. Ο κάθε υποσταθμός, έχει τους δικούς του μετασχηματιστές τάσης και ρεύματος (Daniels, 2007).

Η σύνδεση μέσης τάσης με το δίκτυο μπορεί να εκτελείται ως ακτινωτός τροφοδότης ή ως τροφοδότης δακτυλίου, ανάλογα με τις επιμέρους συνθήκες του συστήματος τροφοδοσίας.

Στο παρακάτω σχήμα, δίνεται μία επισκόπηση των απαραίτητων εξαρτημάτων σε περίπτωση σύνδεσης μίας ανεμογεννήτριας στο σύστημα μέσης τάσης. Ανάμεσα σε αυτά έχουμε:

- Το κεντρικό σημείο του έλικα (Hub)
- Το στροφέιο (rotor)
- Τον άξονα (shaft)
- Το κιβώτιο ταχυτήτων (Gearbox)
- Τη γεννήτρια (Generator)
- Τον πύργο (Tower)
- Τον ελεγκτή (Control)
- Τον θάλαμο (Nacelle)
- Μετασχηματιστής (Transformer)



Εικόνα 2.1: Εξαρτήματα της ανεμογεννήτριας και πλέγματος σύνδεσης

2.3. Δίκτυο ανεφοδιασμού

Το σύστημα τροφοδοσίας χωρίζεται σε:

- **LV:** Σύστημα χαμηλής τάσης (ονομαστική τάση έως 1kV)
- **MV:** Σύστημα μέσης τάσης (ονομαστική τάση πάνω από 1 kV έως 35 kV)
- **HV:** Σύστημα υψηλής τάσης (ονομαστική τάση πάνω από 35 kV)

Μικροί καταναλωτές όπως τα νοικοκυριά συνδέονται με το σύστημα χαμηλής τάσης. Σε μεγαλύτερους καταναλωτές όπως τα συνεργεία και οι βιομηχανίες μεσαίου μεγέθους είναι συνδεδεμένα με το σύστημα μέσης τάσης, ενώ οι μεγαλύτεροι καταναλωτές ή οι βαριές βιομηχανίες ενδέχεται να συνδέονται με το σύστημα υψηλής τάσεως. Οι συμβατικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής είναι συνδεδεμένοι με την υψηλή τάση ή την υπερυψηλή τάση

Η ικανότητα μετάδοσης ισχύος της ηλεκτρικής ενέργειας το σύστημα τροφοδοσίας συνήθως μειώνεται με την πτώση πυκνότητα πληθυσμού. Οι καταλληλότερες περιοχές για μεμονωμένες ανεμογεννήτριες βρίσκονται συνήθως σε περιοχές με χαμηλή πληθυσμιακή πυκνότητα και με χαμηλή ικανότητα μετάδοσης ισχύος.

Η μεταδιδόμενη ισχύς για σύνδεση με διαφορετικά επίπεδα του ηλεκτρικού δικτύου παρατίθενται στον πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Μεταδιδόμενη ισχύς και σύνδεση ανεμογεννητριών σε διαφορετικά επίπεδα ηλεκτρικού δικτύου

Σύστημα τάσης	Μέγεθος ανεμογεννήτριας ή αιολικού πάρκου	Μεταδιδόμενη ισχύς
Σύστημα χαμηλής τάσης	Για μικρές έως μεσαίες ανεμογεννήτριες	Έως 300 kW
Μέσο σύστημα τάσης	Για μεσαίες έως μεγάλες ανεμογεννήτριες και μικρά αιολικά πάρκα	Έως 2–5 MW
Σύστημα μέσης τάσης, σε υποσταθμό μετασχηματιστή σε υψηλή τάση	Για μεσαία έως μεγάλα χερσαία αιολικά πάρκα	Έως 10–40 MW
Σύστημα υψηλής τάσης	Συστάδες μεγάλων χερσαίων αιολικών πάρκων	Έως 100 MW
Σύστημα υπερ υψηλής τάσης	Μεγάλα υπεράκτια αιολικά πάρκα	> 0,5 GW

2.4. Περίληψη της διαδικασίας διασύνδεσης

Η διασύνδεση του οποιουδήποτε έργου με το δίκτυο κοινής ωφέλειας μπορεί να είναι μια μακρά και περίπλοκη διαδικασία. Παρακάτω συνοψίζονται τα κύρια βήματα αυτής της διαδικασίας.

Το πρώτο βήμα είναι η πραγματοποίηση συζητήσεων με αυτούς που κατανοούν το σύστημα στην περιοχή όπου προτείνεται να συνδεθεί το έργο. Στην περίπτωση αυτή ισχύουν τα εξής:

- Ο αιολικός χώρος εμπορικής κλίμακας απαιτεί μετάδοση τριών φάσεων (συνήθως 69 kilovolt (kV) ή υψηλότερη για μεγαλύτερα έργα, άνω των 10 MW σε μέγεθος) ή γραμμές διανομής (κάτω από 69 kV για μικρότερα έργα μεγέθους 0-10 MW). Αυτές οι ονομασίες γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας και τα μεγέθη έργων αποτελούν γενικές οδηγίες. Το μέγεθος του έργου που μπορεί να συνδεθεί σε μια συγκεκριμένη περιοχή του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από πολλούς άλλους παράγοντες, όπως η φόρτωση του τροφοδότη, η χωρητικότητα του υποσταθμού ή η βαθμολογία MVA, το υπάρχον σχέδιο προστασίας του συστήματος ισχύος και το μέγεθος του αγωγού. Ανάλογα με αυτούς τους παράγοντες, μικρότερα έργα ενδέχεται να μην μπορούν να συνδεθούν σε γραμμές χαμηλότερης τάσης.
- Αυτές οι γραμμές πρέπει να έχουν αρκετή διαθέσιμη χωρητικότητα για να μεταφέρουν την ισχύ εξόδου των ανεμογεννητριών. Σε διαφορετική περίπτωση, θα πρέπει να καταβληθούν χρήματα για την ανακατασκευή ή την αναγωγή των γραμμών σε μεγαλύτερο μέγεθος ώστε να υπάρχει η δυνατότητα χειρισμού της ισχύος του έργου.

Στη συνέχεια, το επόμενο βήμα είναι η διαδικασία του Περιφερειακού Διαχειριστή Μεταφοράς (RTO), εάν η σύνδεση πρόκειται να πραγματοποιηθεί σε γραμμή ηλεκτρικού ρεύματος που ανήκει σε κάποια εταιρία κοινής ωφέλειας που συμμετέχει σε RTO. Ορισμένες επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας εξακολουθούν να είναι ανεξάρτητες και θα μελετήσουν τη διασύνδεση με το δικό τους προσωπικό και τη δική τους διαδικασία. Στις περισσότερες περιπτώσεις πιθανότατα θα χρειαστεί η ολοκλήρωση μιας μελέτης RTO, η οποία περιλαμβάνει τα ακόλουθα (Daniels, 2007):

- Εφαρμογή διασύνδεσης
- Μελέτη σκοπιμότητας
- Μελέτη Επιπτώσεων συστήματος
- Μελέτη Εγκαταστάσεων

-
- Προαιρετική μελέτη (μελέτη παράδοσης μετάδοσης)
 - Συμφωνία διασύνδεσης

Το τελευταίο βήμα είναι η εκτέλεση των συμφωνιών και η κατασκευή της πρόσθετης υποδομής που απαιτείται ώστε να εισαχθεί η ενέργειά στο δίκτυο.

2.5. Κατανόηση του συστήματος μεταφοράς και διανομής

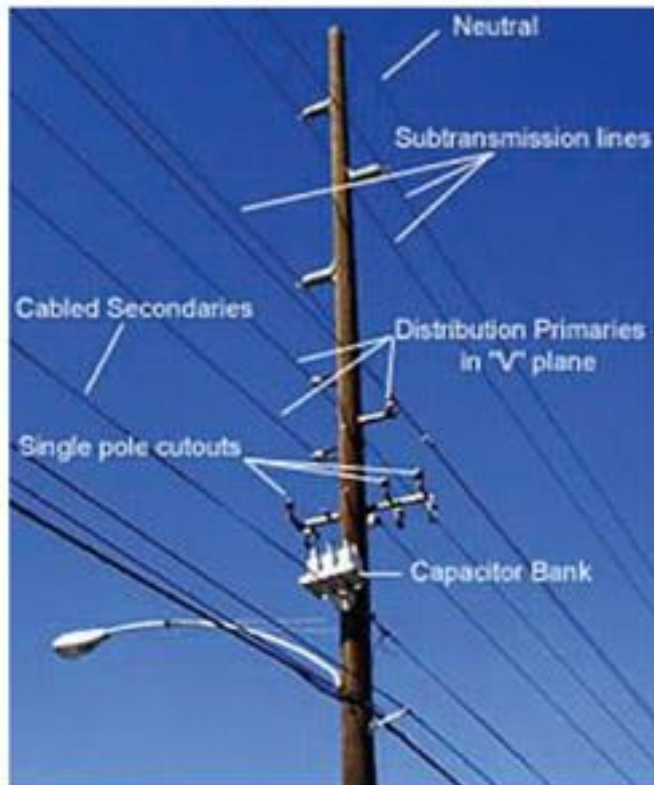
Σε πρώτη φάση, το σημαντικότερο είναι να υπάρχουν στην περιοχή τριφασικά καλώδια ρεύματος. Η πρόσβαση σε γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας είναι εξίσου σημαντική με το να έχει κανείς έναν εξαιρετικό αιολικό πόρο για να μπορέσει να φέρει την παραγόμενη ενέργεια στην αγορά. Ακριβώς όπως ένας αγρότης δεν μπορεί να φέρει στην αγορά τα προϊόντα που παράγει χωρίς χωρίς δρόμους ή σιδηροδρόμους και μεταφορικά μέσα, το αιολικό έργο δεν μπορεί να παραδώσει την ενέργειά του στην αγορά χωρίς πρόσβαση στο σύστημα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (Daniels, 2007).

Έτσι, το σημαντικότερο ίσως κομμάτι για τη δημιουργία ενός έργου είναι η διαδικασία επιλογής τοποθεσίας για το εν λόγω έργο. Ξεκινώντας λοιπόν, η αναζήτηση πρέπει να έχει ως αφετηρία της μία περιοχή με τριφασικές γραμμές ηλεκτρικού ρεύματος, όπου στη ίδια περιοχή θα πρέπει να υφίστανται άνεμοι. Σε διαφορετική περίπτωση, η διασύνδεση του έργου με το δίκτυο, μπορεί να είναι αποτρεπτική οικονομικά. Ανάλογα με την απαιτούμενη χωρητικότητα, οι νέες γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να κοστίζουν από 50.000\$ έως 200.000\$ ανά μίλι, ένα κόστος που θα προστεθεί στον προϋπολογισμό του έργου και είναι ιδιαίτερα υψηλό.

Στην περίπτωση όπου πρόκειται να συνδεθεί είτε ένας είτε δύο ανεμόμυλοι, συνιστάται η σύνδεση του έργου σε τάσεις επιπέδου διανομής, κάτι που γενικά δεν απαιτεί την κατασκευή υποσταθμού για το έργο. Η σύνδεση με το σύστημα μετάδοσης απαιτεί την κατασκευή ενός υποσταθμού που μπορεί να κοστίσει 1 εκατομμύριο δολάρια ή περισσότερο. Αυτή η πρόσθετη δαπάνη είναι συχνά πολύ μεγάλη για να παραμείνει κερδοφόρο ένα μικρότερο έργο. Τα μεγαλύτερα έργα πιθανότατα θα πρέπει να συνδεθούν σε γραμμές υψηλότερης τάσης επειδή απαιτούν περισσότερη ηλεκτρική χωρητικότητα από αυτή που μπορούν να παρέχουν οι γραμμές τάσης διανομής (Daniels, 2007).

