



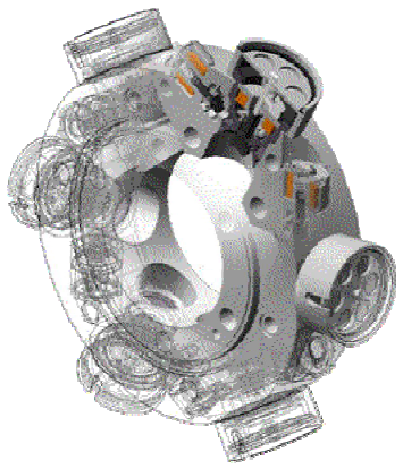
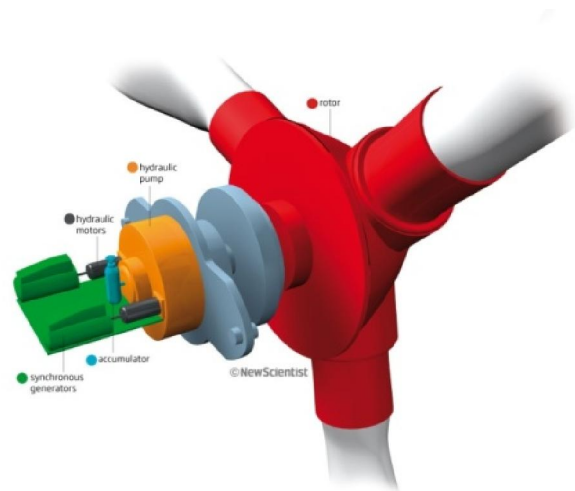
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη της τεχνολογίας ελέγχου συστημάτων αιολικής ενέργειας με χρήση υδραυλικής μετάδοσης ισχύος.

ΝΙΚΟΛΙΝΑ ΑΡΑΠΟΓΛΟΥ





ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

**Μελέτη της τεχνολογίας ελέγχου συστημάτων αιολικής ενέργειας με
χρήση υδραυλικής μετάδοσης ισχύος.**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικολίνα Αράπογλου

Επιβλέπων: Δρ. Αριστείδης Κυπράκης
Επιστημονικός Συνεργάτης
Τμήμα Ηλεκτρολογίας
ΤΕΙ Κρήτης

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Δρ. Α. Κυπράκης

.....
Δρ. Ε. Κυμάκης

.....
Δρ. Ε. Καραπιδάκης.

Ηράκλειο, Μάιος 2010

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1	3
1.1. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	3
1.1.1. Αξιολόγηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας	3
1.1.2. Προωθώντας τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	6
1.2. Η Αιολική Ενέργεια σαν Ανανεώσιμη Πηγή	7
1.2.1. Εξέλιξη της Παραγωγής Ηλεκτρισμού από Αιολική Ενέργεια	7
Κεφάλαιο 2	18
2. Τα χαρακτηριστικά και οι πηγές του ανέμου.	18
2.1. Εισαγωγή.....	18
2.1.1. Συνολικά παγκόσμια δείγματα.	18
2.1.2. Η μηχανική της κίνησης του ανέμου.....	19
2.1.3. Το ατμοσφαιρικό στρώμα	21
2.1.4. Μεταβολή ταχύτητας ανέμου με το ύψος.....	22
2.1.5. Μεταβολή ταχύτητας ανέμου σε σύνθετη τοπογραφία.....	22
2.1.6. Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το χρόνο.....	23
2.1.7. Στροβιλισμός και αναταράξεις του αέρα.	25
2.2. Μετρήσεις Αιολικού δυναμικού.....	26
2.2.1. Ρόδο ανέμου.....	26
2.3. Αεροδυναμική μετατροπή.	27
2.3.1. Η ισχύς του ανέμου.....	27
2.3.2. Η θεωρία του δίσκου ενέργειας και η ζώνη σκίασης.	30
2.3.3. Η αεροδυναμική των πτερυγίων	31
2.3.4. Θεωρητικός υπολογισμός συχνοτήτων κατανομής ταχυτήτων ανέμου.....	33
2.3.5. Δυναμικό μοντέλο ενός μεταβλητού βήματος ανεμογεννήτριας.....	35
2.3.6. Παραγωγή ενέργειας	38
2.4. Τύποι ανεμογεννητριών.....	39
2.4.1. Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα.	40
2.4.2. Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα	44
2.5. Η καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας.	45
2.5.1. Ταχύτητα έναρξης λειτουργίας ανεμοκινητήρα (cut in speed).....	45
2.5.2. Ονομαστική ταχύτητα (Rated speed).....	45

2.5.3. Ταχύτητα απόξευξης ή διακοπής λειτουργίας (cut-off speed).....	46
2.6. Αεροδυναμικός έλεγχος ισχύος ανεμογεννήτριας.....	47
2.7. ΠΕΡΙΛΗΨΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	50
Κεφάλαιο 3	51
3. Το Ηλεκτρικό Σύστημα Των Α/Γ	51
3.1 Εισαγωγή	51
3.1. Γενικά για τις μηχανές επαγωγής.....	51
3.1.1. Ηλεκτρική μηχανή ΕΡ	51
3.1.2. Ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες.....	52
3.2. Σύγχρονες γεννήτριες	64
3.2.1. Γενικά περί σύγχρονων μηχανών.	65
3.2.2. Μετασηματισμός του Park	66
3.2.3. Ανά μονάδα σύστημα.....	69
3.2.4. Σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς.	70
3.3. Κατάταξη των Α/Γ.....	72
3.3.1. Αρχή και πλεονεκτήματα από τη λειτουργία μεταβλητών στροφών.....	72
3.4. Εναλλακτικές διατάξεις του ηλεκτρικού μέρους.....	74
3.4.1. Χρήση της σύγχρονης γεννήτριας.....	76
3.4.2. Η εξαφασική σύγχρονη γεννήτρια.....	78
3.5. Ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας με ΓΕΔΤ (DFIG).....	80
3.6 Περίληψη-Συμπεράσματα.....	82
Κεφάλαιο 4	83
4. Συμβατική μετάδοση ισχύος σε ανεμογεννήτριες.....	83
4.1. Εισαγωγή.....	83
4.2. Κιβώτια ταχυτήτων.....	83
4.2.1. <i>Είδη κιβωτίων ταχυτήτων.....</i>	83
4.2.2. Η χρήση των κιβωτίων ταχυτήτων.....	87
4.2.3. Σχεδιασμός κιβωτίων ταχυτήτων.....	88
4.2.4. Η απόδοση και η εκπομπή θορύβου ενός κιβωτίου ταχυτήτων.....	89
4.3. Η χρήση των ηλεκτρονικών μετατροπών.....	91
4.4. Περίληψη-Συμπεράσματα.....	94
Κεφάλαιο 5	95
5. Υδραυλική Μετάδοση Ισχύος Για Ανεμογεννήτριες	95
5.1. Εισαγωγή.....	95

5.2.	Υδραυλικές αντλίες.....	95
5.3.	Υδραυλικοί κινητήρες.....	97
5.4.	Υδραυλικοί κύλινδροι.....	100
5.5.	Συσσωρευτές υδραυλικής ενέργειας.....	101
5.6.	Βαλβίδες ελέγχου πίεσης.....	103
5.7.	Υδροστατικοί μεταφορείς κίνησης.....	105
5.7.1.	Αντικαθιστώντας τα ηλεκτρονικά ισχύος με υδραυλικά συστήματα.....	105
5.7.2.	Η τεχνολογία Digital Displacement.....	107
5.8.	Περίληψη-Συμπεράσματα.....	111
Κεφάλαιο 6	112
Συμπεράσματα-Προοπτικές.	112
Βιβλιογραφία.....		114

Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μία ραγδαία αύξηση στη ζήτηση «καθαρής» ενέργειας, ώστε να μειωθεί κατά το δυνατόν η επιβάρυνση στο περιβάλλον. Η στροφή προς τις ήπιες μορφές ενέργειας έδωσε ώθηση στην εξέλιξη των τεχνολογιών των συστημάτων μετατροπής της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική και στην εμπορευματοποίηση των ανεμογεννητριών. Η μελέτη τους οδήγησε σε σημαντική αύξηση της αξιοπιστίας τους, παράλληλα με την αύξηση του μεγέθους και της ενεργειακής τους απόδοσης. Η ονομαστική ισχύς των ανεμογεννητριών έχει ξεπεράσει ήδη τα 3 MW φτάνοντας μέχρι και τα 5 MW, ενώ σήμερα οι πιο εμπορικές μηχανές έχουν ισχύ άνω του ενός MW. Τα προβλήματα που εμφανίζονται σε αυτά τα συστήματα σχετίζονται κυρίως με τη στοχαστική φύση της ενεργειακής πηγής τους που είναι ο άνεμος. Όπως είναι γνωστό ο άνεμος είναι μεταβαλλόμενος και δύσκολα προβλέψιμος σε βάθος χρόνου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα συνεχείς μεταβολές της παραγόμενης ισχύος των συστημάτων αυτών και συνεπώς συνεχείς διαταραχές στα ηλεκτρικά δίκτυα που συνδέονται, λόγω της συνεχούς διακύμανσης της τάσης και της συχνότητας, της απορρόφησης άεργου ισχύος και γενικότερα της ποιότητας της παραγόμενης ισχύος. Στόχος όλων των ερευνητικών δραστηριοτήτων που πραγματοποιούνται τις τελευταίες δεκαετίες είναι, εκτός της βέλτιστης εκμετάλλευσης του αιολικού δυναμικού, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τα καλύτερα κατά το δυνατόν χαρακτηριστικά για τα ηλεκτρικά δίκτυα. Η μέχρι σήμερα ερευνητική δραστηριότητα έδειξε ότι τα συστήματα μεταβλητών στροφών οδηγούν σε βέλτιστη αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού. Τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα, τα οποία σχετίζονται με το κόστος κατασκευής τους αλλά και με το φαινόμενο της έγχυσης αρμονικών στο δίκτυο λόγω της διακοπτικής λειτουργίας τους, αφού η εφαρμογή τους στηρίζεται στη χρήση ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία γίνεται η μελέτη μιας νέας τεχνικής υδραυλικής μετάδοσης ισχύος, βασισμένης στην τεχνολογία Digital Displacement™ (DD) που σχεδίασε η βρετανική εταιρία Artemis Intelligent Power (AIP). Η τεχνική αυτή μεταξύ άλλων θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή πιο αξιόπιστων και λιγότερο δαπανηρών συστημάτων μετάδοσης ισχύος για ανεμογεννήτριες. Το σύστημα υδραυλικής μετάδοσης ισχύος αντικαθιστά το κιβώτιο ταχυτήτων ή / και την χρήση των ηλεκτρονικών ισχύος με ένα σύστημα υδραυλικής αντλίας, συσσωρευτή και κινητήρα. Η τεχνολογία Digital Displacement δίνει τη δυνατότητα αμεσώτερου και ταχύτερου ελέγχου της ισχύος, ενώ ταυτόχρονα αυξάνει και τον συνολικό βαθμό απόδοσης του συστήματος. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα αυτής της διάταξης, που θα αναλυθούν στο αντίστοιχο κεφάλαιο είναι η αξιοπιστία της, ο υψηλός βαθμός απόδοσης ακόμα και υπό μερικό φορτίο, το μειωμένο βάρος σε σύγκριση με το κιβώτιο ταχυτήτων και τέλος η ποιότητα της παραγωγής, ως αποτέλεσμα της σημαντικά μικρότερης διακύμανσης της παραγόμενης ισχύος.

Abstract

In recent years there has been a rapid increase in demand of clean energy to reduce as much as possible the burden on the environment. The switch to alternative energy sources has fueled the development of innovative Wind Energy Conversion (WEC) systems and the commercialisation of Wind Turbines (WTs). The study on WEC systems led to a significant increase on their reliability, while their size and efficiency were also augmented. Nominal WT capacity has already surpassed the 3 MW mark with some models even reaching 5 MW, and today the rating of most commercial machines is over 1 MW. The most important shortcomings in such systems are mainly related to the stochastic nature of wind as an energy source. It is known that wind is variable and (in long term) unpredictable. This results in frequent changes of the WT electrical power output. Hence, issues arise such as fluctuation of network voltage and frequency, reactive power exchange between the wind turbine / farm and the grid, and generally there is a deterioration of the quality of power delivered to the consumers. Because of these, most current research focuses at optimisation of wind potential exploitation, as well as the improvement of quality of electricity generated by wind turbines and supplied to the electrical networks.

Recent research outcomes showed that variable speed operation of WTs leads to increased wind energy potential conversion rates. However, even these systems have disadvantages such as high construction costs, increased complexity and injection of harmonic voltages to the system, due to the switching operation of power electronic converters.

This project aims to study the technology behind wind energy conversion systems and present a new kind of power transmission based on a hydraulic system, which utilises Digital Displacement™ (DD), a novel technology developed by the British company Artemis Intelligent Power (AIP). It is proposed that this technique could be used in WECs in order to improve their reliability and efficiency, while reducing overall system cost. The hydraulic power transmission system replaces the gearbox and / or power electronic network interface with a setup consisting of a hydraulic pump, accumulator and motor. Digital Displacement technology acts on the hydraulic machines and enables a direct, quick power control and at the same time it increases the overall system efficiency. The main advantages of the DD technology, to be analysed in the respective chapter, are its reliability, the increased efficiency compared to classic power transmission systems even under partial load, the smaller weight compared to gearboxes and finally the quality of supply as a result of the significantly lower fluctuation of generated power.

Κεφάλαιο 1

1.1.Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

1.1.1. Αξιολόγηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια σημαντική αλλαγή στη συμβατική λειτουργία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, λόγω του μεγάλου βαθμού διεύθυνσης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο της μέσης ή χαμηλής τάσης.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Α.Π.Ε.) είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες. Οι Α.Π.Ε. παρουσιάζουν δυο βασικά χαρακτηριστικά. Πρώτον, για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση, καύση, όπως με τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας, αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Αυτό το χαρακτηριστικό καθιστά τις Α.Π.Ε. ανεξάντλητες, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς τα αποθέματα της ανθρωπότητας σε ορυκτά καύσιμα και ουράνιο έχουν αρχίσει να εξαντλούνται. Δεύτερον, πρόκειται για "καθαρές" μορφές ενέργειας, πολύ φιλικές στο περιβάλλον, που δεν αποδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα, σε αντίθεση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε ευρεία κλίμακα.