Η παρατήρηση της θέσης των τριφασικών γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας είναι πολύ εύκολη. Ωστόσο, ο προσδιορισμός του εάν οι γραμμές έχουν αρκετή χωρητικότητα για να χειριστούν

την παραγόμενη ισχύ, δεν μπορεί να είναι σαφής από την οπτική παρατήρηση και περιλαμβάνει το μακρύ και δαπανηρό μέρος της διαδικασίας διασύνδεσης. Εάν οι γραμμές ανήκουν στο τοπικό βοηθητικό πρόγραμμα διανομής, συχνά ο υπεύθυνος προγραμματισμού διανομής θα έχει καλή αίσθηση της ποσότητας ενέργειας που υπάρχει στις γραμμές αυτήν τη στιγμή και μπορεί να είναι πρόθυμος να σας παράσχει μια αρχική ένδειξη για το πόσες δυνατότητες υπάρχουν για την προσθήκη του έργου στο τοπικό δίκτυο.



Subtransmission lines with distribution primaries and secondaries.

Photo: U.S. Department of Labor: Occupational Safety and Health Administration

Εικόνα 2.2: Γραμμές μεταφοράς με πρωτεύουσες και δευτερεύουσες γραμμές διανομής.

Είναι σημαντική η επικοινωνία με την πιθανή υπηρεσία διασύνδεσης και τον περιφερειακό Ανεξάρτητο Διαχειριστή Συστήματος (ISO) νωρίς στη διαδικασία σχεδιασμού. Η έγκαιρη και ανοιχτή επικοινωνία με αυτούς τους οργανισμούς είναι πολύτιμη για διάφορους λόγους:

- Μπορεί να βοηθήσει στην κατανόηση της λειτουργίας της διαδικασίας διασύνδεσης
- Το βοηθητικό πρόγραμμα μπορεί να κάνει συστάσεις με βάση την κατανόηση του δικτύου όπου επιθυμούμε σύνδεση
- Μπορεί να βοηθήσει ώστε το έργο να παραμείνει σε τροχιά ανάπτυξης με ελάχιστες καθυστερήσεις αναμένοντας τα αποτελέσματα της μελέτης διασύνδεσης.

Επί του παρόντος, χιλιάδες μεγαβάτ αιολικών έργων βρίσκονται σε κάποιο στάδιο των περισσότερων ουρών μελέτης διασύνδεσης σε δίκτυα. Μπορεί να υπάρχουν πολλά αιολικά έργα και σε άλλες θυελλώδεις περιοχές που υποβάλλουν αίτηση διασύνδεσης. Αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα καθυστερήσεις στα αποτελέσματα της μελέτης και μπορεί επίσης να έχει ως αποτέλεσμα το εκάστοτε έργο να μην μπορεί να συνδεθεί με τις υπάρχουσες γραμμές επειδή μπορεί να έχουν συμπληρωθεί από αιτούντες που βρίσκονται μπροστά από το κάθε έργο (Daniels, 2007).

2.6. Διασύνδεση μικρών ανεμογεννητριών

Σε πολλές περιπτώσεις, η διασύνδεση ενός έργου στο επίπεδο διανομής μπορεί να είναι πολύ ευκολότερη και λιγότερο δαπανηρή, για ένα έργο ενός ή δύο στροβίλων από τη διασύνδεση σε τάσεις επιπέδου μετάδοσης. Για παράδειγμα, αρκετές πολιτείες των ΗΠΑ (Καλιφόρνια, Μίσιγκαν, Μινεσότα, Νέα Υόρκη, Τέξας, Ουάσιγκτον και Ουισκόνσιν) έχουν ενθαρρύνει την καταναμημένη παραγωγή και τη συμπαραγωγή με υποστηρικτική νομοθεσία και κανονισμούς, επειδή, σε πολλές περιπτώσεις, αυτοί οι πόροι έχουν μικρότερο αντίκτυπο στο ηλεκτρικό δίκτυο και είναι λιγότερο δαπανηρή η διασύνδεση από τα μεγαλύτερα έργα.

Γενικά, χρειάζεται λιγότερος χρόνος για τον προγραμματισμό και απαιτεί μια απλούστερη διαδικασία διασύνδεσης για μικρότερα έργα. Αυτά μπορεί να είναι καλά νέα για μικρότερα αιολικά έργα. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι σε ορισμένες περιπτώσεις τα έργα έχουν σταματήσει ή εμποδίζεται να προχωρήσουν, επειδή οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας έχουν θεσπίσει δαπανηρές χρεώσεις για τη χρήση του συστήματος διανομής τους για την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτές οι χρεώσεις χρήσης συστήματος προκάλεσαν τελικά τον τερματισμό των έργων επειδή ήταν αδύνατο να διαπραγματευτεί μια συμφωνία αγοράς ενέργειας που θα παρείχε θετική ταμειακή ροή για τα έργα.

Τα περισσότερα αιολικά έργα κλίμακας μεγαβάτ πρέπει να ξεκινήσουν μια διαδικασία Περιφερειακού Διαχειριστή Μεταφοράς (RTO), αλλά εάν το προτεινόμενο έργο μπορεί να πληροί τα κρατικά πρότυπα διασύνδεσης καταναμημένης παραγωγής ή/και τα κριτήρια διασύνδεσης μικρής γεννήτριας RTO, τότε μπορεί να αποφευχθεί μεγάλο μέρος του κόστους και του χρόνου που σχετίζεται με τη διασύνδεση (Daniels, 2007).

2.7. Διαδικασία Περιφερειακού Διαχειριστή Μεταφοράς

Μέσω της πράξης της απορρύθμισης του κλάδου κοινής ωφέλειας, οι περιφερειακοί διαχειριστές μεταφοράς (RTO) διαμορφώθηκαν ως ρυθμιστικοί φορείς στο ηλεκτρικό δίκτυο που είναι «ανεξάρτητοι», από εταιρείες παραγωγής, μεταφοράς και διανομής. Οι περιφερειακοί διαχειριστές μεταφοράς αναπτύσσουν κανόνες για το δίκτυο που συμμορφώνονται με τους κρατικούς και εθνικούς κανονισμούς για την ασφάλεια, την ποιότητα, την αξιοπιστία και τις λειτουργίες του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και εκτελούν μελέτες για έργα που επιθυμούν να συνδεθούν στο δίκτυο. Αυτές οι μελέτες περιγράφουν τις επιπτώσεις που θα έχει το έργο σας στην ποιότητα ισχύος του δικτύου και σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης σε περίπτωση που αποτύχουν εξαρτήματα στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, όπως γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας, μετασχηματιστές, άλλες γεννήτριες, κ.λπ., ασφάλειες, διακόπτες, ρελέ, διακόπτες, κ.λπ.) πρέπει να ληφθούν για να αποτρέψουν το κάθε έργο από το να δημιουργήσει δυσμενείς επιπτώσεις στο δίκτυο. Ταυτόχρονα προϋπολογίζουν το πόσο θα κοστίσουν αυτές οι ενέργειες στο εκάστοτε έργο (Daniels, 2007).

2.8. Μελέτη Σκοπιμότητας

Μετά την αρχική συνάντηση οριοθέτησης, η Μελέτη Σκοπιμότητας RTO θα εντοπίσει πιθανές δυσμενείς επιπτώσεις του συστήματος που προκύπτουν από τη διασύνδεση του έργου σας, συμπεριλαμβανομένης ανάλυσης βραχυκυκλώματος, θερμικής και τάσης. Αυτό είναι το σημείο όπου ένας ηλεκτρολόγος μηχανικός με μεγάλη εμπειρία σε συστήματα ισχύος μπορεί να σας βοηθήσει να κατανοήσετε και να διαπραγματευτείτε τη διαδικασία διασύνδεσης του κάθε έργου (Daniels, 2007).

Στη συνέχεια, καθορίζεται μια εκτίμηση κόστους και το πεδίο εφαρμογής της Μελέτης Σκοπιμότητας, λαμβάνοντας υπόψη τον τύπο, το μέγεθος και τις πιθανές μεγαλύτερες επιπτώσεις του συστήματος με βάση τα τεχνικά πρότυπα και κριτήρια διασύνδεσης. Σε αυτό το σημείο, ο κοινοτικός προγραμματιστής ανέμου θα είναι υπεύθυνος για:

- Επιστροφή της εκτελεσθείσας συμφωνίας στον περιφερειακό διαχειριστή μεταφοράς, συμπεριλαμβανομένων των τεχνικών δεδομένων της γεννήτριας, τα οποία μπορείτε να λάβετε από τον κατασκευαστή του στροβίλου και
- Καταβολή κατάθεσης για τη μελέτη

2.9. Μελέτη Επιπτώσεων Συστήματος

Η μελέτη επιπτώσεων του συστήματος θα περιλαμβάνει ανάλυση ροής ισχύος, βραχυκυκλώματος, τάσης, ευστάθειας και προστασίας συστήματος. Αυτές οι αναλύσεις είναι παρόμοιες με εκείνες που παρουσιάστηκαν στη μελέτη σκοπιμότητας, αλλά διαφέρουν ως προς το ότι τα αποτελέσματα θα περιλαμβάνουν μια προκαταρκτική ένδειξη του κόστους και του χρόνου που θα ήταν απαραίτητο για τη διόρθωση τυχόν προβλημάτων που εντοπίστηκαν κατά την ανάλυση και την υλοποίηση της διασύνδεσης (Daniels, 2007).

Για μικρά έργα αυτή η μελέτη μπορεί να μην απαιτείται. Εάν απαιτείται, μπορεί να κοστίζει από 500\$ έως 50.000\$. Είναι πολύ συγκεκριμένη για κάθε έργο, ανάλογα με τις δυνατότητες του έργου σας να επηρεάσει το μεγαλύτερο σύστημα, όπως περιγράφεται στη μελέτη σκοπιμότητας, και σε ποια ομάδα μελέτης τοποθετείται το εκάστοτε έργο. Εάν απαιτείται η συγκεκριμένη μελέτη, τα αποτελέσματα τίθενται στη διάθεσή των ενδιαφερομένων σύμφωνα με το χρονοδιάγραμμα διασύνδεσης. Μπορεί να χρειαστεί περισσότερος χρόνος για τη λήψη των αποτελεσμάτων της μελέτης, εάν το έργο προτείνει τη διασύνδεση σε περιοχές με υψηλή συμφόρηση όπου έχουν υποβληθεί πολλά άλλα αιτήματα διασύνδεσης γεννητριών.

Οι μελέτες επιπτώσεων του συστήματος μεγάλων γεννητριών έχουν παρόμοιο χρονικό πλαίσιο (45 ημερολογιακές ημέρες), αλλά είναι πιθανό να έχουν μεγαλύτερο εύρος και να είναι πιο ακριβές επειδή ένα μεγαλύτερο έργο έχει πιο σημαντικές πιθανές επιπτώσεις στο δίκτυο. Το πρόγραμμα πληρωμών για αυτήν τη μελέτη θα καταρτιστεί σε συναντήσεις πριν από τη μελέτη, στις οποίες περιγράφονται οι λεπτομέρειες και το κόστος της μελέτης (Daniels, 2007).