Όλες οι Α.Π.Ε. βασίζονται ουσιαστικά στην ηλιακή ακτινοβολία, με εξαίρεση τη γεωθερμική ενέργεια, η οποία είναι ροή ενέργειας από το εσωτερικό του φλοιού της γης, και την ενέργεια απ' τις παλίρροιες, η οποία εκμεταλλεύεται τη βαρυτική έλξη που υφίστανται οι γήινες υδάτινες μάζες από τη σελήνη. Έτσι, η βιομάζα είναι ηλιακή ενέργεια δεσμευμένη στους ιστούς των φυτών μέσω της φωτοσύνθεσης, η αιολική ενέργεια εκμεταλλεύεται τους ανέμους που προκαλούνται από τη θέρμανση του αέρα, ενώ οι Α.Π.Ε. που βασίζονται στο νερό εκμεταλλεύονται τον κύκλο εξάτμισης-συμπύκνωσης του νερού και την κυκλοφορία του. Οι βασιζόμενες στην ηλιακή ακτινοβολία πηγές ενέργειας είναι ανανεώσιμες, αφού δεν πρόκειται να εξαντληθούν όσο υπάρχει ο ήλιος, δηλαδή για μερικά ακόμα δισεκατομμύρια χρόνια. Οι Α.Π.Ε. χρησιμοποιούνται είτε άμεσα (κυρίως για θέρμανση), είτε μετατρέπομενες σε άλλες μορφές ενέργειας (κυρίως ηλεκτρισμό ή μηχανική ενέργεια). Υπολογίζεται ότι το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο ενεργειακό δυναμικό απ' τις Α.Π.Ε. είναι πολλαπλάσιο της παγκόσμιας συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Η υψηλή, όμως, μέχρι πρόσφατα τιμή των νέων ενεργειακών εφαρμογών, τα τεχνικά προβλήματα εφαρμογής, καθώς και οι πολιτικές και οικονομικές σκοπιμότητες που συνδέονται με τη διατήρηση του παρόντος επιπέδου ανάπτυξης στον ενεργειακό τομέα, εμπόδισαν την εκμετάλλευση έστω και μέρους αυτού του δυναμικού. Ειδικά στην Ελλάδα, που έχει μορφολογία και κλίμα κατάλληλο για νέες ενεργειακές εφαρμογές, η εκμετάλλευση αυτού του ενεργειακού δυναμικού θα συντελούσε σημαντικά στην ενεργειακή αυτονομία της χώρας. Το ενδιαφέρον για την ευρύτερη αξιοποίηση των Α.Π.Ε., καθώς και για την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδοτικών τεχνολογιών που δεσμεύουν το δυναμικό τους,

ανακινήθηκε μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 1979, και παγιώθηκε κυρίως την τελευταία δεκαετία, μετά τη συνειδητοποίηση των παγκόσμιων περιβαλλοντικών προβλημάτων και της αλλοίωσης της ποιότητας της ανθρώπινης ζωής από τη χρήση των συμβατικών πηγών ενέργειας. Οι Α.Π.Ε., ιδιαίτερα ακριβές στην αρχή, ξεκίνησαν κατά βάση σαν πειραματικές εφαρμογές. Σήμερα, όμως, λαμβάνονται υπόψη στους επίσημους σχεδιασμούς των ανεπτυγμένων κρατών για την ενέργεια και, αν και προς το παρόν αποτελούν πολύ μικρό ποσοστό της ενεργειακής παραγωγής, πραγματοποιούνται βήματα για την εκτενέστερη αξιοποίησή τους. Το κόστος δε των εφαρμογών τους μειώνεται σταδιακά τα τελευταία είκοσι χρόνια και, ειδικά η αιολική και υδροηλεκτρική ενέργεια, αλλά και η βιομάζα, μπορούν πλέον να ανταγωνίζονται εξίσου παραδοσιακές πηγές ενέργειας, όπως ο άνθρακας και η πυρηνική ενέργεια. Ενδεικτικά, στις Η.Π.Α., ένα 6% της ενέργειας προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές, ενώ στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχει τεθεί ως στόχος μέχρι το 2010 το 20% της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές (κυρίως υδροηλεκτρικά και βιομάζα). Εξάλλου, στην προώθηση των Α.Π.Ε. στην παγκόσμια ενεργειακή αγορά συνέβαλε το γεγονός ότι μπορούν να συμβάλλουν στην ενεργειακή αυτάρκεια μικρών και αναπτυσσόμενων χωρών, αποτελώντας την εναλλακτική πρόταση σε σχέση με την οικονομία του πετρελαίου. Είναι προφανές ότι χώρες με μεγάλα αποθέματα στις πρωταρχικές μορφές ενέργειας έχουν συνήθως την τάση να χρησιμοποιούν αυτό το πλεονέκτημα ως μέσο για πολιτικό και οικονομικό έλεγχο των υπολοίπων. Παράδειγμα τέτοιων συνεπειών είναι η πολιτική και οικονομική κατάσταση που έχει εδραιωθεί στη Μέση Ανατολή. Οι Α.Π.Ε., όμως, αποτελούν ευέλικτες εφαρμογές που μπορούν να παράγουν ενέργεια ανάλογη με τις ανάγκες του επί τούτου πληθυσμού, καταργώντας παράλληλα την ανάγκη για τεράστιες μονάδες ενεργειακής παραγωγής, αλλά και για μεταφορά της ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Ταυτόχρονα, υποβοηθείται η αποκέντρωση και η ανάπτυξη της τοπικής οικονομίας σε κάθε περιοχή όπου εγκαθίστανται τέτοιου είδους μονάδες. Ένα επιπρόσθετο πλεονέκτημα είναι ο απλός στην κατασκευή και τη συντήρηση εξοπλισμός τους. Εξάλλου, το μηδενικό κόστος πρώτης ύλης, σε συνδυασμό με τις μικρές έως ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης που εμφανίζουν, συνεπάγεται περιορισμένο κόστος λειτουργίας. Έτσι, αντισταθμίζεται σε μεγάλο βαθμό το μέχρι σήμερα μειονέκτημα του αυξημένου κόστους που απαιτείται για την εγκατάσταση των μονάδων εκμετάλλευσής τους.

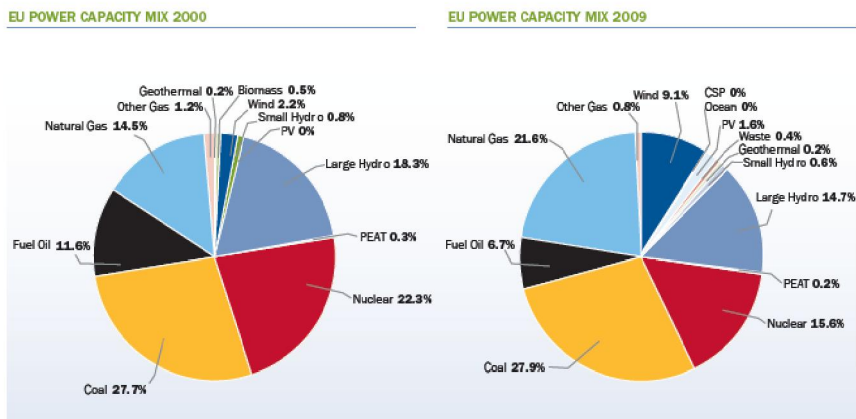
Παρόλα αυτά, οι Α.Π.Ε. παρουσιάζουν έναν αρκετά μικρό συντελεστή απόδοσης, της τάξης του 30% ή και χαμηλότερο. Αυτό ουσιαστικά σημαίνει ότι απαιτείται ένα μεγάλο σύνολο εγκαταστάσεων και, άρα, ένα αρκετά μεγάλο αρχικό κόστος εφαρμογής σε μεγάλη επιφάνεια γης. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος, μέχρι τώρα, χρησιμοποιούνται σαν συμπληρωματικές πηγές ενέργειας και όχι για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των μεγάλων αστικών κέντρων. Εκτός από αυτό, η παροχή και απόδοση της αιολικής, υδροηλεκτρικής και ηλιακής ενέργειας εξαρτώνται από την εποχή του έτους, αλλά και από το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται. Για παράδειγμα, τα φωτοβολταϊκά συστήματα παρουσιάζουν αυξημένη ή μειωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανάλογα με την ηλιοφάνεια που παρουσιάζεται κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αντίθετα, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανεμογεννήτριες πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια ολόκληρου του 24ώρου, αποτελεί, όμως, συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου. Για τις ανεμογεννήτριες υπάρχει επιπλέον η άποψη ότι

επηρεάζουν το περιβάλλον από αισθητική άποψη και ότι προκαλούν θόρυβο και θανάτους πουλιών. Με την εξέλιξη όμως της τεχνολογίας τους, και την προσεκτικότερη επιλογή χώρων εγκατάστασης (π.χ. σε πλατφόρμες στην ανοιχτή θάλασσα), αυτά τα προβλήματα έχουν σχεδόν λυθεί. Τέλος, μεγάλοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί (ΥΗΣ) που μετατρέπουν τη δυναμική ενέργεια του τρεχούμενου νερού σε ηλεκτρική αποτελούν σημαντική εναλλακτική σε σχέση με θερμικούς και πυρηνικούς σταθμούς, καθώς δεν παρουσιάζουν τα μειονεκτήματα των πεπερασμένων αποθεμάτων, εκπομπών ή αποβλήτων. Ωστόσο, είναι δύσκολο να ικανοποιηθεί η ζήτηση σε παγκόσμιο επίπεδο με μεγάλους ΥΗΣ, γιατί στις ανεπτυγμένες χώρες, ως επί το πλείστον, το υδραυλικό δυναμικό ήδη χρησιμοποιείται και προκειμένου να αυξηθεί το μερίδιο των ΥΗΣ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θα έπρεπε να κατασκευαστούν ΥΗΣ σε απόμακρες τοποθεσίες, οι οποίες στις περισσότερες περιπτώσεις είναι δύσκολο να προσεγγιστούν. Επιπλέον, η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται εξαιρετικά δύσκολη, αφενός γιατί το κόστος και η πολυπλοκότητα του συστήματος μεταφοράς αυξάνεται χάρη στις μεγάλες αποστάσεις, αφετέρου γιατί σε ορισμένες περιπτώσεις πρέπει να διασχιστούν πολιτικά ασταθείς περιοχές με ζωντανό τον κίνδυνο των σαμποτάζ των γραμμών μεταφοράς. Άλλωστε, η κατασκευή φραγμάτων και τεχνητών λιμνών για τους ΥΗΣ πολλές φορές προκαλεί την καταστροφή τοπικών οικοσυστημάτων, ενώ μπορεί να οδηγήσει σε αναγκαστική μετακίνηση κατοίκων. Για τα υδροηλεκτρικά έργα λέγεται, επίσης, ότι προκαλούν έκλυση μεθανίου από την αποσύνθεση των φυτών που βρίσκονται κάτω απ' το νερό, κι έτσι συντελούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Επομένως, τα μεγάλα υδροηλεκτρικά, αν και υπερέχουν των θερμικών και πυρηνικών σταθμών ως προς το θέμα των εκπομπών και των αποθεμάτων, εν τούτοις έχουν άλλου είδους επιπλοκές, ιδιαίτερα στον περιβαλλοντικό τομέα.

Αναλυτικά, τα είδη των Α.Π.Ε. είναι τα ακόλουθα:

- Αιολική ενέργεια
- Ηλιακή ενέργεια
- Υδροηλεκτρική ενέργεια
- Βιομάζα
- Γεωθερμική ενέργεια
- Ενέργεια από παλίρροιες
- Ενέργεια από θαλάσσια κύματα
- Ενέργεια από τους ωκεανούς (ακόμα στο στάδιο της έρευνας)

Στο επόμενο σχήμα 1 φαίνεται η συνεισφορά όλων των ενεργειακών μορφών στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στις χώρες της Ε.Ε. μέχρι τα τέλη του 2009 σε σύγκριση με το ίδιο του έτους 2000 [1].



Σχήμα 1.1 Συνεισφορά όλων των πηγών ενέργειας μέχρι τα τέλη του 2008 σε σύγκριση με το 2009.

1.1.2. Προωθώντας τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Με βάση τα προαναφερθέντα, κύρια πλεονεκτήματα των συμβατικών μεθόδων παραγωγής είναι η τιμή του παραγόμενου ηλεκτρισμού, η ελεγχιμότητα και η ευελιξία της εξόδου τους. Από την άλλη πλευρά, οι Α.Π.Ε. προέρχονται από πρωτογενείς πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, ο άνεμος ή η βιομάζα, και συνοδεύονται από μικρότερες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις. Παγκοσμίως, πολλές κυβερνήσεις έχουν την τάση να αξιολογούν καλύτερα τα οφέλη των Α.Π.Ε., υποστηρίζοντας την αύξηση του μεριδίου των τελευταίων στην κάλυψη της ζήτησης με διάφορους τρόπους, οι οποίοι αποσκοπούν κυρίως στη μείωση του κόστους και την επίτευξη αυξημένης ελεγχιμότητας.

Το μειονέκτημα του κόστους περιορίζεται τις περισσότερες φορές με κάποια μορφή κρατικής επιχορήγησης, όπως για παράδειγμα η πίεση που ασκείται στις ηλεκτρικές εταιρείες να αγοράζουν από Α.Π.Ε. σε μία εγγυημένη τιμή που δε βασίζεται στην πραγματική τιμή της ενέργειας, αλλά η οποία υπολογίζεται έτσι ώστε η παραγωγική διαδικασία του σταθμού ανανεώσιμης πηγής ενέργειας να είναι κερδοφόρα. Διακανονισμοί σαν αυτόν θα οδηγήσουν σε μία γενική αύξηση της τιμής του ηλεκτρισμού, σαν αποτέλεσμα του οποίου όλοι οι καταναλωτές πληρώνουν το πρόσθετο κόστος του ηλεκτρισμού που παράγεται από Α.Π.Ε., εκτός εάν οι ηλεκτρικές εταιρείες είναι σε θέση να πουλήσουν αυτήν την ενέργεια σαν πράσινη ενέργεια σε μια έξτρα τιμή. Άλλο παράδειγμα είναι οι επιχορηγήσεις που δίνονται στους παραγωγούς, οι οποίες διαμοιράζουν την επιβάρυνση που σχετίζεται με τις Α.Π.Ε. σε όλους τους φορολογούμενους. Μια ακόμη προσέγγιση του προβλήματος αυτού είναι μέσω της αυξημένης φορολογίας των συμβατικών μεθόδων παραγωγής ηλεκτρισμού, αυξάνοντας έτσι το κόστος παραγωγής τους, και άρα κάνοντας πιο εύκολο το πεδίο ανταγωνισμού για τις Α.Π.Ε. Το μειονέκτημα της μη ελεγχιμότητας αντιμετωπίζεται με την εξαίρεση αυτών των σταθμών παραγωγής από τη διαδικασία ελέγχου της ισορροπίας του συστήματος. Όλοι οι παραγωγοί που θέλουν να συνδεθούν στο δίκτυο πρέπει να πληρούν τα λεγόμενα «κριτήρια σύνδεσης» της εταιρείας που ελέγχει το δίκτυο. Αυτά περιλαμβάνουν απαιτήσεις σχετικά με την αλληλεπίδραση μεταξύ γεννήτριας και δικτύου. Για να εξασφαλίζεται η ισορροπία μεταξύ παραγωγής και

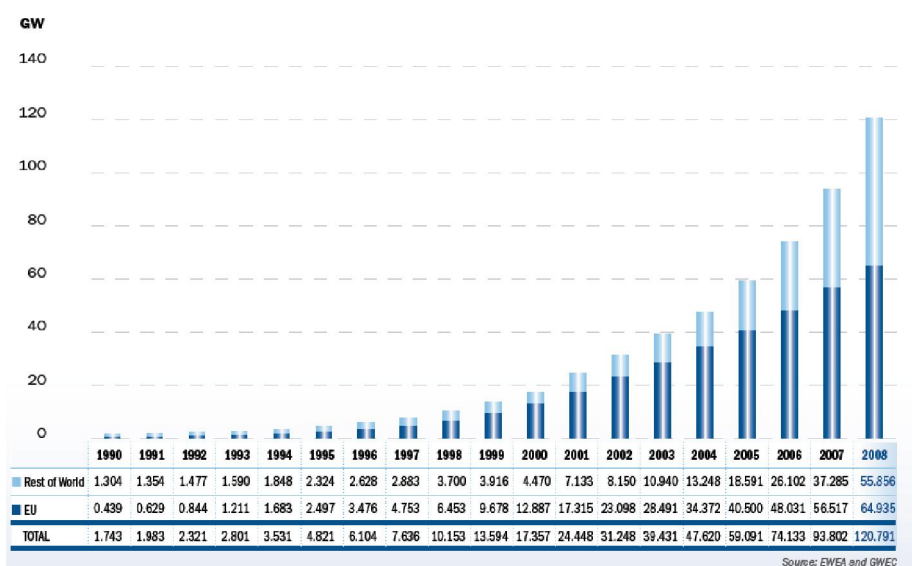
ζήτησης, η οποία είναι απαραίτητη για την ισορροπία του συστήματος, μεταξύ άλλων στα παραπάνω κριτήρια περιλαμβάνεται και η δυνατότητα ελέγχου των γεννητριών. Παρ' όλα αυτά, κάποιες φορές οι Α.Π.Ε. εξαιρούνται από αυτόν τον περιορισμό που έχει να κάνει με τον έλεγχο της παραγόμενης ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο, το μειονέκτημα της μη ελεγχιμότητας ακυρώνεται, τουλάχιστον από την πλευρά του παραγωγού, ο οποίος δεν είναι υποχρεωμένος να λάβει πρόσθετα μέτρα για τον έλεγχο της παραγωγής προκειμένου να συνδεθεί στο δίκτυο, π.χ. μέσω συστήματος αποθήκευσης ή εφεδρικής γεννήτριας. Στην πραγματικότητα, το πρόβλημα μεταφέρεται στους διαχειριστές των ελεγχόμενων μονάδων, καθώς η τεχνική προαπαιτήτηση για ισορροπία μεταξύ ζήτησης και παραγωγής δεν επηρεάζεται από την αλλαγή των απαιτήσεων σύνδεσης.