2.10. Μελέτη Εγκαταστάσεων

Η Μελέτη Εγκατάστασης θα καθορίσει και θα εκτιμήσει το κόστος και το χρονοδιάγραμμα για τις τροποποιήσεις που απαιτούνται για την εφαρμογή των συστάσεων από τη Μελέτη Επιπτώσεων Συστήματος (Daniels, 2007).

Οι μικρές γεννήτριες που θέλουν να διασυνδεθούν ενδέχεται να χρειαστεί να καταθέσουν ολόκληρο το εκτιμώμενο κόστος της μελέτης της εγκατάστασης. Το χρονικό πλαίσιο για την επιστροφή των αποτελεσμάτων για αυτήν τη μελέτη κυμαίνεται από εβδομάδες έως και μήνες.

Για μεγάλα έργα, το κόστος και το χρονοδιάγραμμα πληρωμών για την εκτέλεση αυτής της μελέτης καθορίζονται σε μια συνάντηση πριν από τη μελέτη με τον περιφερειακό διαχειριστή μεταφοράς, τις επηρεαζόμενες επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας και το έργο. Ένα τυπικό ποσό κατάθεσης είναι 100.000\$ για τη μελέτη εγκατάστασης για έργα μεγέθους άνω των 20MW. Το χρονικό πλαίσιο δεν είναι τυπικό για μεγάλα έργα και ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με τις επιπτώσεις του συστήματος του έργου και τις απαιτούμενες αναβαθμίσεις. Είναι καλό να προγραμματίζεται γενικότερα κάποιος επιπλέον χρόνος στο χρονοδιάγραμμα του έργου σε περίπτωση που αυτό το τμήμα της μελέτης διαρκέσει περισσότερο από το αναμενόμενο (Daniels, 2007).

2.11. Προαιρετική Μελέτη

Τα έργα διασύνδεσης ενδέχεται να επιλέξουν τη διεξαγωγή πρόσθετης μελέτης για τον προσδιορισμό των επιπτώσεων των εναλλακτικών διαμορφώσεων συστήματος ή του πρόσθετου κόστους ή των οφελών του συστήματος από το έργο. Αυτό, όπως όλες οι άλλες μελέτες, θα περιλαμβάνει μια συνάντηση για το πεδίο εφαρμογής και μια οικονομική κατάθεση για τη μελέτη. Η απαιτούμενη κατάθεση και το χρονοδιάγραμμα πληρωμών εξαρτώνται από το εύρος και το εκτιμώμενο κόστος διεξαγωγής της μελέτης (Daniels, 2007).

2.12. Συμφωνία Διασύνδεσης

Η εκτέλεση της συμφωνίας διασύνδεσης είναι το τελικό βήμα, το οποίο περιλαμβάνει τη συμφωνία πληρωμής για αναβαθμίσεις συστήματος, όπως περιγράφεται στις προηγούμενες μελέτες. Θα πρέπει να ζητηθούν νομικές συμβουλές καθώς και διαβούλευση από τον μηχανικό του κάθε έργου ώστε να υπάρξει βεβαίωση ότι οι όροι της σύμβασης είναι αποδεκτοί. Γενικά, το βοηθητικό πρόγραμμα διασύνδεσης θα είναι υπεύθυνο για την εκτέλεση όλων των εργασιών για την τροποποίηση του ηλεκτρικού δικτύου ώστε να δέχεται την ισχύ από το κάθε έργο. Το κάθε έργο, ωστόσο, είναι υπεύθυνο για το κόστος των διαφόρων αναβαθμίσεων, ένα κόστος το οποίο μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντικό. Είναι ζωτικής σημασίας να εξετάζονται όλες οι προτεινόμενες αναβαθμίσεις στο σύστημα για να υπάρξει βεβαίωση ότι σχετίζονται άμεσα με το έργο και δεν αποτελούν διαφορετικό μέρος (Daniels, 2007).

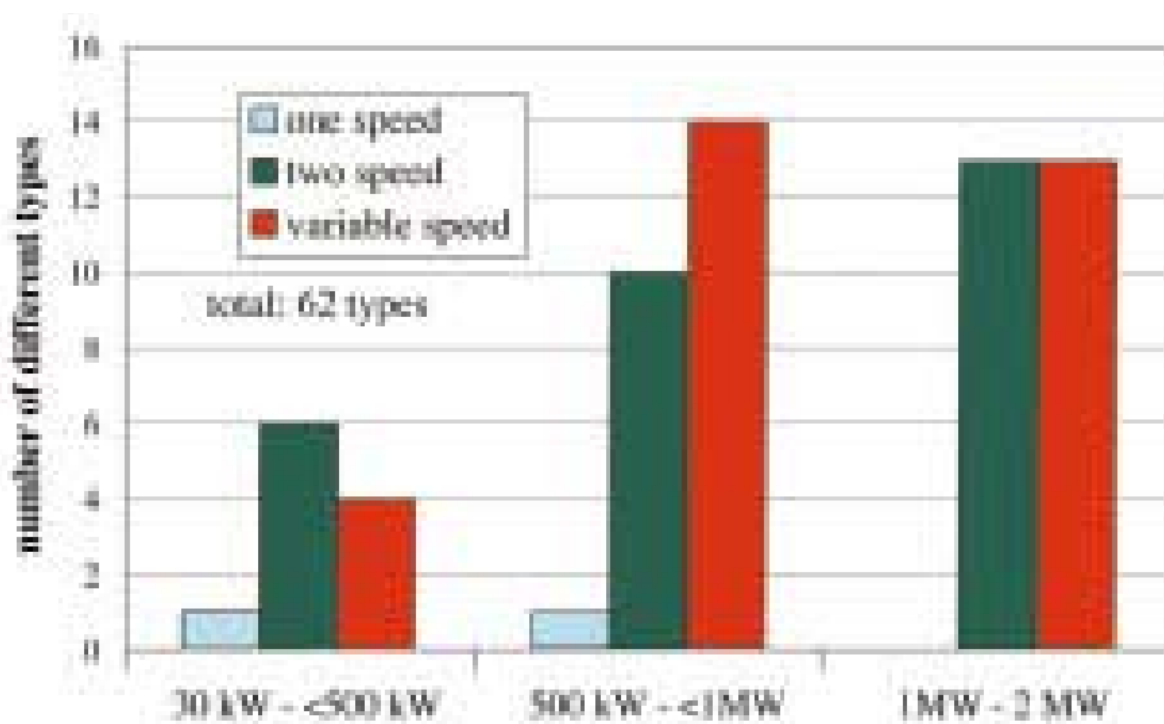
Πρέπει να σημειωθεί ότι μια συμφωνία διασύνδεσης δεν είναι συμφωνία αγοράς ρεύματος. Μια συμφωνία αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι μια σύμβαση που υπογράφεται μεταξύ της κοινής ωφελείας αγορών ηλεκτρικής ενέργειας και της ειδικής παραγωγής ενέργειας για την πώληση ενέργειας. Τα έργα μπορούν να κινηθούν μέσω της ουράς διασύνδεσης χωρίς υπογεγραμμένη συμφωνία αγοράς ρεύματος. Ορισμένα αιολικά έργα αναπτύσσονται επί του παρόντος σε απελευθερωμένες αγορές ηλεκτρικής ενέργειας ως εμπορικές εγκαταστάσεις.

Οι εμπορικές μονάδες πωλούν την ισχύ τους στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας με τις τρέχουσες τιμές της αγοράς. Αυτός ο τύπος ρύθμισης έχει το πλεονέκτημα ότι δεν χρειάζεται να διαπραγματευτεί μια μακροπρόθεσμη τιμή για την ηλεκτρική ενέργεια που θα καταστήσει ένα έργο οικονομικά εφικτό, αλλά έχει τον κίνδυνο να εκθέσει σε κάποιες περιπτώσεις το έργο στις ασταθείς διακυμάνσεις των τιμών της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας (Daniels, 2007).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΓΙΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

3.1. Γενικά

Η μετατροπή ενέργειας των πιο σύγχρονων ανεμογεννητριών μπορεί να χωριστεί σε δύο βασικές έννοιες, μηχανές σταθερής ταχύτητας με μία ή δύο ταχύτητες και μηχανές μεταβλητής ταχύτητας. Εάν ο αριθμός των σχεδίων μηχανών σε μια δεδομένη κατηγορία μπορεί να ληφθεί ως οδηγός, οι προτιμώμενες έννοιες είναι η μεταβλητή ταχύτητα και οι μηχανές δύο ταχυτήτων (σχήμα 3.1). (EEDD, 2001).



Σχήμα 3.1: Αριθμός διαφορετικών τύπων ανεμογεννητριών στην αγορά της Γερμανίας το έτος 2000

3.2. Ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας

Στις ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας η γεννήτρια συνδέεται απευθείας με το δίκτυο τροφοδοσίας. Η συχνότητα του πλέγματος καθορίζει την ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας και συνεπώς του ρότορα. Η χαμηλή ταχύτητα περιστροφής του ρότορα n_{rotor}

μεταφράζεται στην ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας $n_{generator}$ από ένα κιβώτιο ταχυτήτων με λόγο μετάδοσης r . Η ταχύτητα της γεννήτριας εξαρτάται από τον αριθμό των ζευγών πόλων p και τη συχνότητα του πλέγματος $f_{πλέγματος}$.

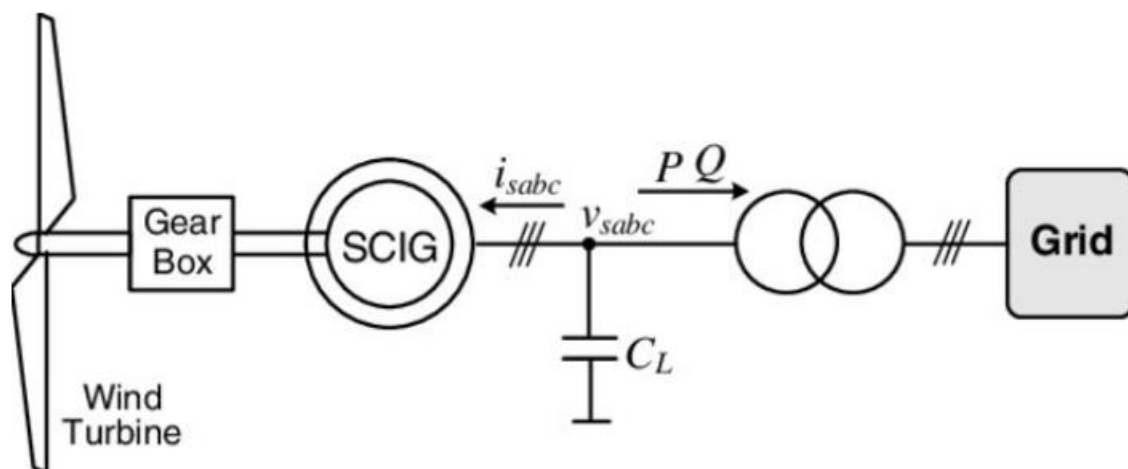
$$n_{rotor} = \frac{n_{generator}}{r}$$

$$n_{generator} = \frac{f_{grid}}{p}$$

$$n_{rotor} = \frac{f_{grid}}{r \cdot p}$$

Οι λεπτομέρειες για τις μηχανές σταθερής ταχύτητας απεικονίζονται στο σχήμα 3.2. Τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα μίας ανεμογεννήτριας με επαγωγικές γεννήτριες είναι η απλή και φθηνή κατασκευή. Επιπλέον, δεν απαιτείται συσκευή συγχρονισμού. Με εξαίρεση τα ρουλεμάν δεν υπάρχουν εξαρτήματα που φθείρονται.