1.2. Η Αιολική Ενέργεια σαν Ανανεώσιμη Πηγή

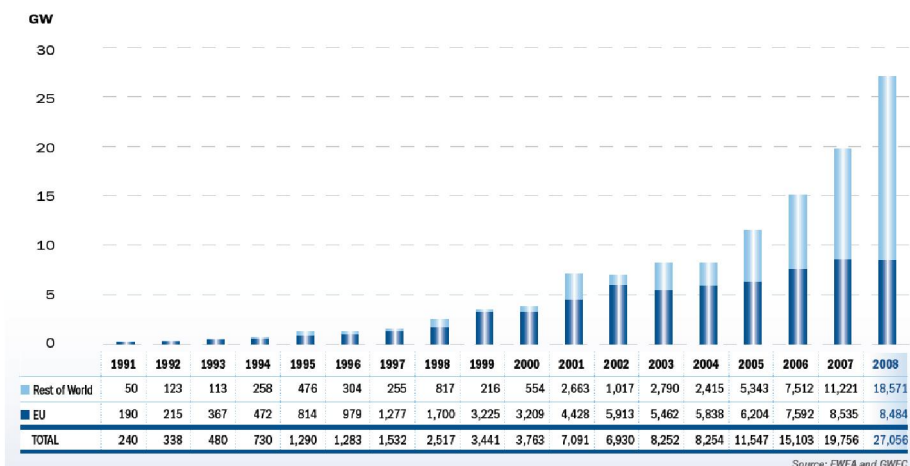
1.2.1. Εξέλιξη της Παραγωγής Ηλεκτρισμού από Αιολική Ενέργεια

Από όλες τις Α.Π.Ε., η αιολική ενέργεια είναι σήμερα η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη, καθώς παρατηρείται μια συνεχής βελτίωση της τεχνολογίας των ανεμογεννητριών, και επιπλέον, παράγεται ηλεκτρική ενέργεια σε τιμές συγκρίσιμες με αυτές των συμβατικών μονάδων και σε μεγάλες σχετικά ισχύς. Για το λόγο αυτό, η προώθηση από πολλές κυβερνήσεις των Α.Π.Ε., οδήγησε σε μεγάλη αύξηση την παραγωγή από αιολική ενέργεια στην Ευρώπη και τον υπόλοιπο κόσμο, όπως φαίνεται στα επόμενα σχήματα.

GLOBAL CUMULATIVE WIND ENERGY CAPACITY (1990-2008)



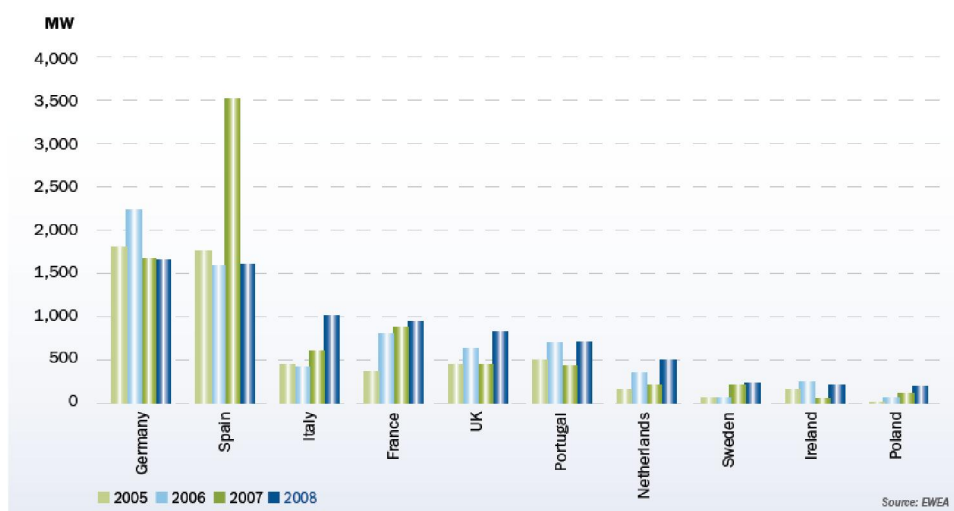
GLOBAL ANNUAL WIND ENERGY CAPACITY (1990-2008)



Σχήμα 1.2 Παγκόσμια ετήσια εγκατεστημένη αιολική ισχύς για τα έτη 1991-2008.

27.1 GW αιολικής ισχύος εγκαταστάθηκαν συνολικά κατά την διάρκεια του 2008, φτάνοντας τελικά 121 GW μέχρι το τέλος του χρόνου. Η παγκόσμια ετήσια αγορά για ανεμογεννήτριες αυξήθηκε κατά 31% για τα έτη 2006 και 2007 μαζί και 40% για το έτος 2005, και ακολουθεί μία ανάπτυξη της τάξης του 37% για το έτος 2008. Κατά τα τελευταία τέσσερα χρόνια η ετήσια παγκόσμια αγορά ανεμογεννητριών υπερτριπλασιάστηκε από 8.3 GW το 2004 σε 27.1 GW το 2008. Την ίδια περίοδο η συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς αυξήθηκε από 48 GW σε 121 GW. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μία αλματώδης αύξηση της εγκατεστημένης αιολικής ισχύος σε παγκόσμιο, αλλά ιδιαίτερα σε ευρωπαϊκό επίπεδο με τις **Γερμανία, Ισπανία και Δανία** να ξεχωρίζουν κυρίως μεταξύ των άλλων ευρωπαϊκών χωρών όσον αφορά στην ισχύ των αιολικών πάρκων που διαθέτουν. Στο σχήμα 3 φαίνονται οι δέκα μεγαλύτερες αγορές στον κόσμο στον τομέα της αιολικής ισχύος κατά το έτος 2008 [1,2].

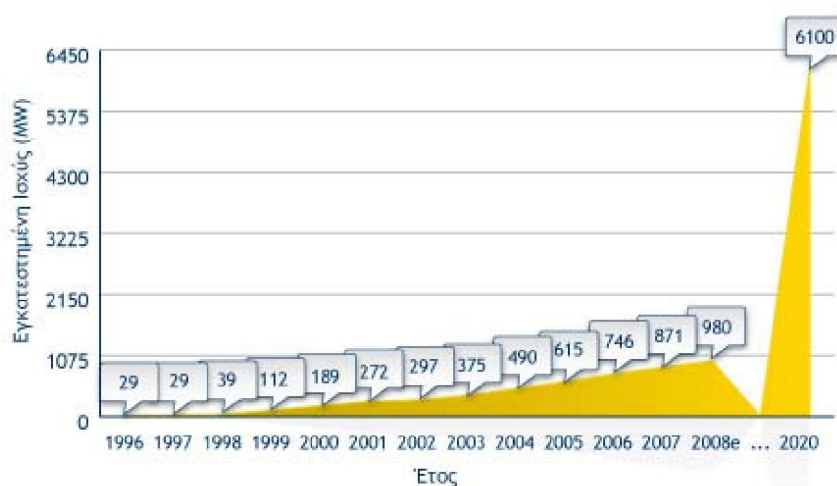
TOP 10 EU WIND ENERGY MARKETS (2005-2008)



Σχήμα 1.3 Οι δέκα μεγαλύτερες αγορές στον κόσμο στον τομέα της αιολικής ισχύος κατά το έτος 2008.

Στην Ελλάδα, όπου λόγω του πλούσιου αιολικού δυναμικού που διαθέτει η αιολική ενέργεια μπορεί να αποτελέσει σημαντικό μοχλό για την ανάπτυξή της, η κατάσταση δεν είναι αρκετά ικανοποιητική. Μετά την υπογραφή του Κιότο το Δεκέμβριο του 1997, η Ελλάδα, ως μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ακολουθεί πλέον την ευρωπαϊκή πολιτική όσον αφορά την εκπομπή αερίων που είναι υπεύθυνα για το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Κύριος στόχος ήταν η επίτευξη ποσοστού 20% διείσδυσης Α.Π.Ε. στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι και το 2010, στόχος όμως ο οποίος δυστυχώς δεν επετεύχθη. Για το λόγο αυτό δίνεται πληθώρα κινήτρων στους ανεξάρτητους παραγωγούς, μεταξύ των οποίων επενδυτικές επιχορηγήσεις, εγγυημένη σύνδεση στο δίκτυο, μακροπρόθεσμα συμβόλαια, κτλ. Επιπρόσθετα, η απελευθέρωση των ενεργειακών αγορών με την κατάργηση του καθετοποιημένου συστήματος παραγωγής-μεταφοράς-διανομής παρέχει τη δυνατότητα στους υποψήφιους ανεξάρτητους παραγωγούς να επενδύσουν σε περιοχές της επιλογής τους ανάλογα με τα συμφέροντά τους. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την κατάθεση στην Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (Ρ.Α.Ε.), η οποία ιδρύθηκε για να παρακολουθεί και να ελέγχει τη λειτουργία ολόκληρης της αγοράς ενέργειας, αιτήσεων για εγκατάσταση αιολικών πάρκων, ισχύος πάνω από 13000 MW. Οι περισσότερες αιτήσεις από αυτές αφορούν περιοχές της Ελλάδας με μεγάλο αιολικό δυναμικό, όπως η Εύβοια, η νοτιοανατολική Πελοπόννησος και η Θράκη [3,4].

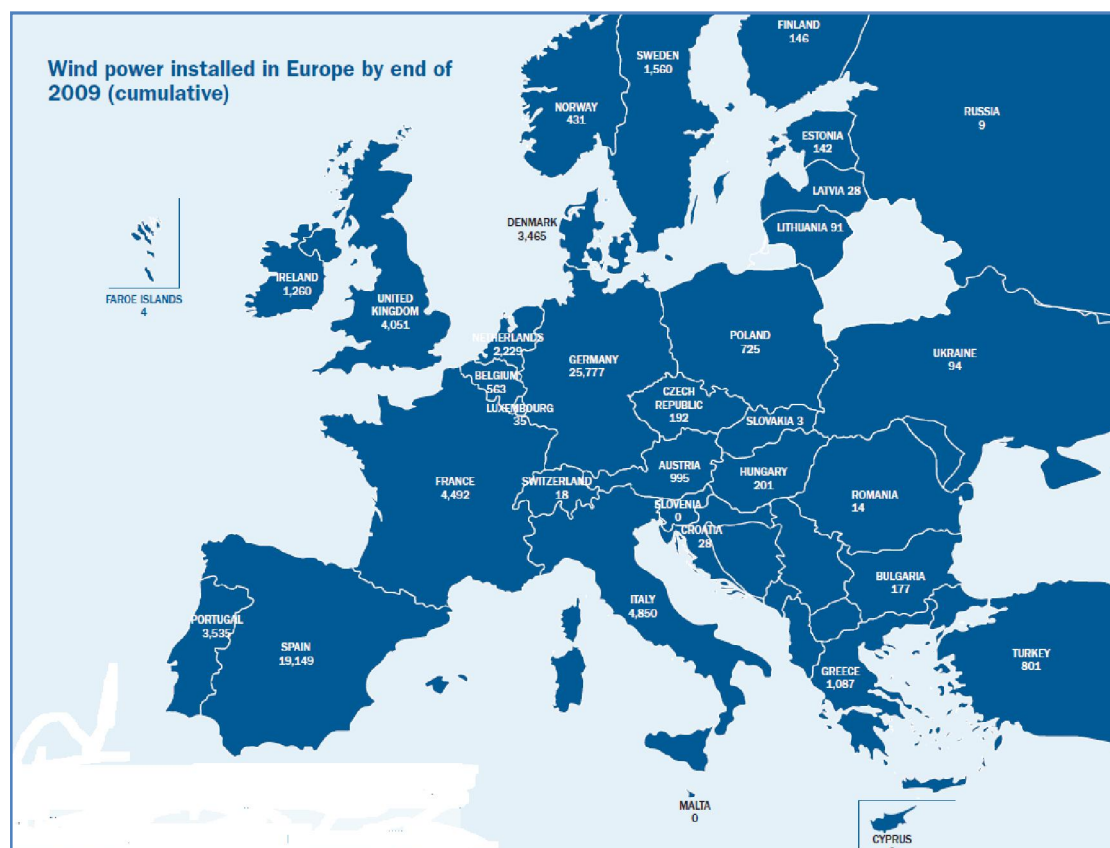
Ωστόσο, παρά το τεράστιο ενδιαφέρον από ανεξάρτητους παραγωγούς, το αιολικό δυναμικό της χώρας μας παραμένει σε μεγάλο βαθμό ανεκμετάλλευτο. Κύρια εμπόδια αποτελούν αφενός οι χρονοβόρες και επίπονες διαδικασίες έκδοσης αδειών εγκατάστασης (που κυρίως οφείλονται στην έλλειψη χωροταξικού σχεδιασμού και στην μη επαρκή στελέχωση και εκπαίδευση των αρμόδιων περιφερειακών υπηρεσιών) και, αφετέρου, νομικά ζητήματα που οφείλονται σε αντιδράσεις πολιτών, οι οποίες πηγάζουν από την εν γένει ελλιπή ενημέρωσή τους. Από τεχνικής απόψεως, περιορισμοί διείσδυσης αιολικής ισχύος δημιουργούνται από τα όρια μεταφερόμενης ισχύος στην ενδοχώρα και από τα όρια διείσδυσης στα νησιά. Έτσι, η παρούσα συνολική αιολική διείσδυση είναι μικρή.

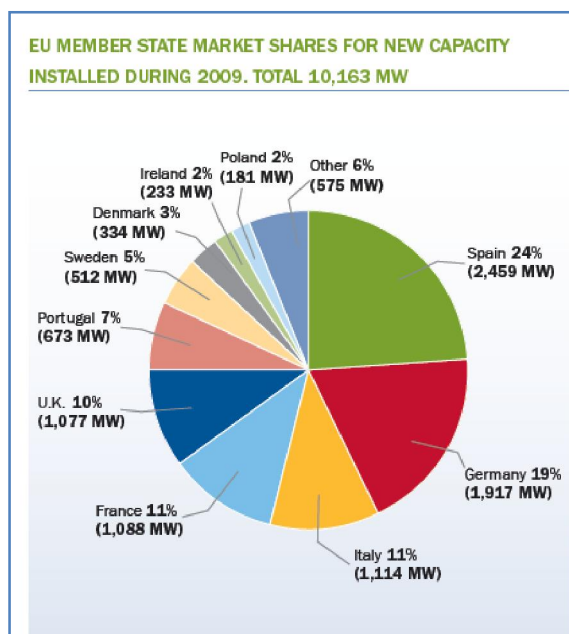


Σχήμα 1.4 Εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος από το έτος 1996-2008.

Η αυξανόμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά πάρκα (Α/Π) έχει οδηγήσει σε μερικές χώρες στην υψηλή διείσδυση της αιολικής ενέργειας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Τέτοια υψηλή διείσδυση έχει παρατηρηθεί τα τελευταία 5 χρόνια σε χώρες, όπως η Ισπανία, η Γερμανία και η Ιταλία (χώρες με υψηλό αιολικό δυναμικό και μεγάλη ευαισθησία στην εκμετάλλευση των Α.Π.Ε.). στο σχήμα 1.5, που ακολουθεί φαίνεται η εγκατεστημένη αιολική ισχύς σε κάθε ευρωπαϊκή χώρα το έτος 2009. Όσο οι διεισδύσεις αιολικής ισχύος στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας ήταν ακόμα χαμηλές, τα Α/Π αντιμετωπιζόνταν σαν αρνητικά φορτία, χωρίς ουσιαστική επίδραση στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Στη σημερινή πραγματικότητα όμως, δίνεται περισσότερη προσοχή στην αλληλεπίδραση των Α/Π με τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό οφείλεται στις διαφορές που παρουσιάζουν τα Α/Π σε σχέση με τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής.

Κύρια διαφοροποίηση των αιολικών πάρκων από τους συμβατικούς σταθμούς είναι ότι η πηγή ενέργειας, ο άνεμος, είναι μεταβαλλόμενη και δύσκολα προβλέψιμη. Έτσι, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς είναι συνάρτηση της τυχαίας ταχύτητας του ανέμου. Αντίθετα, οι συμβατικοί σταθμοί μπορούν με ρυθμιστές στροφών να ελέγχουν τη ροή του καυσίμου, και άρα και την παραγωγή της ηλεκτρικής ισχύος. Η μεταβλητότητα του ανέμου και η δυσκολία πρόβλεψής του επηρεάζουν τη δυνατότητα ενσωμάτωσης των Α/Π στα σημερινά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας από άποψη αξιοπιστίας [1].





Σχήμα 1.5 Εγκατεστημένη αιολική ισχύς σε κάθε ευρωπαϊκή χώρα το έτος 2009.