Τα μειονεκτήματα των γεννητριών επαγωγής, είναι τα υψηλά ρεύματα εκκίνησης, τα οποία συνήθως εξομαλύνονται από έναν ελεγκτή θυρίστορ, και την απαίτησή τους για άεργο ισχύ (EEDD, 2001).



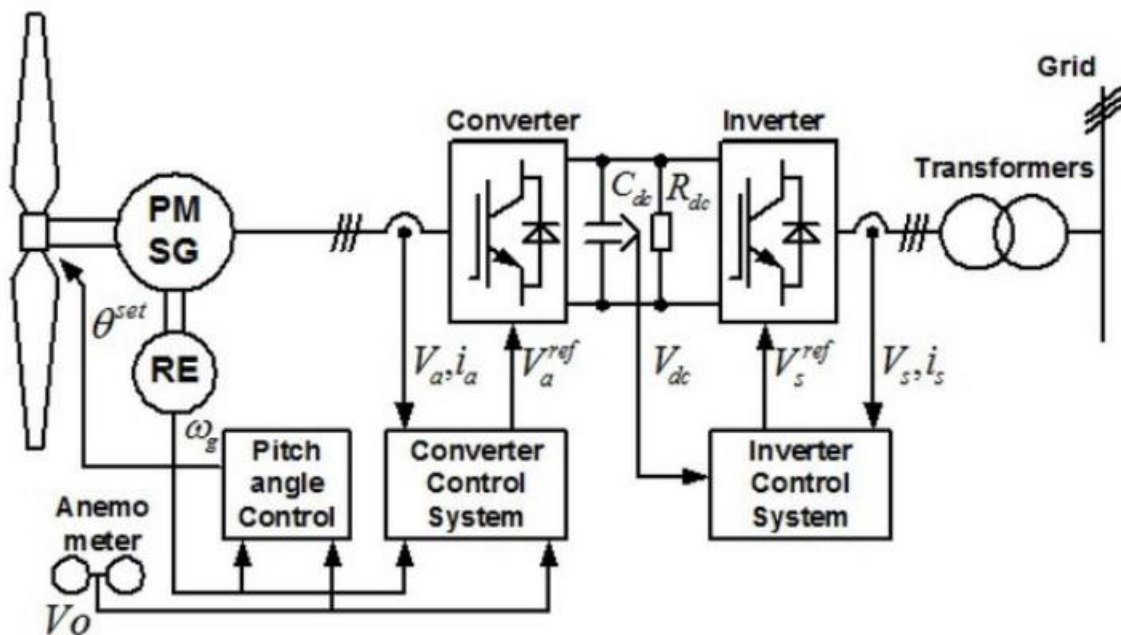
Σχήμα 3.2. Βασικά μέρη ανεμογεννήτριας σταθερής ταχύτητας

3.3. Ανεμογεννήτριες Μεταβλητής ταχύτητας

Σε ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας η γεννήτρια συνδέεται στο δίκτυο με ηλεκτρονικό σύστημα μετατροπέα. Για σύγχρονες γεννήτριες και για γεννήτριες επαγωγής χωρίς δακτυλίους ολίσθησης, αυτό το σύστημα μετατροπέα συνδέεται μεταξύ του στάτορα της γεννήτριας και του δικτύου (Σχήμα. 3.3), όπου η συνολική παραγωγή ενέργειας πρέπει να τροφοδοτηθεί μέσω του μετατροπέα.

Για επαγωγικές γεννήτριες με δακτυλίους ολίσθησης, ο στάτορας της γεννήτριας συνδέεται απευθείας στο δίκτυο. Μόνο ο ρότορας της γεννήτριας συνδέεται στο δίκτυο με ηλεκτρονικό μετατροπέα. Αυτό δίνει το πλεονέκτημα ότι μόνο ένα μέρος της παραγωγής ισχύος τροφοδοτείται μέσω του μετατροπέα. Αυτό σημαίνει ότι η ονομαστική ισχύς του συστήματος μετατροπέα μπορεί να είναι μικρότερη από την ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας.

Γενικά, η ονομαστική ισχύς του μετατροπέα είναι το μισό της ισχύος της ανεμογεννήτριας, επιτρέποντας μια διακύμανση της ταχύτητας του ρότορα στο εύρος της μισής ονομαστικής ταχύτητας (EEDD, 2001).



Σχήμα 3.3. Βασικά μέρη ανεμογεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας

Με τον έλεγχο της ενεργού ισχύος του μετατροπέα, είναι δυνατό να μεταβάλλεται η ταχύτητα περιστροφής του γεννήτριας και επομένως του ρότορα της ανεμογεννήτριας.

3.4. Συστήματα μετατροπών

Εάν η ανεμογεννήτρια λειτουργεί με μεταβλητή ταχύτητα περιστροφής, η ηλεκτρική συχνότητα της γεννήτριας ποικίλλει και επομένως πρέπει να αποσυνδεθεί από τη συχνότητα του δικτύου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με ένα σύστημα μετατροπέα. Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι συστημάτων μετατροπών:

- συστήματα μετατροπών με μεταγωγή δικτύου και
- συστήματα μετατροπών με εναλλαγή μέσω δικτύου.

Οι μετατροπείς με μεταγωγή δικτύου είναι κυρίως μετατροπείς θυρίστορ, π.χ. 6 ή 12 παλμικοί. Αυτός ο τύπος μετατροπέα παράγει ακέραιες αρμονικές όπως 5ης, 7ης, 11ης, 13ης τάξης κ.λπ. (συχνότητες 250, 350, 550, 650 Hz,...), οι οποίες γενικά πρέπει να μειωθούν με αρμονικά φίλτρα. Από την άλλη, οι μετατροπείς θυρίστορ δεν είναι σε θέση να ελέγξουν την άεργο ισχύ.

Τα συστήματα μετατροπών αυτομετατροπής είναι κυρίως παλμικοί μετατροπείς διαμορφωμένου πλάτους (PWM). Αυτός ο τύπος μετατροπέα δίνει το πλεονέκτημα, εκτός του ελέγχου της ενεργού ισχύος και τον έλεγχο της άεργου ισχύος. Αυτό σημαίνει την άεργη ισχύς που ζητάται από τη γεννήτρια, μπορεί να παραδοθεί από τον αντιστροφέα (PWM-inverter). Ένα μειονέκτημα είναι η παραγωγή διααρμονικών. Γενικά αυτές οι διααρμονικές παράγονται από τον μετατροπέα στην περιοχή ορισμένων kHz. Επομένως, τα φίλτρα είναι απαραίτητα για τη μείωση των διααρμονικών. Ωστόσο, λόγω των υψηλών συχνοτήτων, γενικά η κατασκευή των φίλτρων είναι πιο εύκολη.

Στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιείται γενικά τρανζίστορ αποκλειστικά βασιζόμενα σε συστήματα μετατροπέα (inverter) (EEDD, 2001).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

4.1. Γενικά

Το σύγχρονο δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα ιδιαίτερα σύνθετο σύστημα. Ο κάπως ασαφής όρος "ποιότητα ισχύος" χρησιμοποιείται για να περιγράψει την αλληλεπίδραση μεταξύ των παραδοσιακών παραγωγών ενέργειας που λειτουργούν με καύση ορυκτών, πυρηνικών ή υδροηλεκτρικών σταθμών και των καταναλωτών. Οι καταναλωτές μπορεί να είναι είτε μεγάλοι (βαριά βιομηχανία, τήξη μετάλλων κ.λπ) είτε μικροί (κατοικίες).

Τα τελευταία δέκα χρόνια, ο αριθμός των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας παρουσιάζει σταθερή αύξηση. Πηγές όπως η ηλιακή ενέργεια (φωτοβολταϊκά συστήματα) ή η αιολική ενέργεια, έχουν προστεθεί στα ενεργειακά συστήματα. Ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα του ηλεκτρισμού είναι ότι δεν μπορεί να αποθηκευτεί ως έχει, ενώ πρέπει κάθε στιγμή να υπάρχει ισορροπία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης. Τεχνολογίες «αποθήκευσης» όπως μπαταρίες κ.λπ, έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό: Η αποθήκευση γίνεται με μετατροπή της ενέργειας σε άλλες μορφές, όπως χημική (μπαταρίες), δυναμική ενέργεια με τη μορφή νερού σε υψηλή αποθήκευση (αποθήκευση αντλίας) και υδρογόνο (κυψέλες καυσίμου). Όλες οι ανανεώσιμες πηγές παράγουν όταν η πηγή είναι διαθέσιμη. Για παράδειγμα, στην αιολική ενέργεια, η ενέργεια παράγεται όταν φυσάει ο άνεμος. Αυτό χαρακτηριστικό έχει μικρή έως καθόλου σημασία όταν η ποσότητα της αιολικής ενέργειας είναι μέτρια σε σύγκριση με την συνολική εγκατεστημένη δυναμικότητα ελεγχόμενων σταθμών ηλεκτροπαραγωγής, αλλά μεταβάλλεται σε σημαντικό τεχνικό εμπόδιο καθώς το τμήμα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αυξάνεται για να καλύψει ένα μεγάλο μέρος του συνόλου ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα.

Σε τοπικό επίπεδο, οι διακυμάνσεις τάσης είναι το κύριο πρόβλημα που σχετίζεται με την αιολική ενέργεια. Κανονική στατική οι ανοχές στα επίπεδα τάσης είναι $\pm 10\%$. Ωστόσο, γρήγορες μικρές παραλλαγές γίνονται ενοχλήσεις σε χαμηλά επίπεδα (έως 0,3%) και σε αδύναμα πλέγματα – όπως συχνά συναντάται σε απομακρυσμένες περιοχές όπου οι συνθήκες ανέμου είναι οι καλύτερες. Αυτός μπορεί να είναι ο περιοριστικός παράγοντας για την ποσότητα αιολικής ενέργειας που μπορεί να εγκατασταθεί. Αυτός μπορεί να είναι ένας περιοριστικός παράγοντας για την ποσότητα της αιολικής ενέργειας που μπορεί να εγκατασταθεί. Στη συνέχεια, γίνεται ανάλυση για κάθε μία από τις ηλεκτρικές παραμέτρους

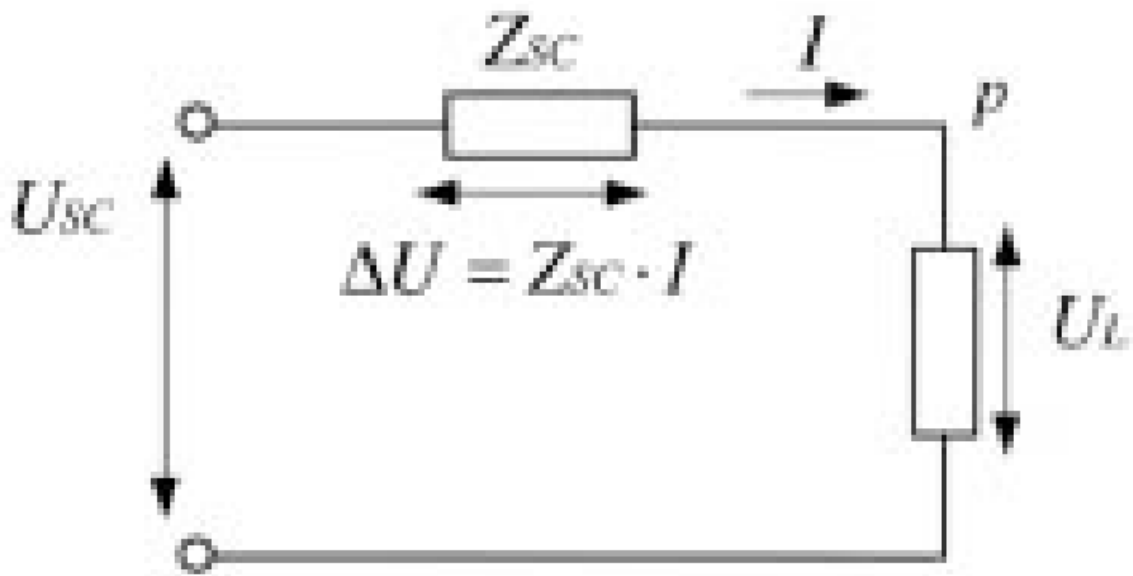
που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό της ποιότητας τάσης σε ένα δεδομένο σημείο στο ηλεκτρικό σύστημα τροφοδοσίας.

4.2. Επίπεδο ισχύος Βραχυκυκλώματος

Το επίπεδο ισχύος βραχυκυκλώματος σε ένα δεδομένο σημείο του ηλεκτρικού δικτύου είναι ένα μέτρο της ισχύος του και ενώ δεν αποτελεί άμεση παράμετρο της ποιότητας τάσης, έχει μεγάλη επιρροή. Η ικανότητα του δικτύου να απορροφά τις διαταραχές σχετίζεται άμεσα με το σύντομο επίπεδο ισχύος του εν λόγω σημείου του κυκλώματος. Κάθε σημείο (**p**) στο δίκτυο μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ισοδύναμο κύκλωμα (Σχήμα 4.1). Μακριά από το εν λόγω σημείο, η τάση μπορεί να θεωρηθεί σταθερή δηλαδή δεν επηρεάζεται από τις συνθήκες στο **p**. Η τάση σε αυτό το απομακρυσμένο σημείο ορίζεται ως U_{sc} και το επίπεδο ισχύος βραχυκυκλώματος S_{sc} σε MVA μπορεί να βρεθεί ως U_{sc}^2 / Z_{sc} όπου Z_{sc} είναι η σύνθετη αντίσταση γραμμής. Οι διακυμάνσεις στο φορτίο (ή στην παραγωγή) στο **p** προκαλούν διακυμάνσεις του ρεύματος στη γραμμή και αυτές με τη σειρά τους μια μεταβαλλόμενη πτώση τάσης (ΔU) πάνω από την σύνθετη αντίσταση γραμμής Z_{sc} . Η τάση στο **p** (U_L) είναι η διαφορά μεταξύ U_{sc} και ΔU και αυτή η προκύπτουσα τάση φαίνεται από άλλους καταναλωτές που συνδέονται με το **p**.

Πίνακας 4.1: Σχεδιασμός «τρεμοπαίγματος» και επίπεδα εκπομπών για μέση τάση (MV) και υψηλή τάση (HV)

Flicker severity factor	Planning levels		Emmission levels
	MV	HV	MV and HV
P_{st}	0.9	0.8	0.35
P_{lt}	0.7	0.6	0.25



Εικόνα 4.1: ισοδύναμο κύκλωμα

Ισχυρά και/ή αδύναμα δίκτυα είναι όροι που χρησιμοποιούνται συχνά σε σχέση με εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας. Είναι προφανές από το σχήμα 4.1, ότι εάν η σύνθετη αντίσταση Z_{sc} είναι μικρή τότε οι διακυμάνσεις τάσης στο p θα είναι μικρές (το δίκτυο είναι ισχυρό) και κατά συνέπεια, εάν το Z_{sc} είναι μεγάλο, τότε οι διακυμάνσεις της τάσης θα είναι μεγάλες.

Για κάθε δεδομένη εγκατάσταση αιολικής ενέργειας εγκατεστημένης ισχύος P (MW) ο λόγος $R_{sc} = S_{sc} / P$ είναι ένα μέτρο της αντοχής. Το δίκτυο είναι ισχυρό σε σχέση με την εγκατάσταση εάν το R_{sc} είναι πάνω από 20 έως 25 φορές και ασθενές όταν το R_{sc} είναι κάτω από 8 έως 10 φορές.

Ανάλογα με τον τύπο του ηλεκτρικού εξοπλισμού της ανεμογεννήτριας, μερικές φορές μπορεί να λειτουργήσει με επιτυχία ακόμη και υπό αδύναμες συνθήκες. Προσοχή πρέπει να δίνεται πάντα, ειδικά όταν πρόκειται για μεμονωμένες ή λίγες ανεμογεννήτριες, καθώς τείνουν να είναι σχετικά πιο «ενοχλητικές» σε σχέση με τις εγκαταστάσεις με πολλές μονάδες.

4.3. Διακυμάνσεις τάσης και τρεμόπαιγμα

Οι διακυμάνσεις τάσης που προκαλούνται από κυμαινόμενα φορτία και/ή η παραγωγή είναι η πιο κοινή αιτία παραπόνων για την ποιότητα της τάσης. Πολύ μεγάλες διαταραχές μπορεί να προκληθούν στις περιπτώσεις βιομηχανιών με μηχανήματα τήξης ή συγκόλλησης και στις

περιπτώσεις συχνής εκκίνησης (μεγάλων) κινητήρων. Στις αργές διακυμάνσεις τάσης εντός του κανονικού $-10+6\%$ η ζώνη ανοχής δεν είναι ενοχλητική και χωρίς να είναι σπάνιες (λίγες φορές την ημέρα) οι αλλαγές βημάτων προς τα πάνω έως 3% , αν και πολλές φορές είναι ορατές ακόμη και με γυμνό μάτι.

Οι γρήγορες και μικρές παραλλαγές ονομάζονται τρεμόπαιγμα. Η αξιολόγηση του τρεμοπαίγματος βασίζεται στο IEC 1000-3-7, το οποίο δίνει οδηγίες για τα όρια εκπομπών για κυμαινόμενα φορτία σε μέση τάση (MV, δηλ. τάσεις μεταξύ 1 και 36 kV) και υψηλή τάση (HV, δηλ. τάσεις μεταξύ 36 και δίκτυα 230 kV). Η βάση για την αξιολόγηση είναι η μετρημένη καμπύλη (εικόνα 4.2) που δίνει το όριο της ορατότητας για ορθογώνιες αλλαγές τάσης που εφαρμόζονται σε μια λάμπα πυρακτώσεως. Όταν οι ενοχλήσεις είναι ορατές λέγεται ότι ο συντελεστής σοβαρότητας τρεμοπαίσματος είναι $P_{st} = 1$ (P_{st} για P βραχυπρόθεσμα). Οι συνιστώμενες τιμές δίνονται στον πίνακα 4.1.

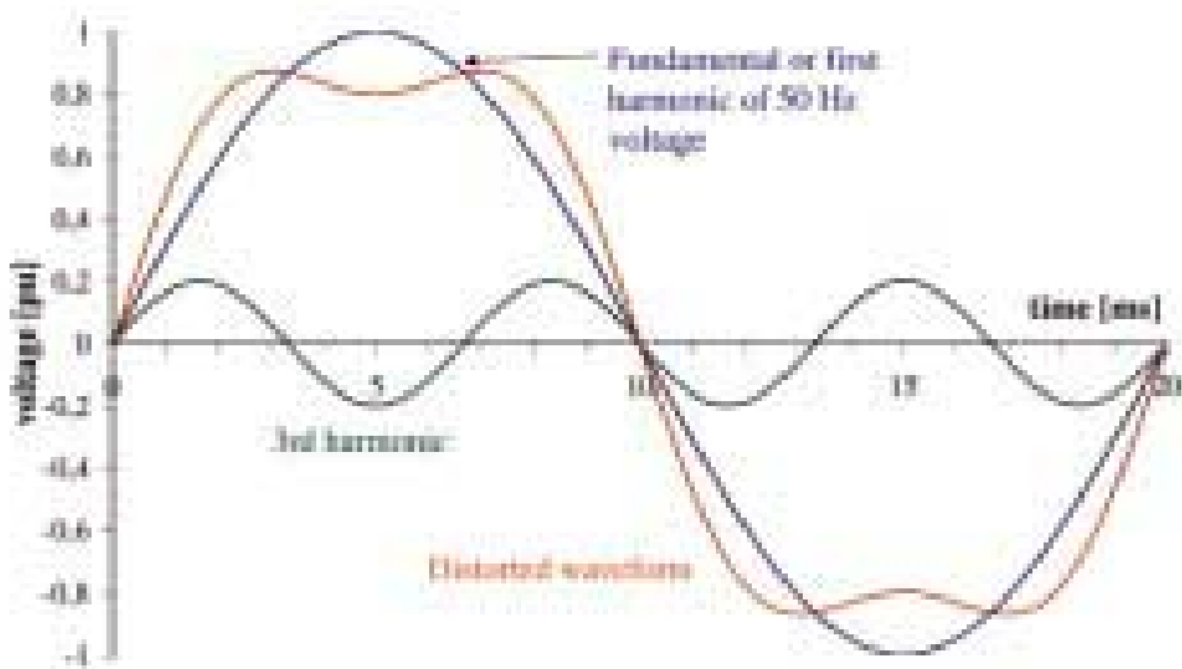
Ο προσδιορισμός της εκπομπής τρεμοπαίγματος βασίζεται πάντα στη μέτρηση. Το IEC 61000-4-15 καθορίζει ένα τρεμόμετρο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση του τρεμοπαίγματος απευθείας. Δεδομένου ότι το τρεμόπαιγμα στη γενική κατάσταση είναι το αποτέλεσμα του τρεμουλιάσματος που υπάρχει ήδη στο δίκτυο και των εκπομπών που πρέπει να μετρηθούν, μια άμεση μέτρηση απαιτεί αδιατάρακτη τροφοδοσία σταθερής σύνθετης αντίστασης και αυτό δεν είναι εφικτό για τις μεγάλες και πολύ μεγάλες ανεμογεννήτριες λόγω του μεγέθους τους. Αντίθετα, η μέτρηση του τρεμούλιασμα βασίζεται σε μετρήσεις τριών στιγμιαίων τάσεων και ρευμάτων φάσης που ακολουθούνται από αναλυτικό προσδιορισμό του P_{st} για διαφορετικές γωνίες σύνθετης αντίστασης δικτύου μέσω ενός «αλγόριθμου τρεμοπαίγματος» - ενός προγράμματος που προσομοιώνει το τρεμομετρητή IEC.

4.3. Αρμονικές

Οι αρμονικές είναι ένα φαινόμενο που σχετίζεται με την παραμόρφωση του θεμελιώδους ημιτονοειδούς κύματος των τάσεων του δικτύου, το οποίο είναι καθαρά ημιτονοειδές στην ιδανική κατάσταση.

Η ιδέα προέρχεται από τον Γάλλο μαθηματικό Josef Fourier που στις αρχές του 1800 ανακάλυψε ότι οποιαδήποτε περιοδική συνάρτηση μπορεί να εκφραστεί ως άθροισμα ημιτονικών καμπυλών με διαφορετικές συχνότητες που κυμαίνονται από τη θεμελιώδη συχνότητα - την πρώτη αρμονική - και ακέραια πολλαπλάσια αυτής, όπου ο ακέραιος

δηλώνει τον αρμονικό αριθμό. Στην εικόνα 4.3, παρουσιάζεται η παραμόρφωση στη θεμελιώδη τάση των 50 Hz προσθέτοντας 20% τρίτη αρμονική (150Hz) στην κυματομορφή.