Σημαντική είναι και η διαφορά όσον αφορά την τεχνολογία μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Οι συμβατικοί σταθμοί αποτελούνται από σύγχρονες γεννήτριες απευθείας συνδεδεμένες στο δίκτυο, ενώ οι Α/Γ σε μεγάλο ποσοστό χρησιμοποιούν ασύγχρονες γεννήτριες που συνδέονται στο δίκτυο μέσω μετατροπέων αποτελούμενων από ηλεκτρονικά ισχύος. Ακόμη όμως και οι Α/Γ με σύγχρονη γεννήτρια συνδέονται στο δίκτυο μέσω ηλεκτρονικών ισχύος, γεγονός που διαφοροποιεί τα χαρακτηριστικά τους από αυτά των συμβατικών γεννητριών. Τα Α/Π, λόγω της απομακρυσμένης τοπολογίας τους, συνδέονται στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας συνήθως με ασθενείς γραμμές μεταφοράς ή στο δίκτυο μέσης τάσης. Αυτό δημιουργεί επιπρόσθετες δυσκολίες στην διασύνδεση των Α/Π, καθώς έχει συνέπειες σε θέματα αστάθειας τάσης. Αξίζει να σημειωθεί, βέβαια, ότι τα μελλοντικά αιολικά πάρκα αναμένεται να τοποθετούνται κυρίως στη θάλασσα (off-shore wind farms). Το βασικό πλεονέκτημα των υπεράκτιων αιολικών πάρκων, σε σχέση με τα συμβατικά που τοποθετούνται στην ξηρά, είναι ότι το αιολικό δυναμικό είναι εν γένει υψηλότερο, ενώ παράλληλα η τύρβη είναι χαμηλότερη. Η απόσταση ανάμεσα στο αιολικό πάρκο και το σημείο σύνδεσης στην ξηρά μπορεί να κυμαίνεται από λίγα χιλιόμετρα έως αρκετές δεκάδες χιλιόμετρα. Στην περίπτωση συνδέσεων με αγωγούς AC, η χωρητική φόρτιση λαμβάνει τόσο μεγάλες τιμές, ώστε αυτή η παράμετρος να περιορίζει το μήκος της σύνδεσης. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι η μεταφορά ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις υποθαλάσσια, χωρίς τη δυνατότητα αντιστάθμισης ισχύος, είναι δυνατή μόνο με DC συνδέσεις. Συνεπώς, αφού η χρήση DC σύνδεσης είναι επιβεβλημένη για τέτοια συστήματα, η χρήση όσο το δυνατόν περισσότερων συσκευών DC στο σύστημα είναι προτιμότερη, ως προς τις απώλειες, την πολυπλοκότητα και το κόστος. Αυτός ο τρόπος σύνδεσης επιτρέπει επιπλέον τον ανεξάρτητο έλεγχο της κάθε ανεμογεννήτριας με σκοπό, είτε την απόδοση μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking), είτε την παροχή σταθερής ισχύος στο δίκτυο. Ακόμα, είναι δυνατή η ρύθμιση του συνολικού συντελεστή

ισχύος του πάρκου, ιδιότητα ιδιαίτερα σημαντική, καθώς οι κανόνες διασύνδεσης απαιτούν τη δυνατότητα προσφοράς αέργου ισχύος ανάλογα με τη ζήτηση ισχύος και το επίπεδο της τάσης στο δίκτυο.

1.2.2. Κυριότερες Τεχνικές Απαιτήσεις για τα Αιολικά Πάρκα

Οι τεχνικές διαφορές, καθώς και το μεγάλο ποσοστό εγκατεστημένης ισχύος από τα αιολικά πάρκα ώθησε πολλές χώρες στην ανάγκη για τον καθορισμό ειδικών απαιτήσεων από τα Α/Π. Αυτές οι απαιτήσεις αποτυπώνονται στους Κώδικες Διαχείρισης του Συστήματος που εφαρμόζονται στις χώρες με υψηλές διεισδύσεις αιολικής ισχύος. Ο πρώτος Κώδικας με συγκεκριμένες απαιτήσεις συμπεριφοράς για τους αιολικούς σταθμούς του συστήματος μεταφοράς εκδόθηκε στις αρχές του 2003 από τη γερμανική εταιρία E.ON., και ανανεώθηκε το 2006, ενώ μέχρι σήμερα αντίστοιχοι Κώδικες τέθηκαν σε εφαρμογή σε πλήθος άλλων χωρών. Οι κώδικες αυτοί προσδίδουν στα αιολικά πάρκα χαρακτηριστικά συμβατικών σταθμών, απαιτούν, δηλαδή, τη συμμετοχή τους στη ρύθμιση του συστήματος, καθώς επίσης και δυναμική συμπεριφορά σε περιπτώσεις διαταραχών στο σύστημα. Οι κώδικες αυτοί αφορούν Α/Π μεγάλης ονομαστικής ισχύος, τα οποία κατά κανόνα συνδέονται απευθείας στο σύστημα μεταφοράς ΥΤ, και όχι μικρές μονάδες και σταθμούς διεσπαρμένης παραγωγής που συνδέονται στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Στη δεύτερη περίπτωση, οι τεχνικές απαιτήσεις που τίθενται από τους αντίστοιχους Κώδικες Διαχείρισης του Δικτύου ή τις σχετικές Οδηγίες Σύνδεσης αφορούν κυρίως ζητήματα ποιότητας ισχύος, συμβολής στη στάθμη βραχυκύκλωσης και διαμόρφωσης των προστασιών απόζευξης, τα οποία δεν είναι κεντρικής σημασίας για τα μεγάλα Α/Π του συστήματος μεταφοράς. Στη συνέχεια γίνεται μια γενική αναφορά στις κυριότερες τεχνικές απαιτήσεις που θέτουν οι Κώδικες για τα Α/Π.

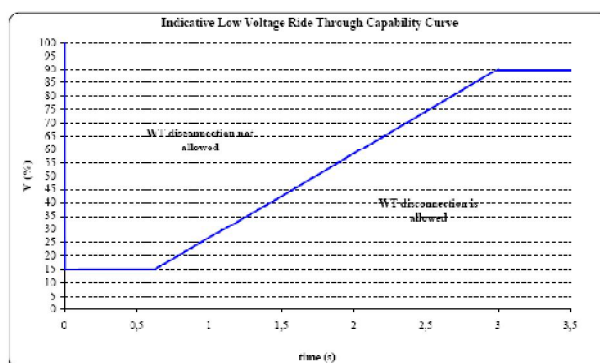
1.2.2.1. Ανοχή στις βυθίσεις τάσης και απόκριση σε καταστάσεις σφαλμάτων του δικτύου.

Ένα βραχυκύκλωμα ή μια διαταραχή στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας έχει σαν αποτέλεσμα τη βύθιση τάσης σε μία ή περισσότερες φάσεις ανάλογα με τον τύπο του βραχυκυκλώματος (ίσως και ανύψωση τάσης στις υγιείς φάσεις, πχ μετά από μονοφασικό βραχυκύκλωμα) στο σημείο που συνέβη. Η βύθιση τάσης σε μικρότερο βαθμό μπορεί να εξαπλωθεί και στη γειτονική περιοχή. Η διάρκεια της βύθισης τάσης είναι άμεση συνάρτηση του χρόνου λειτουργίας των συστημάτων προστασίας του συστήματος. Αυτοί οι χρόνοι κυμαίνονται από 0,1s έως λίγα δευτερόλεπτα, με συνηθέστερους χρόνους της τάξης των λίγων δεκάτων του δευτερολέπτου.

Η βύθιση τάσης προκαλεί μειωμένη ικανότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στα άκρα της γεννήτριας και έτσι δημιουργείται ανισορροπία ανάμεσα στη μηχανική ισχύ εισόδου και στην ηλεκτρική ισχύ εξόδου. Οι σύγχρονες γεννήτριες με τους ρυθμιστές στροφών που διαθέτουν μπορούν να διαχειριστούν αυτήν την κατάσταση και είναι υποχρεωμένες να παραμείνουν συγχρονισμένες κατά τη διάρκεια της βύθισης. Η συμπεριφορά των Α/Γ, όμως, είναι διαφορετική κατά τη διάρκεια του σφάλματος.

Μέχρι τώρα οι Α/Γ σε περίπτωση σφάλματος αποσυνδέονταν από το σύστημα για να προστατευθούν οι ίδιες. Αυτό δεν αποτελούσε μεγάλο πρόβλημα, αφού τα μεγέθη ισχύος ήταν μικρά και οι Α/Γ συνδέονταν κυρίως στο δίκτυο διανομής. Σήμερα, ωστόσο, λόγω της υψηλής διεύδυσης της αιολικής ενέργειας, και επειδή τα Α/Π συνδέονται περισσότερο στην ΥΤ ή και στην ΥΥΤ, η παραπάνω φιλοσοφία δεν είναι αποδεκτή, και αυτό διότι μία σύντομη βύθιση τάσης σε μία ευρεία παραγωγή θα είχε σαν αποτέλεσμα την απώλεια αρκετών εκατοντάδων MW. Όπως είναι κατανοητό, μία τέτοια αποσύνδεση είναι αρνητική για την ασφάλεια και την αξιοπιστία του συστήματος.

Για το λόγο αυτό, οι σύγχρονοι κώδικες προβλέπουν συγκεκριμένες και αυστηρές απαιτήσεις για τη δυνατότητα παραμονής σε λειτουργία των Α/Γ υπό συνθήκες βύθισης τάσης, οι οποίες είναι γνωστές ως Fault Ride-Through (FRT) ή Low Ride-Through (LVRT) Capability και εκφράζονται υπό τη μορφή καμπυλών τάσης-χρόνου. Στο σχήμα (1.6) φαίνεται η τυπική μορφή μιας τέτοιας καμπύλης. Για βυθίσεις τάσης πάνω από το όριο που ορίζει η καμπύλη στο επόμενο σχήμα, τα Α/Π πρέπει να παραμείνουν συνδεδεμένα στο δίκτυο, ενώ η αποσύνδεσή τους επιτρέπεται για βυθίσεις κάτω από το όριο αυτό. Η τάση που εμφανίζεται στο διάγραμμα είναι κατά κανόνα η τάση στο σημείο σύνδεσης με το δίκτυο, ενώ η βύθιση μπορεί να είναι συμμετρική ή ασύμμετρη (οπότε το διάγραμμα μπορεί να αφορά τη μεγαλύτερη από τις φασικές τάσεις), ανάλογα με τις προδιαγραφές του κάθε Κώδικα.



Σχήμα 1.6 Τυπική μορφή καμπύλης προδιαγραφών ανοχής Α/Π σε βυθίσεις τάσης.

Η μορφή των καμπυλών FRT είναι μεν παραπλήσια, αλλά τα ποσοτικά τους χαρακτηριστικά εξαρτώνται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κάθε συστήματος και καθορίζονται από τους αντίστοιχους Διαχειριστές, συνεκτιμώντας και τις τεχνικές δυνατότητες των διαθέσιμων Α/Γ.

Περαιτέρω απαιτήσεις εκτός από αυτές που σχετίζονται με το σχήμα (1.6) είναι η επαναφορά της ενεργού και αέργου ισχύος μετά την αποκατάσταση της τάσης στα επιτρεπτά επίπεδα. Για το λόγο αυτό ορίζονται ρυθμοί ανόδου της ενεργού ισχύος μετά την αποκατάσταση της τάσης.

Επίσης, κάποιοι από τους Κώδικες απαιτούν παραγωγή αέργου ισχύος κατά τη διάρκεια του σφάλματος για να υποστηρίξουν την τάση. Οι συμβατικές μονάδες παραγωγής είναι

εφοδιασμένες με συστήματα διέγερσης. Επιπλέον, μπορούν να αποθηκεύουν ενέργεια στο μαγνητικό τους πεδίο. Γι' αυτό είναι ικανές να παρέχουν υψηλό άεργο ρεύμα στη διάρκεια του βραχυκυκλώματος, έτσι ώστε να εξομαλύνουν τη βύθιση τάσης. Αντίστοιχη λειτουργία καλούνται να παρέχουν και τα Α/Π, δηλαδή να παρέχουν υποστήριξη τάσης κατά τη διάρκεια του σφάλματος, αλλά και μετά από αυτό. Η παραγωγή αέργου ρεύματος μετά το σφάλμα συμβάλλει στη γρηγορότερη επαναφορά του συστήματος μετά το σφάλμα.

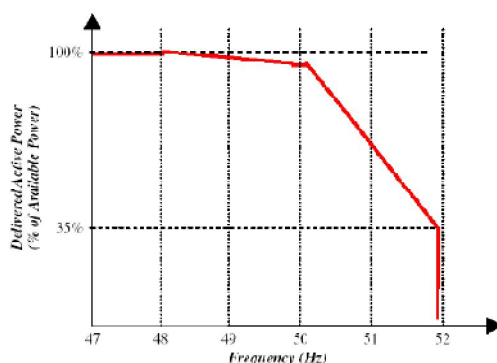
1.2.2.2. Έλεγχος ενεργού ισχύος και συχνότητας.

Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας η παραγωγή και η κατανάλωση ενεργού ισχύος πρέπει να βρίσκεται σε ισορροπία. Η μη ικανοποίηση του ισοζυγίου παραγωγής και κατανάλωσης ισχύος οδηγεί σε αποκλίσεις από την ονομαστική τιμή της συχνότητας.

Οι συμβατικές σύγχρονες γεννήτριες προσαρμόζουν την παραγωγή τους στην προβλεπόμενη ζήτηση. Αν, για παράδειγμα, η ζήτηση είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή, η ενέργεια που έχει αποθηκευτεί στον άξονα της μηχανής με τη μορφή κινητικής ενέργειας χρησιμοποιείται για να καλύψει την επιπλέον ζήτηση. Τότε η περιστροφική κίνηση των γεννητριών μειώνεται, και άρα η συχνότητα μειώνεται. Η απόκριση των γεννητριών στις μεταβολές του φορτίου συνιστά την πρωτεύουσα ρύθμιση (1-30 s). Η πρωτεύουσα ρύθμιση αφήνει ένα μικρό σφάλμα συχνότητας. Η δευτερεύουσα ρύθμιση (10-15 min) αναλαμβάνει να επαναφέρει τη συχνότητα στην ονομαστική της τιμή.

Οι Α/Γ χρησιμοποιούν κυρίως ασύγχρονες γεννήτριες και μετατροπείς (converters) για τη σύνδεση στο δίκτυο, γι' αυτό δε διαθέτουν εγγενώς τη συμπεριφορά που περιγράφηκε προηγουμένως. Στο παρελθόν, η συνήθης αντιμετώπιση των αιολικών σταθμών προέβλεπε την άμεση αποσύνδεσή τους σε περίπτωση ακόμη και μικρών αποκλίσεων της συχνότητας από την ονομαστική της τιμή, πρακτική που οδηγεί σε απώλεια παραγωγής υπό συνθήκες υπο-συχνότητας, άρα σε μεγαλύτερη καταπόνηση του ηλεκτρικού συστήματος.

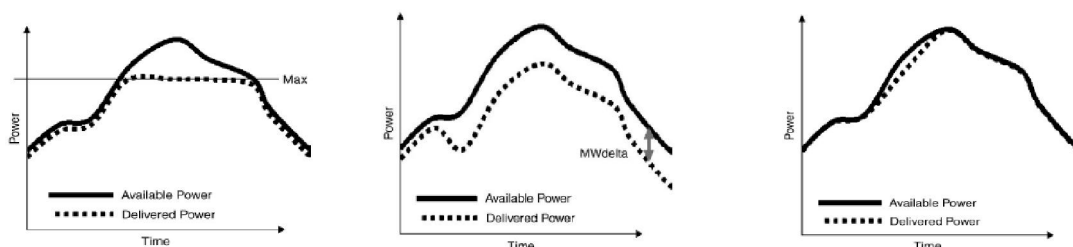
Οι σύγχρονοι Κώδικες απαιτούν από τα Α/Π να παραμένουν συνδεδεμένα σε αποκλίσεις συχνότητας και να παρέχουν απόκριση συχνότητας, δηλαδή να μεταβάλλουν την ενεργό ισχύ τους σε συνάρτηση με τις διακυμάνσεις της συχνότητας με τρόπο παρόμοιο όπως φαίνεται στο σχήμα (1.7).



Σχήμα 1.7 Ενδεικτική καμπύλη μεταβολής της ενεργού παραγωγής αιολικών σταθμών συναρτήσει της συχνότητας του συστήματος.

Στο διάγραμμα αυτό παρατηρείται ότι υπό συνθήκες αυξημένης συχνότητας (πλεόνασμα παραγωγής) επιβάλλεται δραστικός περιορισμός της ισχύος εξόδου του σταθμού, ενώ, αντίθετα, σε συνθήκες υπό-συχνότητας (έλλειμμα παραγωγής) η παραγωγή του αυξάνεται. Για να επιτευχθεί απόκριση αυτού του τύπου σε συνθήκες υπό-συχνότητας, ο σταθμός πρέπει να διαθέτει την απαραίτητη εφεδρεία ισχύος και συνεπώς να λειτουργεί υπό ελαφρώς μειωμένη ισχύ (σε σχέση με αυτή που μπορεί να παράγει για τις επικρατούσες συνθήκες ανέμου) υπό κανονικές συνθήκες συχνότητας. Μια τέτοια συμπεριφορά της ισχύος εξόδου μιμείται την καμπύλη στατισμού των συμβατικών μονάδων και επιτρέπει στο Α/Π να συμμετέχει στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του συστήματος.

Εκτός από την απόκριση συχνότητας, οι περισσότεροι Κώδικες προδιαγράφουν τη δυνατότητα περιορισμού της ενεργού ισχύος εξόδου (curtailment) των Α/Π σε μία τιμή αναφοράς (setpoint) με συγκεκριμένο ρυθμό μεταβολής της ενεργού ισχύος. Αυτή η απαίτηση είναι ιδιαίτερα σημαντική σε δίκτυα με περιορισμένη ικανότητα μεταφοράς ισχύος (κορεσμένα δίκτυα).