Εικόνα 4.2: Παραμόρφωση από 3^η αρμονική

Οι αρμονικές διαταραχές παράγονται από πολλούς τύπους ηλεκτρολογικού εξοπλισμού. Ανάλογα με τις αρμονικές τάξεις μπορεί να προκαλέσουν διαφορετικούς τύπους ζημιάς σε κάθε τύπο ηλεκτρικού εξοπλισμού. Όλες οι αρμονικές προκαλούν αυξημένα ρεύματα και πιθανή καταστροφική υπερθέρμανση στους πυκνωτές όπως η σύνθετη αντίσταση ενός πυκνωτή μειώνεται αναλογικά στην αύξηση της συχνότητας. Οι αρμονικές 3^{ης} τάξης, και βέβαια τα μεγαλύτερα πολλαπλάσια του 3 μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα την υπερθέρμανση του δικτύου. Οι υψηλότερες αρμονικές μπορεί περαιτέρω να προκαλέσουν αυξημένο θόρυβο σε αναλογικά τηλεφωνικά κυκλώματα.

4.5. Συχνότητα

Τα ηλεκτρικά συστήματα παροχής και διανομής που χρησιμοποιούνται σήμερα παγκοσμίως βασίζονται σε εναλλασσόμενες τάσεις και ρεύματα (συστήματα AC). Δηλαδή, η τάση αλλάζει συνεχώς μεταξύ θετικής και αρνητικής πολικότητας και το ρεύμα την κατεύθυνσή του. Ο αριθμός των αλλαγών ανά δευτερόλεπτο ορίζεται ως η συχνότητα του συστήματος με τη μονάδα Hz. Στην Ευρώπη η συχνότητα είναι 50 Hz ενώ είναι 60 Hz σε πολλά άλλα μέρη

στον κόσμο. Η συχνότητα του συστήματος είναι ανάλογη με την ταχύτητα περιστροφής των σύγχρονων γεννητριών που λειτουργούν στο σύστημα και - εκτός από έναν ακέραιο ζυγό παράγοντα ανάλογα με τη σχεδίαση της μηχανής - ουσιαστικά λειτουργούν με την ίδια ταχύτητα: Είναι συγχρονισμένες.

Η αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου στο σύστημα τείνει να φρενάρει τις γεννήτριες και η συχνότητα πέφτει. Ο έλεγχος συχνότητας του συστήματος στη συνέχεια αυξάνει τη ροπή σε ορισμένες γεννήτριες έως ότου αποκατασταθεί η ισορροπία και η συχνότητα είναι ξανά 50Hz.

Οι απαιτήσεις για τον έλεγχο συχνότητας στο δίκτυο της Ευρώπης καθορίζονται στους κανόνες της UCPTÉ (Ένωση για τον Συντονισμό της Παραγωγής και Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας). Η περιοχή χωρίζεται σε διάφορες ζώνες ελέγχου η καθεμία με τον δικό της πρωτεύοντα και δευτερεύοντα έλεγχο.

Ο κύριος έλεγχος δρα σε γρήγορες αποκλίσεις συχνότητας, με σκοπό τη διατήρηση της ισορροπίας μεταξύ της στιγμιαίας κατανάλωσης ενέργειας και της παραγωγής για ολόκληρη την περιοχή.

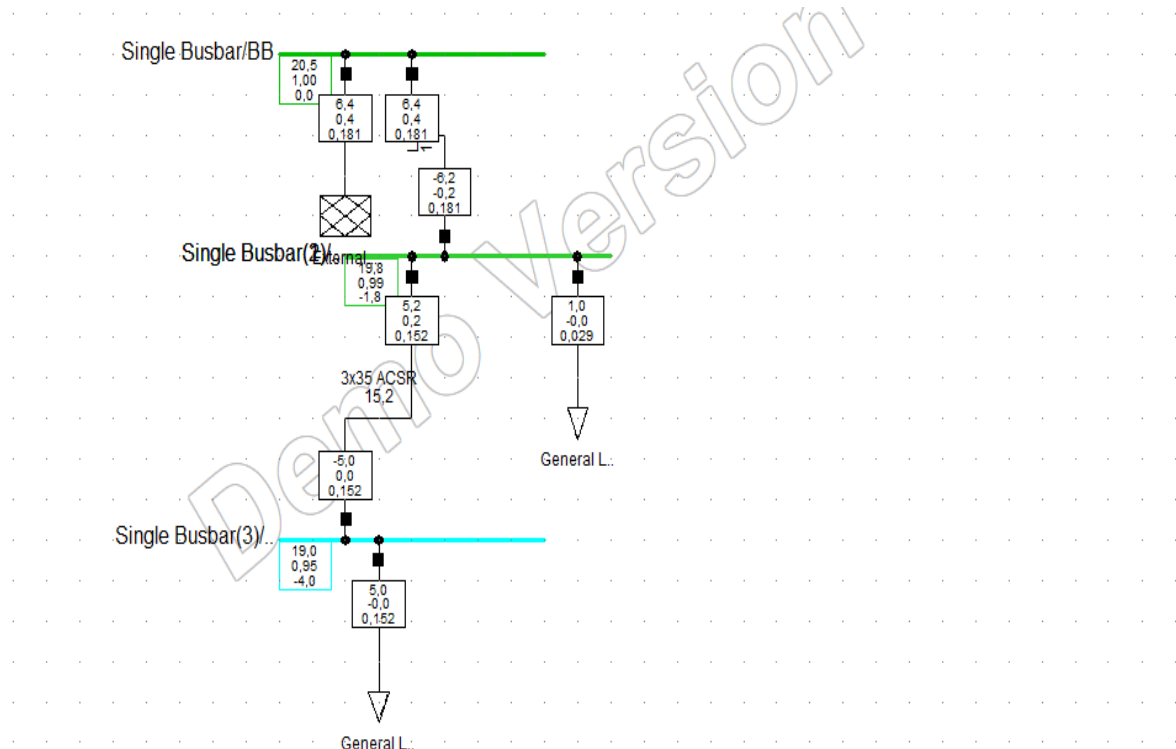
Ο δευτερεύων έλεγχος στοχεύει στη διατήρηση της ισορροπίας μεταξύ παραγωγής και ζήτησης εντός των επιμέρους ζωνών και στη διατήρηση της συμφωνημένης ανταλλαγής ισχύος με άλλες ζώνες.

Η ισχύς που απαιτείται για τον κύριο έλεγχο είναι 3000 MW κατανεμημένη σε όλες τις ζώνες ελέγχου, ενώ ο έλεγχος συχνότητας που σχετίζεται με τη διατήρηση του χρόνου για τα ρολόγια ελεγχόμενα από ηλεκτρικό δίκτυο επιτυγχάνεται με τη λειτουργία του συστήματος σε ελαφρώς αποκλίνουσες συχνότητες σε ημερήσιο μοτίβο έτσι ώστε η συχνότητα κατά μέσο όρο είναι 50 Hz.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ POWER FACTORY

Το πρόγραμμα Power Factory αποτελεί πρόγραμμα προσομοίωσης και στην περίπτωση μας, βοηθά στην προσομοίωση της γραμμής μεταφοράς.

Στο παρακάτω σχήμα, παρουσιάζεται η πτώση τάσεως στα φορτία του ζυγού BB 1-3.



Σχήμα 5.1: η πτώση τάσεως στα φορτία του ζυγού BB 1-3.

Η γραμμή L1 αποτελείται από 3 ζυγούς (BB 1.1, BB 1.2, BB 1.3,) όπου στην παραλαβή τους έχουν 20,5kV τάση. Η συνολική απόσταση της γραμμής είναι 10 km και ανάμεσα στον ζυγό BB 1.2 και BB 1.3 προστέθηκε μία γραμμή 5 km. Επίσης παρουσιάζονται αναλυτικά οι τιμές στην ωμική αλλά και την επαγωγική αντίσταση του καλωδίου. Οι γραμμές μεταφοράς πήραν την ονομασία τους από τους ζυγούς που συνδέονται στα άκρα τους.

Οι τιμές είναι οι εξής:

Για την γραμμή BB 1.1-BB1.2

- Resistance R' : 0.215 Ohm/km

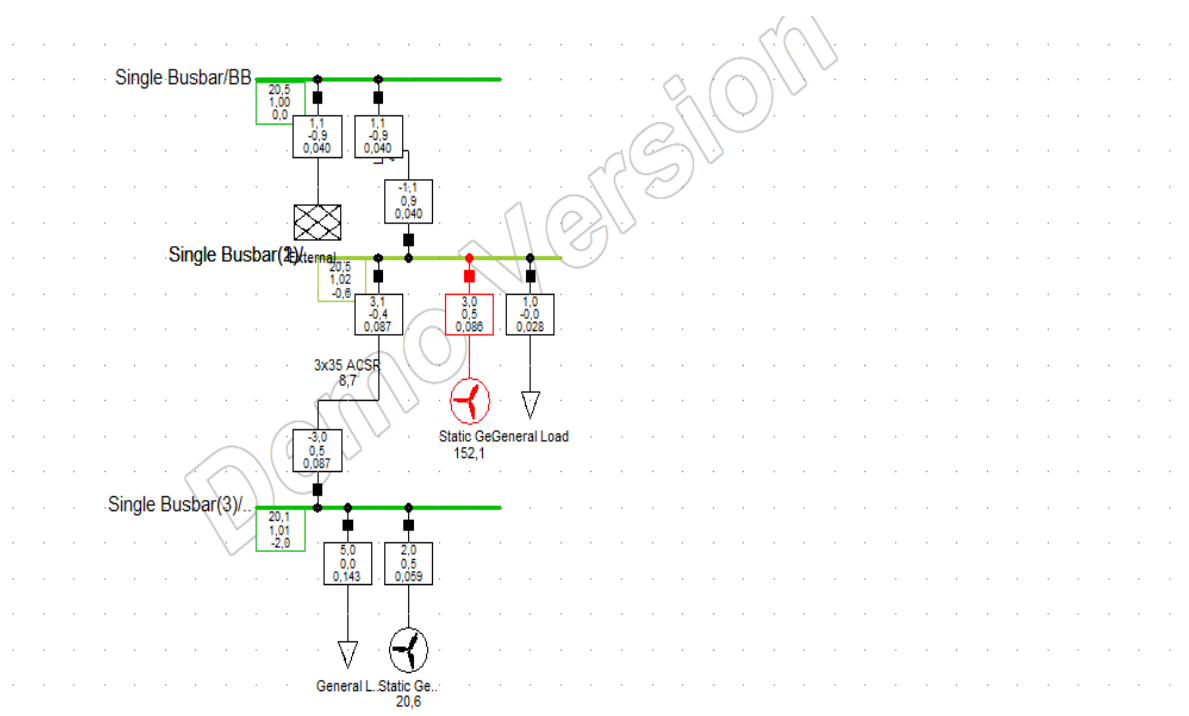
- Inductance L' : 0.334 mH/km

Για την γραμμή BB 1.2-BB1.3

- Resistance R' : 0.570 Ohm/km
- Inductance L' : 0.039 mH/km

Οι τιμές για τα φορτία τα οποία πήραν την ονομασία τους από τους ζυγούς που συνδέονται σχετίζονται με το σχήμα 5.1. Στο ζυγό BB1-2 έχουμε φορτία 1MW και στο ζυγό BB1-3 έχουμε 5MW. Οι τάσεις που εμφανίζονται είναι στο ζυγό BB1-2 είναι 19,8 KV και στο BB1-3 είναι 19 KV. Επομένως έχουμε πτώση τάσης στα φορτία του ζυγού BB1-3.