Σχήμα 1.8 Απαιτήσεις ελέγχου της ισχύος εξόδου αιολικών σταθμών (i)Περιορισμός μεγέθους (set point) (ii)Διατήρηση εφεδρείας ισχύος (delta control) (iii)Περιορισμός ρυθμού ανόδου.

Για να ικανοποιηθούν οι παραπάνω απαιτήσεις μπορούν να εφαρμοστούν στα Α/Π οι παρακάτω στρατηγικές ελέγχου:

- Δυνατότητα περιορισμού της ισχύος εξόδου κάτω από μια εξωτερικά μεταβαλλόμενη καθοριζόμενη τιμή, όπως φαίνεται στο σχήμα (1.8i), ώστε να είναι δυνατή η υλοποίηση περικοπών ισχύος, είτε βάσει προγραμματισμού, είτε εκτάκτως, από το κέντρο ελέγχου ενέργειας του συστήματος.
- Λειτουργία του σταθμού υπό δεδομένη εφεδρεία ισχύος (delta control), όπως ενδεικτικά φαίνεται στο σχήμα (1.8ii), ώστε να είναι δυνατή η συμμετοχή του στην πρωτεύουσα και δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας.
- Εφαρμογή περιορισμού στον ρυθμό ανόδου της ισχύος εξόδου, και δυνητικά στον ρυθμό καθόδου, αν το Α/Π λειτουργεί με επαρκή εφεδρεία ισχύος, δηλαδή αν χρησιμοποιεί και την στρατηγική του delta control (σχήμα (1.8iii)).

Με τον τρόπο αυτό, οι διακυμάνσεις της ισχύος εξόδου των αιολικών σταθμών προσεγγίζουν τις δυνατότητες φόρτισης/αποφόρτισης των συμβατικών μονάδων, και μειώνονται οι μεταβολές της ισχύος των τελευταίων.

Οι απαιτήσεις ενεργού ισχύος από τα Α/Π στοχεύουν στη διατήρηση σταθερής συχνότητας στο σύστημα και στην ικανοποίηση των προδιαγραφών ποιότητας ισχύος. Επίσης, αποσκοπούν στην αποφυγή της υπερφόρτωσης γραμμών μεταφοράς και στις μεγάλες βηματικές τάσεις και ρεύματα ζεύξης λόγω εκκίνησης ή παύσης των Α/Γ.

1.2.3. Όρια τάσης και συχνότητας.

Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας ακόμη και στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας μπορεί να εμφανιστούν τάσεις και συχνότητες που να αποκλίνουν σε κάποιο βαθμό από τις ονομαστικές τιμές. Οι συμβατικοί σταθμοί υποχρεούνται να συνεχίσουν να λειτουργούν μέσα σε συγκεκριμένα όρια τάσης και συχνότητας για να εξασφαλίσουν την αξιοπιστία της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, ακόμη και σε μη ονομαστική τάση και συχνότητα. Οι σχετικές απαιτήσεις συσχετίζουν τις αποδεκτές αποκλίσεις τάσης με τις αποδεκτές αποκλίσεις συχνότητας, και καθορίζουν τα όρια τάσης και συχνότητας με τα οποία ο σταθμός παραγωγής πρέπει να συνεχίσει τη λειτουργία του. Όμως, για μεγαλύτερες αποκλίσεις τάσης και συχνότητας, επιβάλλεται η αποσύνδεση του σταθμού μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, για να προστατευθεί ο ίδιος. Επιπλέον, επειδή τα ηλεκτρικά συστήματα είναι συγχρονισμένα, οι μεγάλες αποκλίσεις της συχνότητας πάνω από 1Hz δεν είναι καθόλου επιθυμητές και πρέπει να διαρκούν το ελάχιστο δυνατό. Για κάποιες αποκλίσεις τάσης και συχνότητας δίνεται η δυνατότητα στο σταθμό να μειώνει την ενεργό ισχύ εξόδου του.

Τα Α/Π και οι συνιστάμενες Α/Γ απαιτείται να έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά με τους συμβατικούς σταθμούς, άρα πρέπει να υπακούουν σε όρια τάσης και συχνότητας όπως περιγράφηκαν παραπάνω. Για το λόγο αυτό και αρκετοί Κώδικες προδιαγράφουν ξεχωριστά όρια για τα Α/Π, ενώ κάποιοι άλλοι θέτουν κοινά όρια για τους συμβατικούς σταθμούς και τα Α/Π. Η δυσκολία που αντιμετωπίζουν κάποιες τεχνολογίες Α/Γ στην ικανοποίηση τέτοιων απαιτήσεων οφείλεται στην εξάρτηση του μαγνητικού πεδίου από το λόγο V/f . Οι Κώδικες σε γενικές γραμμές απαιτούν από τους σταθμούς παραγωγής (συμβατικούς ή Α/Π) να παραμένουν συνδεδεμένοι για απόκλιση τάσης $\pm 10\%$ και για ακραίες τιμές της συχνότητας 47- 47.5 Hz και 52-53 Hz (για περιορισμένο χρόνο).

1.2.4. Έλεγχος άεργου ισχύος και τάσης.

Για τη διατήρηση της τάσης του συστήματος εντός των επιτρεπτών ορίων λειτουργίας είναι αναγκαία η εξασφάλιση του ισοζυγίου παραγωγής και κατανάλωσης άεργου ισχύος, όχι μόνο σε επίπεδο συνολικού συστήματος, αλλά και τοπικά στις επιμέρους ζώνες του, δεδομένου ότι η άεργος ισχύς δεν μπορεί να μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς να παραβιάζονται τα όρια τάσης. Η εξασφάλιση του ισοζυγίου άεργου ισχύος σε επίπεδο συστήματος μεταφοράς γίνεται κυρίως από τις σύγχρονες γεννήτριες των συμβατικών μονάδων παραγωγής και από τους ρυθμιστές τάσης που διαθέτουν. Επίσης, χρησιμοποιούνται πρόσθετα συστήματα αντιστάθμισης, όπως αποζεύξιμοι πυκνωτές και συσκευές FACTS, τοποθετημένα κυρίως κοντά στο φορτίο (δίκτυο διανομής). Στη ρύθμιση τάσης συμβάλλουν και τα συστήματα αλλαγής λήψεων των μετασχηματιστών ισχύος.

Με την αύξηση της αιολικής διείδυσης, τόσο τοπικά όσο και συνολικά σε επίπεδο συστήματος, αναπόφευκτα επηρεάζεται η ρύθμιση της τάσης και καθίσταται αναγκαία η ενεργός συμμετοχή των νέων σταθμών στη διατήρηση του ισοζυγίου άεργου ισχύος. Στο παρελθόν, η συνήθης απαίτηση αφορούσε στη διατήρηση του συντελεστή ισχύος (ΣΙ) των αιολικών σταθμών σε σχετικά υψηλές τιμές, προκειμένου να αποφεύγεται η αυξημένη κατανάλωση άεργου ισχύος από αυτούς. Ανάλογες απαιτήσεις εξακολουθούν να υφίστανται, αλλά με μια σημαντική διαφορά. Ενώ παλιότερα υπήρχε η απαίτηση για λειτουργία του αιολικού σταθμού σε σταθερό συντελεστή ισχύος, σήμερα απαιτείται η ικανότητά του για λειτουργία μέσα σε ένα εύρος ΣΙ. Έτσι, στους σημερινούς Κώδικες τίθενται σημαντικά διευρυμένα όρια δυνατής ρύθμισης του ΣΙ, τόσο σε επαγωγικές, όσο και σε χωρητικές τιμές (σε αρκετές περιπτώσεις και πέραν του 0.9 επαγωγικού ή χωρητικού). Επιπλέον, το εύρος ρύθμισης του ΣΙ συχνά συναρτάται με την ενεργό ισχύ του σταθμού, δεδομένου ότι υπό χαμηλή παραγωγή υφίσταται αυξημένο περιθώριο άεργου φόρτισης των μονάδων. Επίσης, σε αρκετές περιπτώσεις Κωδίκων, τα ζητούμενα περιθώρια ρύθμισης του ΣΙ εξαρτώνται άμεσα από την τάση του συστήματος στο σημείο σύνδεσης του σταθμού, γεγονός απόλυτα δικαιολογημένο αφού π.χ. υπό συνθήκες υψηλής τάσης δεν έχει νόημα (και γενικά αντενδείκνυται) η παραγωγή άεργων από τον σταθμό, και αντίστροφα υπό συνθήκες υπότασης. Το ενδεχόμενο αυτό δε λαμβάνεται υπόψη σε ορισμένους Κώδικες, στους οποίους η απαίτηση για λειτουργία υπό ΣΙ 0.9-0.95 επαγωγικό, ακόμη και σε τάσεις συστήματος 1.1 α.μ., μπορεί να οδηγήσει σε περαιτέρω υπερτάσεις και σημαντικές καταπονήσεις. Η δυνατότητα ελέγχου του ΣΙ εξόδου των αιολικών σταθμών επιτρέπει ποικιλία εναλλακτικών τρόπων ρύθμισης της άεργου παραγωγής τους : απλή διατήρηση μίας σταθερής τιμής ΣΙ, υλοποίηση χαρακτηριστικής ρύθμισης βάσει της τάσης του συστήματος, μεταβολή της άεργου ισχύος κεντρικά, με εντολές από το κέντρο κατανομής κτλ. Επιπρόσθετα, δίνει τη δυνατότητα στους αιολικούς σταθμούς να πραγματοποιούν ενεργό ρύθμιση τάσης, στα πρότυπα των συμβατικών μονάδων παραγωγής, είτε στο σημείο σύνδεσής τους, είτε ακόμα και σε περισσότερο απομακρυσμένα σημεία. Η απαίτηση υλοποίησης συστήματος ενεργού ρύθμισης της τάσης από τους αιολικούς σταθμούς περιλαμβάνεται πλέον σε αρκετούς Κώδικες.

Κεφάλαιο 2

2. Τα χαρακτηριστικά και οι πηγές του ανέμου.

2.1. Εισαγωγή.

Ανοίγοντας το κεφάλαιο για τα γενικά χαρακτηριστικά του ανέμου, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ο ορισμός του. Άνεμος ονομάζεται ο ατμοσφαιρικός αέρας ο οποίος βρίσκεται σε κίνηση. Για τον καθορισμό του διανύσματος της ταχύτητας του απαιτείται η γνώση της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου. Η διεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου εξαρτώνται τόσο από ειδικούς παράγοντες (γενική ατμοσφαιρική κυκλοφορία, πεδίο πίεσης), όσο και από τους τοπικούς παράγοντες (ανάγλυφο της περιοχής, ύπαρξη θάλασσας). Η γενική ατμοσφαιρική κυκλοφορία οφείλεται σε τρεις λόγους: τη διαφορετική θερμοκρασία μεταξύ του ισημερινού και των πόλων, τη περιστροφή της γης γύρω από τον άξονα της και, τέλος, την ανομοιομορφία της θερμικής συμπεριφοράς θάλασσας και ξηράς. Από το σύνολο των κινήσεων του ανέμου η σπουδαιότερη, σε σχέση με τον προσδιορισμό του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής, είναι η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας του ανέμου. Για την επιλογή της κατάλληλης θέσης εγκατάστασης μιας ανεμογεννήτριας (Α/Γ) απαιτείται η γνώση της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου, η καταγραφή των επικρατέστερων διευθύνσεων στην περιοχή, αναταράξεις, ο στροβιλισμός και η τύρβη του ανέμου, καθώς και η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει του ύψους από το έδαφος. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η βασική θεωρία της αιολικής ενέργειας στην οποία βασίζεται η κατασκευή και λειτουργία των ανεμοκινητήρων. Δίνονται οι ορισμοί που θα χρειασθούν για την επιλογή και αναπαράσταση των διαφόρων τμημάτων της ανεμογεννήτριας [5].

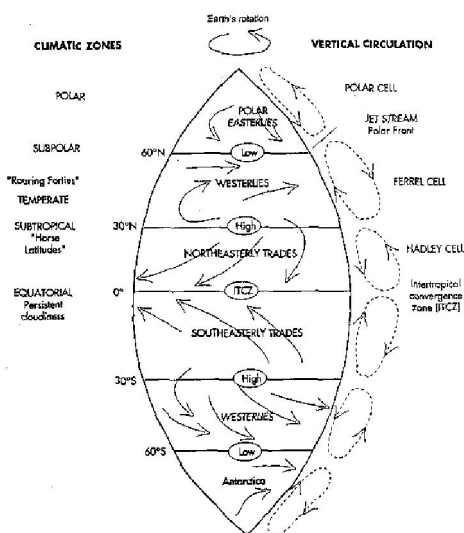
2.1.1. Συνολικά παγκόσμια δείγματα.

Γενικά οι άνεμοι προκαλούνται από τις διαφορές πίεσης σε όλη την επιφάνεια της γης πράγμα το οποίο οφείλεται στην άνιση θέρμανση της γης από την ηλιακή ακτινοβολία. Για παράδειγμα το ποσοστό της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερο στον ισημερινό από ότι στους πόλους της γης. Η διακύμανση της εισερχόμενης ενέργειας δημιουργεί κυψέλες στα χαμηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας (τροπόσφαιρα). Έτσι σε ένα απλό μοντέλο ροής του ανέμου, ο αέρας αυξάνεται στον ισημερινό και βυθίζεται στους πόλους. Η κυκλοφορία της ατμόσφαιρας που προέρχεται από την άνιση θέρμανση της γης επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την περιστροφή της γης (με ταχύτητα περίπου τα 600 Km/h στον ισημερινό, και με ταχύτητα που αγγίζει το μηδέν στους πόλους). Επιπρόσθετα

οι εποχιακές διακυμάνσεις της κατανομής της ηλιακής ενέργειας προκαλούν μεταβολή στην κυκλοφορία της ατμόσφαιρας.

Οι κατά τόπους μεταβολές της μεταφοράς θερμότητας στην ατμόσφαιρα της γης δημιουργούν διαφοροποιήσεις στην ατμοσφαιρική πίεση του αέρα που προκαλεί την μετάβαση του αέρα από την υψηλή στην χαμηλή πίεση. Η δύναμη της πίεσης κατά την κατακόρυφη διεύθυνση είναι συνήθως αναιρούμενη από την βαρυτική δύναμη. Έτσι οι άνεμοι που επικρατούν κατά κύριο λόγο στο οριζόντιο επίπεδο ανταποκρίνονται στην βαθμωτή μεταβολή της οριζόντιας πίεσης. Την ίδια στιγμή υπάρχουν δυνάμεις που προσπαθούν να συνδυάσουν τις διαφορετικές θερμοκρασίες και πιέσεις των αέριων μαζών που διανέμονται σε όλη την επιφάνεια της γης. Εκτός από την διαφορά πίεσης και τις βαρυτικές δυνάμεις, επίσης η αδράνεια του αέρα, η περιστροφή της γης, καθώς και η τριβή του αέρα με την επιφάνεια της γης (γεγονός το οποίο δημιουργεί τις τυρβώδους αναταράξεις του αέρα) επηρεάζουν τους ανέμους της ατμόσφαιρας. Η επίδραση κάθε μιας από τις προαναφερθείσες δυνάμεις στα αιολικά συστήματα της ατμόσφαιρας διαφέρει.

Όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.1 η κυκλοφορία του αέρα σε όλο τον κόσμο περιλαμβάνει μεγάλης κλίμακας δείγμα ανέμου που επηρεάζουν τους ανέμους που επικρατούν κοντά στην επιφάνεια που καλύπτουν ολόκληρο τον πλανήτη. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι αυτό το μοντέλο αποτελεί μία απλούστερη μορφή διότι δεν περιλαμβάνει την επίδραση των ξηρών μαζών που επηρεάζουν την κατανομή του ανέμου [5].



Σχήμα 2.1. Κυκλοφορία ενός παγκόσμιου δείγματος των επιφανειακών ανέμων

2.1.2. Η μηχανική της κίνησης του ανέμου.

Σε ένα από τα απλούστερα μοντέλα για την μηχανική της κίνησης του αέρα της ατμόσφαιρας μπορούν να συμπεριληφθούν τέσσερις δυνάμεις. Αυτές περιλαμβάνουν δυνάμεις πίεσης (δύναμη βαροβαθμίδας), την δύναμη Coriolis που προκαλείται από την

περιστροφή της γης, δυνάμεις τριβής, καθώς και εφαπτόμενες δυνάμεις στην επιφάνεια της γης (φυγόκεντρες δυνάμεις).

- **Δύναμη βαροβαθμίδας**, ονομάζεται η δύναμη που ασκείται σε μια αέρια μάζα εξαιτίας των διαφορετικών πιέσεων που υπάρχουν σ' αυτήν και η οποία ωθεί την αέρια μάζα από τις ψηλές πιέσεις προς τις χαμηλές

Η δύναμη της πίεσης του αέρα F_p (ανά μονάδα μάζας) δίδεται από τον παρακάτω τύπο:

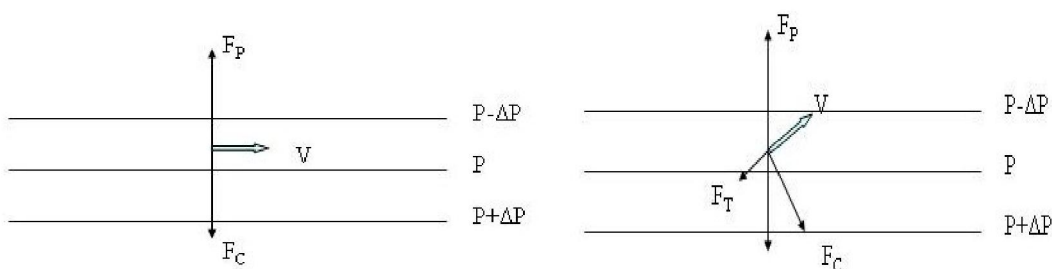
$$F_p = \frac{-1}{\rho} \times \frac{\partial p}{\partial n}$$

Όπου ρ η πυκνότητα του αέρα και n είναι η κάθετη κατεύθυνση των γραμμών της σταθερής πίεσης. Και $\frac{\partial p}{\partial n}$ είναι οι ισοβαρείς.

- **Η δύναμη Coriolis** (ανά μονάδα μάζας), F_c είναι μία εικονική δύναμη αφού προέρχεται από τις μετρήσεις που γίνονται σχετικά με την περιστροφή της γης και εκφράζεται ως:

$$F_c = f \times U$$

Όπου U είναι η ταχύτητα του ανέμου, και f είναι η παράμετρος Coriolis ($f = 2 \times \omega \times \sin \varphi$) όπου φ είναι το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, και ω η γωνιακή ταχύτητα της γης. Η δύναμη Coriolis η οποία, όπως και η φυγόκεντρος δύναμη γίνεται αντιληπτή σε κάθε περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς άρα και σε αυτό της γης: λόγω της περιστροφής από τη δύση προς την ανατολή, στο βόρειο ημισφαίριο η δύναμη Coriolis επιδρά με τέτοιο τρόπο, ώστε ένα κινούμενο αντικείμενο (όπως π.χ ένα στοιχειώδες τμήμα αέρα) να παρουσιάζει κάμψη της τροχιάς του προς τα δεξιά, καθώς κοιτάμε προς την κατεύθυνση της κίνησης του. Στο νότιο ημισφαίριο, η αντίστοιχη κάμψη συμβαίνει προς τα αριστερά. Η δύναμη Coriolis είναι ανάλογη του ημιτόνου του γεωγραφικού πλάτους του τόπου στον οποίο λαμβάνει χώρα η κίνηση, είναι δηλαδή πιο μεγάλη στους πόλους (γεωγραφικό πλάτος 90°) και μηδέν στον ισημερινό, όπου το γεωγραφικό πλάτος είναι μηδέν. Στο Βόρειο Ημισφαίριο, εξαιτίας της δύναμης αυτής, τα σώματα αποκλίνουν δεξιά από την κίνησή τους, ενώ στο Νότιο ημισφαίριο αποκλίνουν αριστερά. Όταν οι ισοβαρείς είναι ευθείες παράλληλες, τότε ο ατμοσφαιρικός αέρας, δέχεται την επίδραση της δύναμης βαροβαθμίδας (F_p), που τον μετακινεί αρχικά από τις υψηλές προς τις χαμηλές πιέσεις και της δύναμης Coriolis (F_c), που τον εκτρέπει προς τα δεξιά (στο Βόρειο Ημισφαίριο). Αν δεν υπάρχουν τριβές στην κίνηση της αέριας μάζας, τότε ο άνεμος πνέει τελικά, όπως δείχνει το πιο κάτω σχήμα, παράλληλα προς τις ισοβαρείς σχήμα 2.2(α). Ο άνεμος που δημιουργείται από την ισορροπία των δύο αυτών δυνάμεων, ονομάζεται **γεωστροφικός άνεμος**.



Σχήμα. 2.2. Γεωστροφικός άνεμος V , δύναμη βαροβαθμίδας F_p , δύναμη coriolis F_c .

Όσο πιο πυκνές είναι οι ισοβαρείς καμπύλες σε ένα χάρτη επιφανείας, τόσο πιο μεγάλη είναι η δύναμη βαροβαθμίδας και άρα τόσο μεγαλύτερη και η ταχύτητα του ανέμου. Στην περίπτωση που οι ισοβαρείς είναι ευθείες παράλληλες, αλλά η κίνηση γίνεται κοντά στο έδαφος, τότε η δύναμη της βαροβαθμίδας (F_p) αντισταθμίζεται από τη συνισταμένη της δύναμης Coriolis (F_c) και της δύναμης της τριβής (F_T), όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2 (β). Στην περίπτωση αυτή ο άνεμος δεν πνέει παράλληλα προς τις ισοβαρείς, αλλά έχει στραφεί προς τις χαμηλές πιέσεις.

Το μέγεθος του γεωστροφικού ανέμου U_g είναι συνάρτηση της ισορροπίας των δυνάμεων και δίνεται από τον τύπο:

$$U_g = \frac{-1}{f \times \rho} \times \frac{\partial p}{\partial n}$$

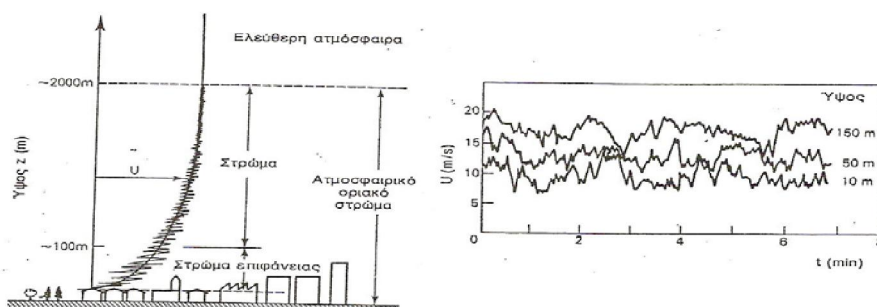
Όπου f η παράμετρος Coriolis, και ρ η πυκνότητα του αέρα.

- **Η δύναμη τριβής** αναπτύσσεται εξαιτίας της τραχύτητας που παρουσιάζει η επιφάνεια του εδάφους και της θάλασσας, πάνω στην οποία υποχρεώνεται να κινηθεί η αέρια μάζα. Επομένως έχει νόημα και ενδιαφέρον όταν η μελέτη της κίνησης περιορίζεται στα χαμηλά τμήματα της Τροπόσφαιρας. Το μέτρο της δύναμης αυτής είναι ανάλογο της ταχύτητας με την οποία κινείται η αέρια μάζα και έχει φορά αντίθετη με εκείνη της ταχύτητας.
- **Η φυγόκεντρη δύναμη** είναι η δύναμη με την οποία αντιδρά κάθε σώμα, το οποίο κινείται σε κυκλική τροχιά. Η δύναμη αυτή είναι ανάλογη της κεντρομόλου επιτάχυνσης και ανάλογη της ακτίνας καμπυλότητας της τροχιάς.

Γενικά: Οι άνεμοι που ενδιαφέρουν τις εφαρμογές αιολικής ενέργειας ονομάζονται επιφανειακοί άνεμοι και επηρεάζονται πολύ από την επιφάνεια της γης σε ύψη 0-200 m AGL.

2.1.3. Το ατμοσφαιρικό στρώμα

Καθώς η ατμόσφαιρα βρίσκεται σε σχετική κίνηση με τη γη, στο κατώτατο τμήμα της λόγω του ιξώδους του αέρα δημιουργείται ένα στρώμα αέρα, το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, μέσα στο οποίο η σχετική ταχύτητα μεταβάλλεται από μηδέν πάνω στην επιφάνεια της γης, μέχρι μεγαλύτερες τιμές.



Σχήμα 2.3 Το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα.

Τα χαρακτηριστικά του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, καθορίζονται κυρίως από τη μορφή της επιφάνειας της γης (τραχύτητα επιφάνειας), αλλά και από τον άνεμο και την κατάσταση της ατμόσφαιρας. Για ομαλό έδαφος και αδύναμο άνεμο το πάχος του οριακού στρώματος μπορεί να είναι της τάξης των 200 μέτρων, ενώ για ανώμαλη επιφάνεια και έντονο άνεμο είναι δυνατό να φθάσει μέχρι τα 2000 μέτρα. Αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν δίνεται η μέση ταχύτητα του ανέμου σε μια περιοχή ή αν διατίθενται μετρήσεις του ανέμου της υπό μελέτη περιοχής. Αυτά τα δεδομένα, πρέπει να συνοδεύονται από το ύψος στο οποίο αναφέρονται, ώστε να τα αναχθούν στο επιθυμητό ύψος.

2.1.4. Μεταβολή ταχύτητας ανέμου με το ύψος

Οι εκφράσεις που χρησιμοποιούνται σήμερα στον υπολογισμό της διανομής της ταχύτητας μέσα στο επιφανειακό στρώμα είναι :

Λογαριθμικός νόμος :

$$U(Z) = \frac{U^*}{K} \times \ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)$$

Εκθετικός νόμος :

$$U(Z) = U(Z_0) \times \left(\frac{Z}{Z_0}\right)^a$$

Όπου $U(z)$ η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος Z , U^* η ταχύτητα τύρβης, α ο εκθέτης του εκθετικού νόμου, k η σταθερά Von Karman ($k=0,35$) και Z_0 η παράμετρος τραχύτητας ή μήκος τραχύτητας.

Συνήθως στα μετεωρολογικά προβλήματα χρησιμοποιείται ο εκθετικός νόμος λόγω της απλότητάς του. Ο εκθέτης αποτελεί μια ένδειξη της μορφής της επιφάνειας του εδάφους. Υπάρχουν πίνακες που δίνουν τιμές για τον εκθέτη και βασίζονται σε πειραματικές προσεγγίσεις.

Ενδεικτικές τιμές για τον εκθέτη είναι $a=0,17$ για ανοιχτά πεδία, όπως είναι η θάλασσα ή ο χώρος ενός αεροδρομίου, $a=0,20$ για μικρές πόλεις με χαμηλές κατασκευές και $a=0,25$ για πόλεις με μεγάλες και πολυώροφες κατασκευές.

2.1.5. Μεταβολή ταχύτητας ανέμου σε σύνθετη τοπογραφία

Σε μια σύνθετη τοπογραφία, η ταχύτητα του ανέμου μπορεί να μεταβάλλεται σημαντικά μεταξύ κοντινών περιοχών. Αυτή η διαφοροποίηση έχει δύο όψεις. Από τη μία προσφέρει τη δυνατότητα της μεγιστοποίησης της απόδοσης μίας μηχανής ή ενός αιολικού πάρκου, από την άλλη κινδυνεύει να οδηγηθεί σε αποτυχία η όλη η επένδυση αν δεν γίνει προσεκτική επιλογή της θέσης.

Ο θεωρητικός υπολογισμός των επιδράσεων της ανώμαλης τοπογραφίας στην ταχύτητα του ανέμου μπορεί να γίνει πολύ δύσκολα και μόνο με τη χρήση υπολογιστών. Έχουν δημιουργηθεί διάφορα μοντέλα πρόβλεψης που επιχειρούν να λύσουν το πρόβλημα αυτό. Τα αποτελέσματα είναι αποδεκτά για περιπτώσεις τοπογραφίας με μικρές κλίσεις ενώ για απότομες κλίσεις δεν υπάρχει αξιόπιστο μοντέλο.

Παρά τη δυσκολία που υπάρχει στον υπολογισμό του ανέμου σε ανώμαλη τοπογραφία, σε απλούστερες περιπτώσεις υπάρχουν εμπειρικοί κανόνες που μπορούν να εφαρμοστούν και να δώσουν ποιοτικές και ποσοτικές εκτιμήσεις. Όσον αφορά το σχήμα 2.4 ο άνεμος που συναντάει τον λόφο, επιταχύνεται στην κορυφή και επιβραδύνεται στους πρόποδες. Έστω

Η το ύψος του λόφου και $2L$ το πλάτος του λόφου σε ύψος $H/2$. Υπάρχει ένα ύψος l πάνω από την κορυφή, όπου η σχετική η επιτάχυνση, ΔS γίνεται μέγιστη :

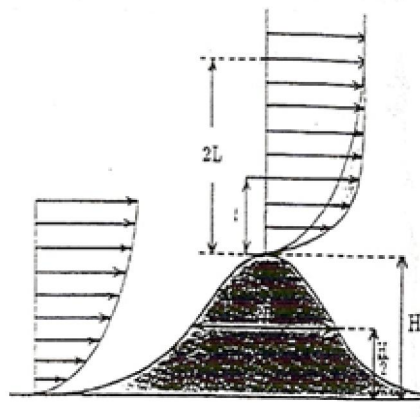
$$l = 0.3 \times Z_0 \times \left(\frac{L}{Z_0} \right)^{0.67}, \Delta S_1 = 2 \times \frac{l}{L}$$

όπου l το ύψος πάνω από την κορυφή του λόφου, ενώ Z_0 είναι το ύψος τραχύτητας που εξαρτάται από τη μορφή της επιφανείας του εδάφους.

Το προφίλ της ταχύτητας αποτελείται από τρία μέρη: ανάμεσα στο επίπεδο της γης και το ύψος l το προφίλ είναι λογαριθμικό, ανάμεσα στο ύψος l και $2L$ ένα διαφοροποιημένο λογαριθμικό προφίλ, ενώ από το ύψος $2L$ και πάνω το προφίλ του ανέμου παραμένει αμετάβλητο, $\Delta S=0$

$$\Delta S = \begin{cases} \frac{2h}{L}, & h \leq l \\ \frac{2h}{L} \times \frac{\ln\left(\frac{H}{2L}\right)}{\ln\left(\frac{l}{2L}\right)}, & l < h \leq 2L \end{cases}$$

Οι παραπάνω σχέσεις μπορούν να δώσουν ικανοποιητικά αποτελέσματα όταν η κάθετη στην κατεύθυνση του ανέμου διάσταση του λόφου είναι πολύ μεγαλύτερη από $2L$ και το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί ως δυσδιάστατο. Στην πραγματικότητα, η επιτάχυνση της ροής είναι μικρότερη, καθώς η ροή του ανέμου τείνει να κινηθεί γύρω από το λόφο.



Σχήμα 2.4 Προσπίπτων άνεμος σε λόφο ύψους H .

2.1.6. Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το χρόνο.

Η ταχύτητα του ανέμου σε μία ορισμένη θέση στο χώρο δεν παραμένει σταθερή στο χρόνο, αλλά μεταβάλλεται κατά μέγεθος και διεύθυνση. Σημαντικά μεγέθη, αναφορικά με τα ανεμολογικά δεδομένα είναι η μέση ταχύτητα ανέμου, η τυπική απόκλιση και ο βαθμός της τύρβης.

Η μέση ταχύτητα του ανέμου υπολογίζεται δεδομένης μίας σειράς μετρήσεων από την σχέση :

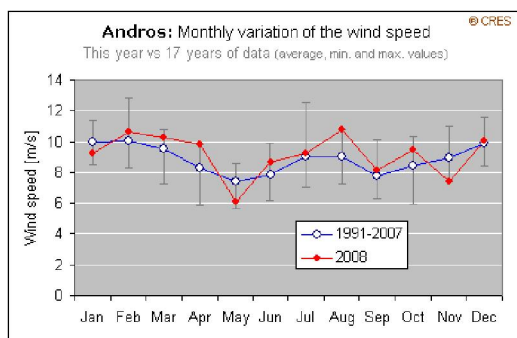
$$\bar{V} = \frac{1}{N} \times \sum_1^N \times V_n$$

Η τυπική απόκλιση δείχνει πόσο οι μετρήσεις αποκλίνουν από τη μέση τιμή του ανέμου

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \times \sum_1^N \times (V_n - \bar{V})^2}$$

όπου η μέση ταχύτητα του ανέμου, V_n η ταχύτητα του ανέμου στο n σημείο των μετρήσεων και $n=1,2,3,\dots,N$ ο αριθμός των μετρήσεων.

Στο σχήμα 2.5 παρουσιάζεται η διακύμανση της μέσης μηνιαίας ταχύτητας ανέμου κατά την διάρκεια του 2008 από μετρήσεις που έγιναν στην Άνδρο και αντιπαραβάλλονται με μετρήσεις προηγούμενων 17 ετών.



Σχήμα 2.5 Ταχύτητα του ανέμου για το νησί της Άνδρου.