Στο παρακάτω σχήμα, παρατηρούμε ότι η πτώση τάσης είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων.



Σχήμα 5.2: Η πτώση τάσης στα φορτία του ζυγού B.B. 1-3 είναι εντός των ορίων

Η γραμμή L1 αποτελείται από 3 ζυγούς (BB 1.1, BB 1.2, BB 1.3,) όπου στην παραλαβή τους έχουν 20,5kV τάση. Η συνολική απόσταση της γραμμής είναι 10 km και ανάμεσα στον ζυγό BB 1.2 και BB 1.3 προσθέσαμε μία γραμμή 5 km. Επίσης προσθέσαμε τιμές στην ωμική, και επαγωγική αντίσταση του καλωδίου. Οι γραμμές μεταφοράς πήραν την ονομασία τους από τους ζυγούς που συνδέονται στα άκρα τους. Οι τιμές είναι οι εξής:

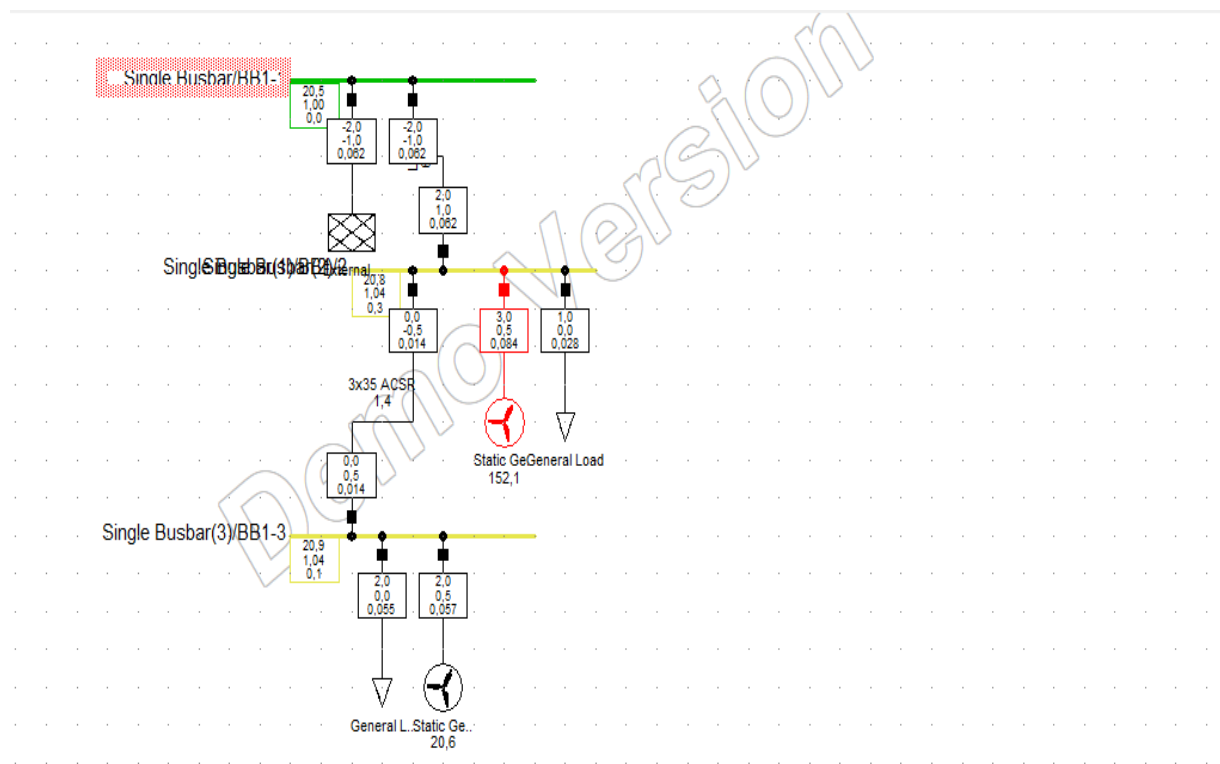
Για την γραμμή BB 1.1-BB1.2

- Resistance R': 0.215 Ohm/km
- Inductance L': 0.334 mH/km

Για την γραμμή BB 1.2-BB1.3

- Resistance R': 0.570 Ohm/km
- Inductance L': 0.039 mH/km

Οι τιμές για τα φορτία τα οποία πήραν την ονομασία τους από τους ζυγούς που συνδέονται σχετίζονται με το σχήμα 5.2. Στο ζυγό BB1-2 έχουμε φορτία 1MW και στο ζυγό BB1-3 έχουμε 5MW. Τοποθετήθηκαν ανεμογεννήτριες στο ζυγό BB1-2 ισχύος 3MW και στο ζυγό BB1-3 ισχύος 2. Οι τάσεις που εμφανίζονται είναι στο ζυγό BB1-2 είναι 20,5 KV και στο BB1-3 είναι 20,1 KV. Αρά η πτώση τάσης στα φορτία του ζυγού BB1-3 είναι εντός ορίων.



Σχήμα 5.3: Η ανύψωση τάσης στα φορτία του ζυγού B.B. 1-3

Η γραμμή L1 αποτελείται από 3 ζυγούς (BB 1.1, BB 1.2, BB 1.3,) όπου στην παραλαβή τους έχουν 20,5kV τάση. Η συνολική απόσταση της γραμμής είναι 10 km και ανάμεσα στον ζυγό BB 1.2 και BB 1.3 προσθέσαμε μία γραμμή 5 km. Επίσης προσθέσαμε τιμές στην ωμική, και επαγωγική αντίσταση του καλωδίου. Οι γραμμές μεταφοράς πήραν την ονομασία τους από τους ζυγούς που συνδέονται στα άκρα τους. Οι τιμές είναι οι εξής:

Για την γραμμή BB 1.1-BB1.2

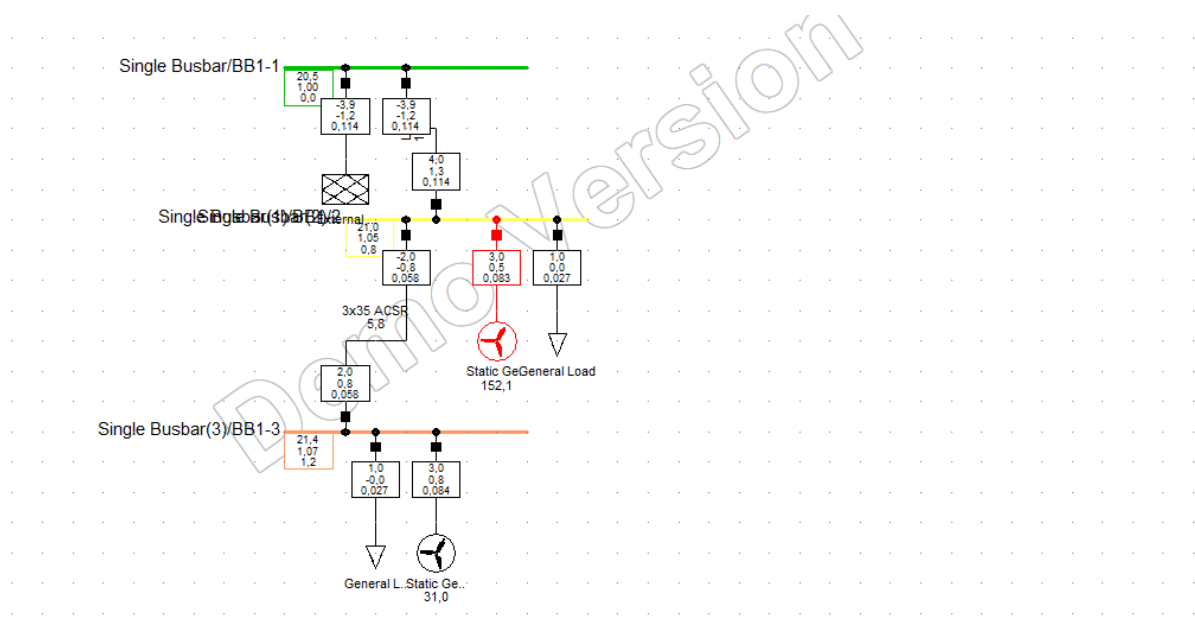
- Resistance R': 0.215 Ohm/km
- Inductance L': 0.334 mH/km

Για την γραμμή BB 1.2-BB1.3

- Resistance R': 0.570 Ohm/km
- Inductance L': 0.039 mH/km

Οι τιμές για τα φορτία τα οποία πήραν την ονομασία τους από τους ζυγούς που συνδέονται σχετίζονται με το σχήμα 5.3. Στο ζυγό BB1-2 έχουμε φορτία 1MW και στο ζυγό BB1-3 έχουμε 1MW. Τοποθετήθηκαν ανεμογεννήτριες στο ζυγό BB1-2 ισχύος 3MW και στο ζυγό BB1-3 ισχύος 2. Οι τάσεις που εμφανίζονται είναι στο ζυγό BB1-2 είναι 20,8 KV και στο BB1-3 είναι 20,9 KV. Άρα έχουμε ανύψωση τάσης στα φορτία του ζυγού BB1-3 .

Συνεπώς, για να διορθωθεί το πρόβλημα, προχωρούμε με αλλαγή της διατομής του αγωγού.



Σχήμα 5.4: Η αλλαγή της διατομής του αγωγού λόγω πολύ μεγάλης ανύψωσης τάσης

Η γραμμή L1 αποτελείται από 3 ζυγούς (BB 1.1, BB 1.2, BB 1.3,) όπου στην παραλαβή τους έχουν 20,5kV τάση. Η συνολική απόσταση της γραμμής είναι 10 km και ανάμεσα στον ζυγό BB 1.2 και BB 1.3 προσθέσαμε μία γραμμή 5 km. Επίσης προσθέσαμε τιμές στην ωμική, και επαγωγική αντίσταση του καλωδίου. Οι γραμμές μεταφοράς πήραν την ονομασία τους από τους ζυγούς που συνδέονται στα άκρα τους. Οι τιμές είναι οι εξής:

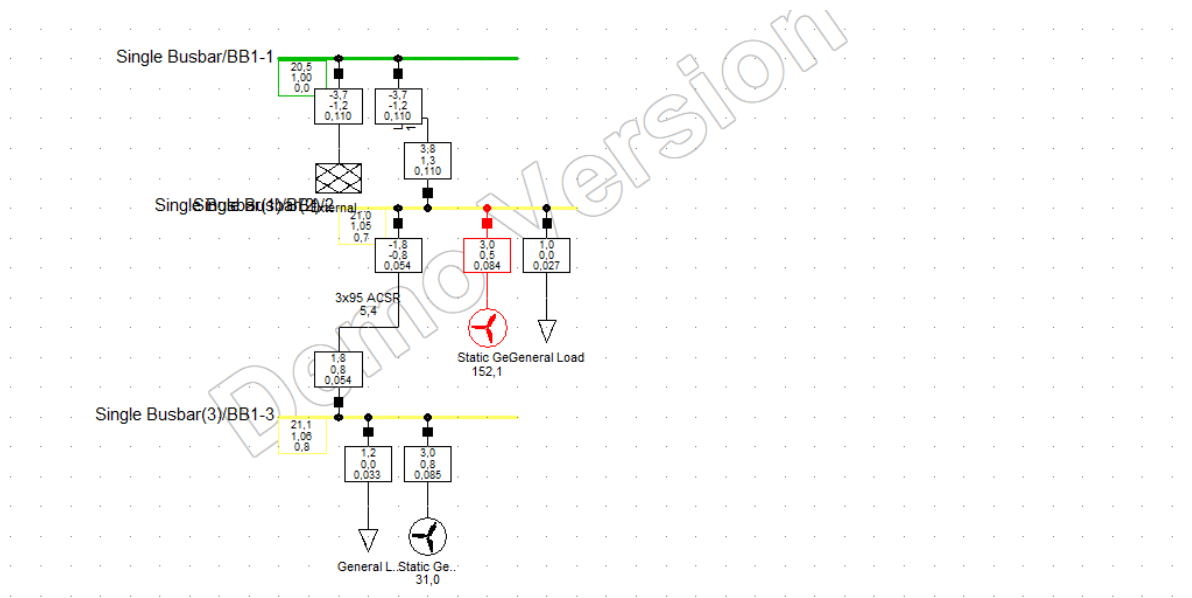
Για την γραμμή BB 1.1-BB1.2

- Resistance R': 0.215 Ohm/km
- Inductance L': 0.334 mH/km

Για την γραμμή BB 1.2-BB1.3

- Resistance R': 0.570 Ohm/km
- Inductance L': 0.039 mH/km

Οι τιμές για τα φορτία τα οποία πήραν την ονομασία τους από τους ζυγούς που συνδέονται σχετίζονται με το σχήμα 5.4. Στο ζυγό BB1-2 έχουμε φορτία 1MW και στο ζυγό BB1-3 έχουμε 1MW. Τοποθετήθηκαν ανεμογεννήτριες στο ζυγό BB1-2 ισχύος 3MW και στο ζυγό BB1-3 ισχύος 3. Οι τάσεις που εμφανίζονται είναι στο ζυγό BB1-2 είναι 21,1 KV και στο BB1-3 είναι 21,4 KV. Επομένως έχουμε πολύ μεγάλη ανύψωση τάσης στα φορτία του ζυγού BB1-3. Επομένως για να διορθώσουμε αυτό το πρόβλημα αλλάζουμε την διατομή του αγωγού από 3x35ACSR σε 3x95ACSR.



Σχήμα 5.5: Ανύψωση τάσης εντός ορίων μέσω της αλλαγής αγωγού

Η γραμμή L1 αποτελείται από 3 ζυγούς (BB 1.1, BB 1.2, BB 1.3,) όπου στην παραλαβή τους έχουν 20,5kV τάση. Η συνολική απόσταση της γραμμής είναι 10 km και ανάμεσα στον ζυγό BB 1.2 και BB 1.3 προσθέσαμε μία γραμμή 5 km. Επίσης προσθέσαμε τιμές στην ωμική, και

επαγωγική αντίσταση του καλωδίου. Οι γραμμές μεταφοράς πήραν την ονομασία τους από τους ζυγούς που συνδέονται στα άκρα τους. Οι τιμές είναι οι εξής:

Για την γραμμή BB 1.1-BB1.2

- Resistance R' : 0.215 Ohm/km
- Inductance L' : 0.334 mH/km

Για την γραμμή BB 1.2-BB1.3

- Resistance R' : 0.215 Ohm/km
- Inductance L' : 0.334 mH/km

Οι τιμές για τα φορτία τα οποία πήραν την ονομασία τους από τους ζυγούς που συνδέονται σχετίζονται με το σχήμα 5.5. Στο ζυγό BB1-2 έχουμε φορτία 1MW και στο ζυγό BB1-3 έχουμε 1MW. Τοποθετήθηκαν ανεμογεννήτριες στο ζυγό BB1-2 ισχύος 3MW και στο ζυγό BB1-3 ισχύος 3.

Οι τάσεις που εμφανίζονται είναι στο ζυγό BB1-2, 21 KV και στο BB1-3, 21,1 KV. Άρα έχουμε με την αλλαγή του αγωγού ανύψωση τάσης εντός ορίων.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία, αναφέρεται σε ένα σύνολο ζητημάτων που αφορούν την αιολική ενέργεια. Η αιολική ενέργεια, αποτελεί μία από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μία αστείρευτη πηγή ενέργειας, η οποία δεν αφήνει περιβαλλοντικό αποτύπωμα αντίστοιχο με τις συμβατικές μορφές ενέργειας.

Ιδιαίτερα σημαντικό είναι το γεγονός ότι η αιολική ενέργεια έχει πλέον αποδειχθεί ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί και να αντικαταστήσει πλήθος άλλων πηγών, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια, η οποία μπορεί να ηλεκτροδοτήσει απευθείας κάποια εγκατάσταση, ή αντίστοιχα, μπορεί να συνδεθεί στο συμβατικό δίκτυο, παρέχοντας ηλεκτρική ενέργεια.

Η αιολική ενέργεια μπορεί να παραχθεί μέσω των ανεμογεννητριών, οι οποίες μέσω της ελικοειδούς κατασκευής τους και της δύναμης του αέρα, παράγουν κινητική ενέργεια, την οποία στη συνέχεια μετατρέπουν σε ηλεκτρική.

Το να μπορεί κάποιος σήμερα να τροφοδοτήσει ένα σπίτι ή ένα μικρό χώρο εργασίας μέσω μίας ανεμογεννήτριας και της χρήσης του ανέμου, έχει οδηγήσει στη λύση πολλών προβλημάτων, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου είτε δεν έχει φτάσει ο ηλεκτρισμός, είτε υπάρχουν προβλήματα με τον ηλεκτρισμό. Η ανεμογεννήτρια στις περιπτώσεις αυτές μπορεί να δώσει μία πραγματικά αξιόπιστη λύση.

Η σύνδεση μία ή δύο ανεμογεννητριών μπορεί να γίνει απευθείας στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Αντίστοιχα, όταν πρόκειται για κάποιο αιολικό πάρκο ή για περιπτώσεις με ανεμογεννήτριες περισσότερες των δυο, τότε η σύνδεση στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται ένα περίπλοκο ζήτημα.

Στις περιπτώσεις σύνδεσης στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, ανάμεσα στα σημαντικότερα ζητήματα που προκύπτουν είναι το αν το πλησίον δίκτυο μπορεί να δεχθεί την εν λόγω ενέργεια. Έτσι, στην περίπτωση που το δίκτυο μπορεί να δεχτεί την παραγόμενη ενέργεια των ανεμογεννητριών τότε θεωρητικά δεν θα υπάρξει κάποιο πρόβλημα καθώς θα πραγματοποιηθεί η σύνδεση. Στις περιπτώσεις που το δίκτυο δεν μπορεί να δεχθεί την παραγόμενη ενέργεια, τότε το κόστος της εγκατάστασης θα εκτοξευθεί.

Έτσι, όταν πρόκειται κάποιος να προβεί σε δημιουργία μίας επένδυσης με ανεμογεννήτριες, τα σημαντικότερα ζητήματα που πρέπει να εξασφαλιστούν είναι η ύπαρξη τριφασικού

ρεύματος στην περιοχή, η ικανότητα του υπάρχοντος δικτύου να δεχθεί το νέο ρεύμα που θα εισαχθεί στο δίκτυο και βέβαια, η περιοχή όπου θα πραγματοποιηθεί η επένδυση να έχει ανέμους.

Ο λεπτομερής σχεδιασμός μίας τέτοιας επένδυσης είναι ιδιαίτερα σημαντικός, όπως και η εκπόνηση όλων των απαραίτητων μελετών ώστε να μπορέσει να προχωρήσει σωστά, και έγκαιρα η επένδυση.

Οι διάφοροι τύποι ανεμογεννητριών και η εξέλιξή τους μέσα από την εξέλιξη της τεχνολογίας, έχει οδηγήσει σήμερα στη δημιουργία ιδιαίτερα σημαντικών κατασκευών, οι οποίες πλέον μπορούν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με μεγαλύτερη αξιοπιστία.

Είναι βέβαιο πως χρειάζονται περισσότερες μελέτες αναφορικά με την αιολική ενέργεια και τη χρήση της, ενώ είναι ταυτόχρονα ιδιαίτερα σημαντική η συνεχής εξέλιξη των ανεμογεννητριών αλλά και του τρόπου σύνδεσής τους στο δίκτυο διανομής ενέργειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξένη Βιβλιογραφία

- Akwa JV, Vielmo HA, Petry AP. (2012). A review on the performance of Savonius wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16(5):3054-64.
- Burton T. (2001). *Wind energy : handbook*. Chichester; New York: J. Wiley, 2001.
- Crossley RJ, Schubel PJ. (2012). Wind Turbine Blade Design Review. *Wind engineering*. 36(4):365-88.
- EEDD (2001). *Energie Environment et Developpement Durable – Wind Turbine Grid Connection and Interaction.*, European Communities.
- EERE (2007). *Small Wind Electric Systems – A U.S Consumer’s Guide*
- Eriksson S, Bernhoff H, Leijon M. (2008). Evaluation of different turbine concepts for wind power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 12(5):1419-34.
- Gasch R, Twele J. (2012). *Wind power plants – fundamentals, design, construction and operation*: Springer, 2012.
- Gsänger S, Pitteloud JD. (2012). *World Wind Energy Report 2011*. World Wind Energy Association (WWEA).
- Islam M, Ting DSK, Fartaj A. (2008). Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 12(4):1087-109.
- Kishore RA, Coudron T, Priya S. (2013). Small-scale wind energy portable turbine (SWEPT). *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 116:21-31.
- Ozgener O, Ozgener L. (2007). Exergy and reliability analysis of wind turbine systems: A case study. *Renewable & sustainable energy reviews*. 11(8):1811-26.
- Priya S. (2005). Modeling of electric energy harvesting using piezoelectric windmill. *Applied Physics Letters*. 87(18):184101--3.
- WWPP (2011). *Wind and Water Power Program.*, US Department of Energy: Energy Efficiency and Renewable energy.

Zhang P. (2012). Small Wind World Report 2012. World Wind Energy Association (WWEA), Germany.

Πηγές στο διαδίκτυο

Daniels L. (2007). Interconnection – Getting Energy to Market., Windustry., Available from: https://www.windustry.org/community_wind_toolbox_14_interconnection

Elite.tugraz (2012). Rotors., Available from: <https://elite.tugraz.at/Jungbauer/3.htm>

GWEC (2012). Global Wind Energy Council., Global Wind Energy Outlook., Available from: <http://www.gwec.net/publications/global-wind-energy-outlook/global-wind-energy-outlook-2012/>.

IEA (2020). International Energy Agency., Available from: <http://www.iea.org/aboutus/faqs/renewableenergy>

Ironmanwindmill., (2020). History of windmill., Available from: <http://www.ironmanwindmill.com/windmill-history.htm>.

Siemens (2022). Model SWT-2.3-82 VS Available from: http://www.energy.siemens.com/us/pool/hq/power-generation/wind-power/E50001-W310-A123-X-4A00_WS_SWT-2.3-82%20VS_US.pdf.

WWEA (2011). The World Wind Energy Association – 2011 Report., Available from: <http://www.wwindea.org/webimages/WorldWindEnergyReport2011.pdf>