Με τον όρο τύρβη ονομάζεται η διαταραχή της ταχύτητας του ανέμου και έχει ιδιαίτερη σημασία για την απόδοση των αιολικών μηχανών, αλλά και τον υπολογισμό της αντοχής λόγω των εναλλασσόμενων φορτίων που αναπτύσσονται και που οδηγούν στην κόπωση των υλικών της μηχανής. Ο βαθμός της τύρβης S ορίζεται ως η τυπική απόκλιση της πρώτης μέτρησης από τη μέση τιμή των δέκα λεπτών :

$$s = \frac{\sigma}{\bar{V}}$$

Η διάρκεια πνοής του ανέμου σε μια περιοχή είναι απαραίτητο στοιχείο για τον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας μιας μηχανής. Η καμπύλη διάρκειας πνοής του ανέμου που εκφράζει το ποσοστό του χρόνου για τις οποίες πνέει άνεμος ταχύτητας μεγαλύτερης μίας συγκεκριμένης τιμής. Η καμπύλη πυκνότητας πιθανότητας ταχύτητας $P(V)$ αποτελεί μία άλλη καμπύλη ισοδύναμη με την καμπύλη διάρκειας πνοής του ανέμου και εκφράζει την πυκνότητα πιθανότητας ο άνεμος να έχει ταχύτητα μεταξύ δύο τιμών. Οι δύο καμπύλες παρουσιάζουν την ίδια πληροφορία με διαφορετικό τρόπο. Η καμπύλη πυκνότητας πιθανότητας μπορεί να προκύψει με παραγωγή της καμπύλης διάρκειας πνοής του ανέμου. Το εμβαδόν της επιφάνειας που ορίζεται κάτω από τις καμπύλες διάρκειας πνοής ανέμου και πυκνότητας πιθανότητας είναι ίσο με τη μονάδα ή 8760 ώρες, δηλαδή το 100% του έτους.

2.1.7. Στροβιλισμός και αναταράξεις του αέρα.

Η διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου, γύρω από μια μέση ταχύτητα, είναι χαρακτηριστικό φαινόμενο της τυρβώδους ροής. Μέτρο της διακύμανσης της ταχύτητας του ανέμου αποτελεί η διασπορά της ταχύτητας του ανέμου σ_v^2 , η οποία ορίζεται ως:

$$\sigma_v^2 = \frac{1}{T} \times \int (V_w(t) - V_w)^2 \times dt$$

με τυπική χρονική περίοδο μέτρησης $T=10$ min.

Ένταση της ανατάραξης I_t ονομάζεται ο λόγος της διασποράς προς τη μέση ταχύτητα του ανέμου. Το μέγεθος αυτό χαρακτηρίζεται και σαν ένταση της τύρβης του ανέμου, χαρακτηρίζει δε και το επίπεδο της τύρβης της ατμόσφαιρας σε μια περιοχή:

$$I_t = \frac{\sigma_v}{V_w}$$

Η ένταση της ανατάραξης είναι ανάλογη της τραχύτητας του εδάφους και αντιστρόφως ανάλογη του ύψους μελέτης από το έδαφος. Χρησιμοποιώντας το αντιπροσωπευτικό μήκος z_0 της μέσης τοπικής τραχύτητας, η ένταση της ανατάραξης προσεγγίζεται ικανοποιητικά από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$I_t = \frac{1}{\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)}$$

για $Z_0 = 0.20m$

$$I_t = \frac{0.78 - 0.14 \times \ln Z_0}{\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)}$$

για $Z_0 > 0.20 m$

Η ένταση της ανατάραξης ή το επίπεδο τύρβης του αέρα επηρεάζει σημαντικά τόσο την αεροδυναμική συμπεριφορά της Α/Γ, όσο και τα χαρακτηριστικά όλης της εγκατάστασης. Οι αναταράξεις του ανέμου είναι το αποτέλεσμα των τυχαίων στροβιλισμών που υπάρχουν σε κάθε τυρβώδες πεδίο ροής, ενισχύονται δε από την τραχύτητα της επιφάνειας του εδάφους. Επίσης, η παρουσία εμποδίων κάτω από ορισμένες ανεμολογικές συνθήκες είναι δυνατόν να δημιουργήσουν οργανωμένους στροβίλους, οι οποίοι αλλοιώνουν συνολικά το πεδίο ταχύτητας του ανέμου. Ο στροβιλισμός, των οργανωμένων στροβίλων, επηρεάζει τόσο την παραγόμενη ισχύ μιας Α/Γ, όσο και τη δυναμική συμπεριφορά των κατασκευαστικών στοιχείων μιας εγκατάστασης.

Προβλήματα στην λειτουργία μιας αιολικής εγκατάστασης δημιουργούνται και από ξαφνικούς ανέμους ιδιαίτερα μεγάλης ταχύτητας και μικρής διάρκειας, οι οποίοι καλούνται ριπές ανέμου. Στην περίπτωση που παρουσιαστούν ιδιαίτερα υψηλές ταχύτητες ανέμου με διάρκεια μεγαλύτερη των 30 sec, οι Α/Γ τίθενται, για λόγους αυτοπροστασίας, εκτός λειτουργίας. Για τον προσδιορισμό της μέσης μέγιστης ριπής του ανέμου $V_w \max$ σε ύψος z συναρτήσει της μέσης ωριαίας τιμής της ταχύτητας στο ίδιο ύψος ισχύει ότι:

$$V_w \max = V_w(Z) \times [1 + \gamma \times I_u(Z)]$$

Όπου

$\gamma(t)$: ο συντελεστής ριπής ο οποίος δίνεται από την σχέση $\gamma(t) = 0.42 \cdot \ln(3600/t)$

I_u : η αδιάστατη τιμή της τύρβης κατά την διεύθυνση του ανέμου.

Παρόμοια αποτελέσματα δίνονται από την πιο κάτω εξίσωση, η οποία προσδιορίζει τη ριπή του ανέμου V_{wt} χρονικής διάρκειας t δευτερολέπτων, συναρτήσει της μέσης ωριαίας ταχύτητας στο ύψος μελέτης z , του συντελεστή τραχύτητας z_0 της περιοχής (που μετρείται σε μήκος) και ενός χρονικού συντελεστή $C_a(t)$:

$$V_{wt}(Z) = V_w(Z) \times [1 + 0.98 \times C_a(t) / \ln(Z/Z_0)]$$

Το Z_0 μπορεί να πάρει τις ακόλουθες τιμές:

- $5 \cdot 10^{-4}$ για θάλασσες και λίμνες,
- $1 \cdot 10^{-3}$ για επίπεδες επιφάνειες,
- $5 \cdot 10^{-1}$ για πυκνόφυτες περιοχές και προάστια πόλεων.

Η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου είναι απαραίτητη για ενεργειακούς σκοπούς ενώ η τιμή της τύρβης της ροής απαιτείται για τον υπολογισμό των μεταβαλλόμενων φορτίων που επιδρούν στην Α/Γ και που οδηγούν σε γήρανση των υλικών.

2.2. Μετρήσεις Αιολικού δυναμικού

Οι μετρήσεις του Αιολικού δυναμικού πραγματοποιούνται με τα ανεμόμετρα, τα οποία καταγράφουν την ταχύτητα του ανέμου και την κατεύθυνση του, μετατρέποντας την κινητική ενέργεια του αέρα, σε μηχανική ροπή που στρέφει έναν άξονα συνδεδεμένο με την μετρητική συσκευή.

Υπάρχουν άλλες διατάξεις όπως τα ανεμόμετρα Sonic, Laser Doppler και άλλα που μετράνε την θερμική ενέργεια που μεταφέρεται από τον αέρα, σε ένα ηλεκτρισμένο καλώδιο εκτεθειμένο στον άνεμο. Στην πράξη για εφαρμογές αιολικής ενέργειας, οι μηχανικές διατάξεις είναι οι πιο διαδεδομένες λόγω της απλότητάς της κατασκευής τους καθώς και της μικρής κατανάλωσης ενέργειας, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε απομονωμένους μετρητικούς σταθμούς.

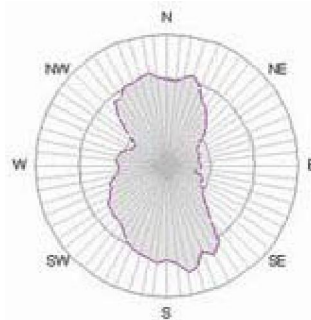
Οι πιο συνηθισμένες μονάδες μέτρησης είναι μέτρα ανά δευτερόλεπτο (m/sec), χιλιόμετρα ανά ώρα (km/h), ναυτικά μίλια ανά ώρα (mph) γνωστά και ως knots. Οι μετρήσεις Αιολικού δυναμικού, συνήθως γίνονται ανά δέκα λεπτά, αλλά και η χρήση ανεμολογικών δεδομένων σε ωριαία ο βάση είναι επίσης αποδεκτή.

2.2.1. Ρόδο ανέμου

Μία σημαντική πληροφορία που δεν φαίνεται στις κατανομές ταχύτητας που περιγράφηκαν πιο πάνω είναι η συχνότητα εμφάνισης κάθε κατεύθυνσης. Ο πίνακας διπλής εισόδου της συχνότητας πνοής ανέμου ανά διεύθυνση μπορεί να παρασταθεί γραφικά με το ροδόγραμμα ανέμου. Το ροδόγραμμα ανέμου μιας περιοχής είναι αρκετά εποπτικό διάγραμμα που δίνει αμέσως την κατεύθυνση ανέμου που επικρατεί στην περιοχή και τη διάρκειά του πνοής ανέμου από κάθε κατεύθυνση. Στο κέντρο εμφανίζεται το ποσοστό της άπνοιας ετησίως.

Για να φτιάξει κανείς το ρόδο ανέμου μιας περιοχής είναι απαραίτητο να κάνει μετρήσεις. Οι μετρήσεις πρέπει να έχουν μεγάλη χρονική διάρκεια, τουλάχιστον δέκα χρόνια, για να

θεωρούνται αξιόπιστες. Οι μετρήσεις πρέπει να είναι αξιόπιστες, διότι μικρή απόκλιση στην εκτίμηση του αιολικού δυναμικού, προκαλεί μεγάλη απόκλιση στην εκτίμηση της παραγόμενης ενέργειας στο σχήμα 3.4. Παρουσιάζεται ένα ροδόγραμμα το οποίο προέρχεται από μετρήσεις στην Άνδρο.



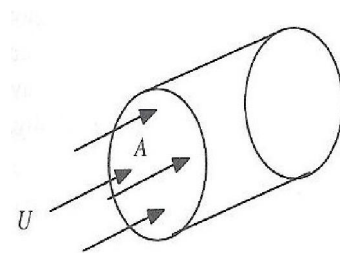
Σχήμα 2.6 Ροδόγραμμα ανέμου.

2.3. Αεροδυναμική μετατροπή.

2.3.1. Η ισχύς του ανέμου.

Όπως είναι φανερό από το σχήμα που ακολουθεί μπορεί κανείς να καθορίσει την μαζική ροή του αέρα ($\frac{dm}{dt}$) μέσα από την επιφάνεια (A) του ρότορα, σύμφωνα με την εξίσωση της μηχανικής των ρευστών που ακολουθεί [6].

$$\frac{dm}{dt} = \rho \times A \times U$$



Σχήμα 2.13 Η επιφάνεια πρόσπτωσης του αέρα.

Η κινητική ενέργεια του ανέμου, καθώς και η ενέργεια του ανέμου ανά μονάδα επιφάνειας δίδονται αντιστοίχως από τις ακόλουθες σχέσεις

$$P_{Wind} = \frac{1}{2} \times \frac{dm}{dt} \times U^2$$

$$\frac{P_{Wind}}{A} = \frac{1}{2} \times \rho \times U^3$$

Η ισχύ σε Watts ενός ρεύμα ανέμου που διέρχεται από μία περιοχή μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$P_{Wind} = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times u_{Wind}^3$$

Όπου ρ είναι η πυκνότητα του αέρα σε Kg/m^3 και το u_{Wind} είναι η στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου σε m/s . Το ποσό της ενέργειας που μεταφέρεται είναι απευθείας ανάλογο της

πυκνότητας του αέρα, της επιφάνειας που σαρώνει ο ρότορας και του κύβου της ταχύτητας του ανέμου. Η ροή μάζας του αέρα που διέρχεται από την επιφάνεια που σαρώνει η ανεμογεννήτρια μεταβάλλεται με την ταχύτητα του ανέμου και την πυκνότητα του αέρα. Η πυκνότητα του αέρα μεταβάλλεται ανάλογα με την τοποθεσία και τον χρόνο και είναι περίπου 1.26Kg/m^3 στους 20°C σε μία τυπική ατμόσφαιρα. Η κινητική ενέργεια μίας δεδομένης μάζας μεταβάλλεται με το τετράγωνο της ταχύτητας της. Επειδή η ροή του αέρα αυξάνεται γραμμικά με την ταχύτητα του ανέμου η διαθέσιμη αιολική ισχύς σε μία ανεμογεννήτρια αυξάνεται με τον κύβο της ταχύτητας του ανέμου. Για τις ανεμογεννήτριες η περιοχή σάρωσης (A) ισούται με $\pi \cdot (D/2)^2 \text{ m}^2$ όπου D είναι η διάμετρος του ρότορα σε μέτρα. Ως εκ τούτου είναι προφανές ότι η αιολική ενέργεια διαφέρει ανάλογα με το τετράγωνο της διαμέτρου της ανεμογεννήτριας και με τον κύβο της ταχύτητας του ανέμου. Καθώς η ανεμογεννήτρια απορροφά ενέργεια από τον άνεμο αυτός επιβραδύνεται γεγονός που τον αναγκάζει να διαχέεται, και να αποκλίνει τριγύρω από την ανεμογεννήτρια σε κάποιο βαθμό. **Ο γερμανός φυσικός Albert Betz προσδιόρισε το 1919 ότι μία ανεμογεννήτρια μπορεί να απορροφήσει το πολύ το 59% της ενέργειας που σε άλλη περίπτωση θα διερχόταν από την διατομή της (Νόμος Betz).** Επίσης ο νόμος του BETZ αποδεικνύει ότι η θεωρητική μέγιστη ισχύ που μπορεί να εξαχθεί από τον άνεμο ισούται με τα $(16/17) \cdot P_{\text{wind}}$. Το όριο του Betz είναι ανεξάρτητο από την σχεδίαση της ανεμογεννήτριας. Η παραγόμενη και μη ομοιογενής ροή αέρα καθώς και οι απώλειες τριβών κατά κανόνα μειώνουν την ισχύ εξόδου στο 0.5% της ενέργειας που μεταφέρεται στον άνεμο. Όπως προαναφέραμε μία ανεμογεννήτρια δεν μπορεί να παραλάβει όλη αυτή την ισχύ γιατί τότε ο αέρας που θα περνούσε πίσω από την έλικα της ανεμογεννήτριας δεν θα απομακρυνόταν διότι θα είχε μηδενική κινητική ενέργεια στην έξοδο. Θεωρητικά μια ιδανική ανεμογεννήτρια θα πρέπει να μειώσει την αρχική ταχύτητα του αέρα κατά τα $2/3$.

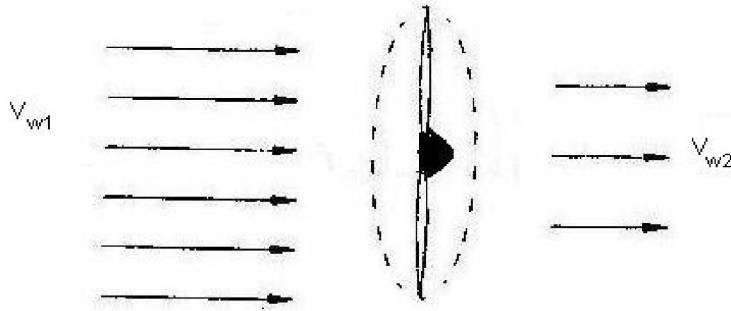
Όπως προαναφέρθηκε, από την συνολική ισχύ του ανέμου μόνο ένα κλάσμα εκμεταλλεύεται ένας ανεμοκινητήρας (A/K). Αυτό είναι ένα φαινόμενο που συμβαίνει σε όλα τα συστήματα μετατροπής σύμφωνα με το οποίο όταν η ενέργεια μετατρέπεται από μια μορφή σε άλλη, η απόδοση μετατροπής περιορίζεται από διάφορους φυσικούς περιορισμούς [6].

Με βάση το Σχήμα 3.3 όταν μια μάζα αέρα με ταχύτητα V_{w1} προσπίπτει στα πτερύγια μιας αιολικής μηχανής ένα μέρος της ενέργειας που μεταφέρει προσλαμβάνεται από τη μηχανή ενώ το υπόλοιπο που τη διαπερνάει κινείται με μια μικρότερη ταχύτητα V_{w2} [7].

όπως είδαμε ($V_{w2} < V_{w1}$). Η μείωση της ενέργειας της κινούμενης μάζας είναι:

$$KE = \frac{1}{2} \times m \times V_{w1}^2 - \frac{1}{2} \times m \times V_{w2}^2 \Rightarrow$$

$$KE = \frac{1}{2} \times m \times (V_{w1}^2 - V_{w2}^2)$$



Σχήμα 2.14 Ταχύτητες του ανέμου πριν και μετά τον δρομέα.

Υποθέτοντας, ότι έχουμε ένα ιδανικό αιολικό σύστημα. Κατ' αρχήν διαπιστώνουμε ότι η ταχύτητα V_{wr} με την οποία περιστρέφονται τα πτερύγια μιας αιολικής μηχανής είναι μικρότερη από την V_{w1} . Επειδή έχουμε ένα ιδανικό σύστημα όλη η μείωση της ταχύτητας V_{w1} πηγαίνει στο ρότορα του Α/Κ. Άρα η ταχύτητα V_{w2} είναι μικρότερη από τη V_{wr} . Εξισώνοντας την πιο πάνω εξίσωση με την ενέργεια που απορροφάται κατά την αλλαγή της ορμής του αέρα $m(V_{w1}-V_{w2})V_{wr}$ έχουμε ότι:

$$\frac{1}{2} \times m \times (V_{w1}^2 - V_{w2}^2) = m \times (V_{w1} - V_{w2}) \times V_{wr} \Rightarrow$$

$$V_{wr} = \frac{V_{w1} + V_{w2}}{2}$$

Ας θεωρήσουμε ότι άνεμος περνά κάθετα από μία επιφάνεια A , πάχους x οποιουδήποτε σχήματος. Αν η ροή του αέρα είναι ομαλή, χωρίς στροβιλισμούς και έχει πυκνότητα ρ τότε η μάζα αέρα που υπάρχει στο δοκίμιο του παραπάνω σχήματος(2.13) είναι

$$m = \rho \times A \times x$$

Και γνωρίζοντας ότι

$$\frac{dm}{dt} = \rho \times A \times W_{wr}$$

Η ισχύς του ανέμου P_w που απομαστεύεται από τον άξονα του ανεμοκινητήρα θα είναι ο ρυθμός μεταβολής της μειούμενης κινητικής ενέργειας της αέριας μάζας, δηλαδή

$$P_w = \frac{d(KE)}{dt} = \frac{1}{2} \times \frac{dm}{dt} \times (V_{w1}^2 - V_{w2}^2) \Rightarrow$$

$$P_w = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times V_{wr} \times (V_{w1}^2 - V_{w2}^2).$$

Από την τελευταία εξίσωση και την εξίσωση που παίρνουμε το V_{wr} έχουμε:

$$P_w = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times (V_{w1} + V_{w2}) \times (V_{w1}^2 - V_{w2}^2) \Rightarrow$$

$$P_w = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times V_{w1}^3 \times \left[1 + \frac{V_{w2}}{V_{w1}} - \left(\frac{V_{w2}}{V_{w1}}\right)^2 - \left(\frac{V_{w2}}{V_{w1}}\right)^3 \right]$$

Αν παραγωγίσουμε την παραπάνω εξίσωση ως προς V_{w2}/V_{w1} (ο λόγος αυτός αποτελεί τη μεταφορά ισχύος) και εξισώσουμε με το μηδέν προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση από την οποία βρίσκουμε τη μέγιστη μεταφορά ισχύος:

$$\frac{dP_w}{d\left(\frac{V_{w2}}{V_{w1}}\right)} = 0 \Rightarrow$$

$$3 \times \left(\frac{V_{w2}}{V_{w1}}\right)^2 + 2 \times -\left(\frac{V_{w2}}{V_{w1}}\right) - 1 = 0 \Rightarrow$$

$$\frac{V_{w2}}{V_{w1}} = \frac{1}{2}$$

$$P_{w \max} = \frac{8}{27} \times \rho \times A \times V_{w1}^3 \Rightarrow$$

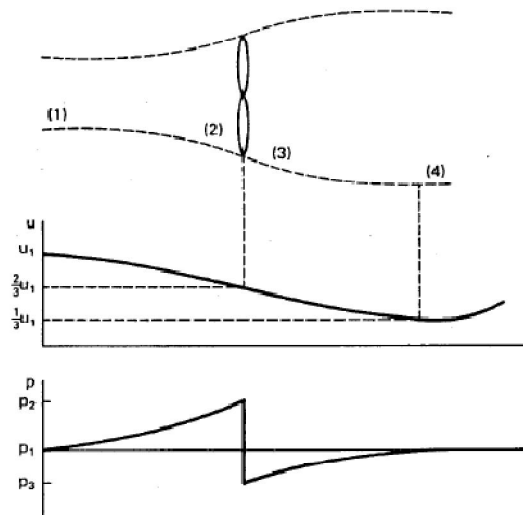
$$P_{w \max} = \frac{8}{27} \times \rho \times A \times V_{w1}^3 \Rightarrow$$

$$P_{w \max} = 0.593 \times \rho \times A \times V_{w1}^3$$

Η εξίσωση αυτή λέγεται **νόμος ή όριο Betz**.

2.3.2. Η θεωρία του δίσκου ενέργειας και η ζώνη σκίασης.

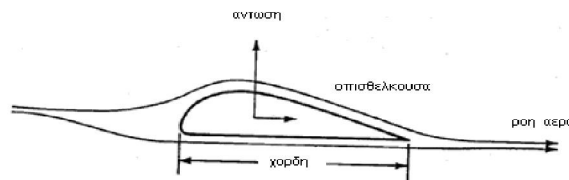
Με τη θεωρία του δίσκου ενέργειας εξηγούμε τον μηχανισμό δέσμευσης της κινητικής ενέργειες του ανέμου από την πτερωτή της ανεμογεννήτριας. Η παρουσία της ανεμογεννήτριας μπροστά από μία μάζα κινούμενου αέρα τροποποιεί την ταχύτητα και την πίεση της όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, όπου απεικονίζει τον ροικό σωλήνα μίας ανεμογεννήτριας. Ας θεωρήσουμε τον σωλήνα κινούμενου αέρα με αρχική διάμετρο d_1 , ταχύτητα u_1 και πίεση p_1 , καθώς πλησιάζει την τουρμπίνα η ταχύτητα του αέρα μειώνεται και η πίεση του αυξάνεται, προκαλώντας μεγέθυνση της διαμέτρου του σωλήνα σε d_2 όση και αυτής της τουρμπίνας. Η πίεση του αέρα θα γίνει μέγιστη λίγο μπροστά από την τουρμπίνα και θα πέσει κάτω από την ατμοσφαιρική αμέσως μετά από αυτήν. Μέρος της κινητικής ενέργειας του αέρα μετατρέπεται σε δυναμική για προκαλέσει την αύξηση της πίεσης. Ακόμα περισσότερη κινητική ενέργεια θα μετατραπεί σε δυναμική μετά την τουρμπίνα, έτσι ώστε να αυξηθεί η πίεση του αέρα και να γίνει ίση με την ατμοσφαιρική. Αυτό προκαλεί περαιτέρω μείωση της ταχύτητάς του αέρα, μέχρις ότου η πίεση γίνει και πάλι ίση με την ατμοσφαιρική.



Σχήμα 2.15 Ροϊκός σωλήνας του δρομέα της Α/Γ.

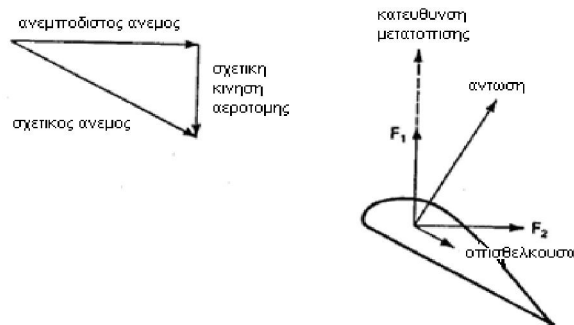
2.3.3. Η αεροδυναμική των πτερυγίων .

Η ροή του αέρα γύρω από μία σταθερή αεροτομή, παράγει δύο δυνάμεις Μία δύναμη που λέγεται άντωση (lift) και είναι κάθετη στη ροή και μία άλλη που λέγεται οπισθέλκουσα (draft), στην κατεύθυνση του ανέμου (Σχ. 2.16).



2.16 Άντωση και οπισθέλκουσα δύναμη σε μία σταθερή αεροτομή.

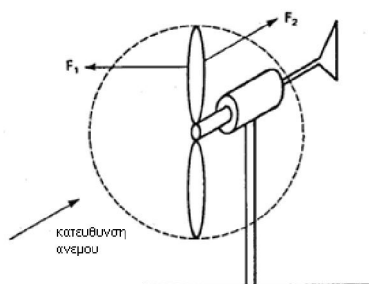
Η ύπαρξη της άντωσης εξαρτάται από την ομοιόμορφη ροή γύρω από την αεροτομή, πράγμα που σημαίνει ότι ο αέρας ρέει ομαλά και από τις δύο πλευρές της. Εάν η ροή είναι τυρβώδης τότε θα δημιουργηθεί μικρή ή και μηδενική άντωση. Ο αέρας που ρέει πάνω από την κορυφή της αεροτομής επιταχύνεται, γιατί πρέπει να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση και αυτή η αύξηση της ταχύτητας προκαλεί κάποια μικρή μείωση της πίεσης. Αυτή η διαφορά πίεσης μεταξύ των δύο πλευρών της αεροτομής προκαλεί την άντωση, δύναμη κάθετη στην κατεύθυνση της ροής του ανέμου. Η κίνηση του ανέμου προκαλεί επίσης την οπισθέλκουσα δύναμη κατά την κατεύθυνση του ανέμου. Αυτός είναι ένας όρος απωλειών και ελαχιστοποιείται όσο είναι δυνατόν, σε υψηλής απόδοσης Α/Γ. Και οι δύο αυτές δυνάμεις είναι ανάλογες της πυκνότητας του αέρα, της επιφάνειας της αεροτομής και του τετραγώνου της ταχύτητας του ανέμου [8].



Σχήμα 2.17 Άντωση και οπισθέλκουσα δύναμη σε μία μετατοπισμένη αεροτομή.

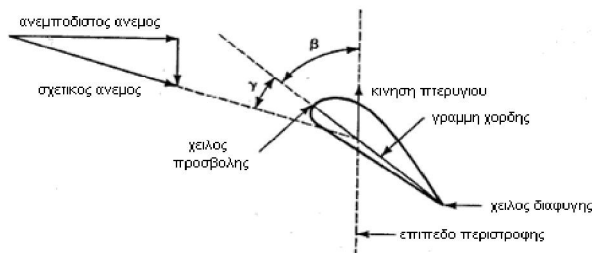
Υποθέτοντας ότι γίνεται επιτρεπτό στην αεροτομή να κινηθεί κατά την κατεύθυνση της άντωσης, αυτή η κίνηση (μετατόπιση) θα συνδυαστεί με την κίνηση του αέρα, ώστε να παραχθεί η σχετική κατεύθυνση του ανέμου (Σχ. 2.17). Η αεροτομή έχει επαναπροσανατολιστεί, ώστε να διατηρήσει έναν καλό λόγο άντωσης προς την οπισθέλκουσα δύναμη. Η άντωση είναι κάθετη στην σχετική κατεύθυνση του ανέμου, αλλά δεν είναι κάθετη στην κατεύθυνση της μετατόπισης. Οι δύο δυνάμεις μπορούν να αναλυθούν σε δύο συνιστώσες, μία παράλληλη και μία κάθετη στην διεύθυνση του αδιατάρακτου ανέμου και αυτές οι συνιστώσες συνδυάζονται να να διαμορφώσουν την δύναμη F_1 στην κατεύθυνση της μετατόπισης και την F_2 στην κατεύθυνση του αδιατάρακτου ανέμου. Η δύναμη F_1 είναι διαθέσιμη να να παράγει το χρήσιμο έργο. Η δύναμη F_2 πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τον σχεδιασμό της στήριξης της αεροτομής, ώστε να υπάρχει δομική στιβαρότητα. Ένας πρακτικός τρόπος για να χρησιμοποιηθεί η F_1 , είναι η σύνδεση των αεροτομών ή πτερυγίων σε μία κεντρική πλήμνη και να επιτρέψουμε σε αυτά να περιστραφούν γύρω από έναν οριζόντιο άξονα. Η δύναμη F_1 προκαλεί την ροπή, η οποία οδηγεί κάποιο φορτίο συνδεδεμένο με την προπέλα. Ο πύργος πρέπει να είναι αρκετά ισχυρός να αντέξει την δύναμη F_2 .

Αυτές οι δυνάμεις και η όλη απόδοση εξαρτώνται από την κατασκευή και τον προσανατολισμό των πτερυγίων. Μία σημαντική παράμετρος είναι η γωνία βήματος (κλίσης) του πτερυγίου β (pitch angle), η οποία είναι η γωνία μεταξύ της χορδής του πτερυγίου και του επιπέδου περιστροφής. Η χορδή είναι μία ευθεία που συνδέει το χείλος προβολής (leading edge) με το χείλος διαφυγής (trailing edge) μίας αεροτομής. Το επίπεδο περιστροφής είναι το επίπεδο το οποίο σχηματίζουν τα ακροπτερύγια καθώς περιστρέφονται.



Σχήμα 2.18 Αεροδυναμικές δυνάμεις στα πτερύγια μίας ανεμογεννήτριας.

Μία άλλη σημαντική παράμετρος του πτερυγίου είναι η γωνία πρόσπτωσης γ (angle of attack), η οποία είναι η γωνία μεταξύ της χορδής του πτερυγίου και του σχετικού ανέμου ή της αποτελεσματικής κατεύθυνσης της ροής του αέρα.



Σχήμα 2.19 Ορισμός της γωνίας βήματος πτερυγίου και της γωνίας πρόσπτωσης.

2.3.4. Θεωρητικός υπολογισμός συχνοτήτων κατανομής ταχυτήτων ανέμου.

Όπως αναφέρθηκε και πριν η ταχύτητα του ανέμου διαρκώς αλλάζει . Για αυτό είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν στατιστικά εργαλεία για να περιγράψουν αυτή την μη στατιστική διαδικασία . Για να μοντελοποιηθούν οι κατανομές της ταχύτητας του ανέμου, γενικά χρησιμοποιείται η κατανομή Weibull με δύο παραμέτρους, τον συντελεστή κλίμακας C_w και τον συντελεστή μορφής k_w . Γενικά η κατανομή Weibull είναι ασύμμετρη και περιγράφεται με δύο παραμέτρους όπως φαίνεται από την ακόλουθη εξίσωση [6,9].

$$f(u) = \left(\frac{k_w}{c_w}\right) \times \left(\frac{u}{c_w}\right)^{k_w-1} \times \exp\left(-\left(\frac{u}{c_w}\right)^{k_w}\right)$$

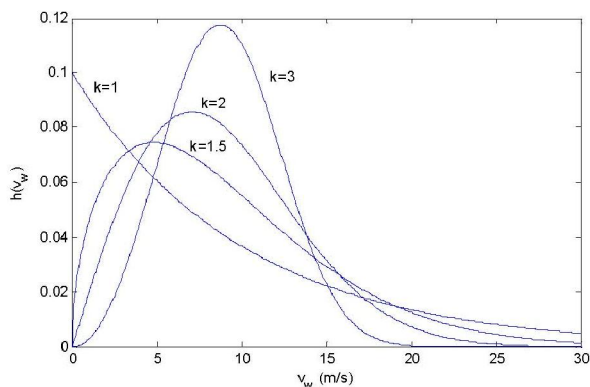
Όπου u η ταχύτητα του ανέμου.

Οι παράμετροι c_w και k_w υπολογίζονται χρησιμοποιώντας δεδομένα της ταχύτητας του ανέμου μεγάλης χρονικής περιόδου. Η ταχύτητα του ανέμου μπορεί να αλλάζει σημαντικά από χρόνο σε χρόνο. **Οι κατανομές Weibull απεικονίζουν το γεγονός ότι οι ισχυροί άνεμοι είναι σπάνιοι, ενώ μέτριοι και ψυχροί άνεμοι είναι πιο κοινοί.** Για τον υπολογισμό αυτών των δύο παραμέτρων υπάρχουν διάφορες μέθοδοι, κάποιες από τις οποίες είναι οι εξής: **η μέθοδος των ροπών, του παράγοντα ενεργειακών προτύπων, μεγίστης πιθανότητας, πιθανότητας Weibull και χρήσης ποσοστιαίων εκτιμητών.** Οι συγκρίσεις των αναλυτικών αποτελεσμάτων αυτών των μεθόδων δείχνουν ότι δεν υπάρχει σημαντική ανακολουθία με αποτελέσματα που προέκυψαν από άλλες μεθόδους. Γενικά, η παράμετρος C_w λαμβάνει τιμές από 2 έως 8 ενώ η παράμετρος k_w κυμαίνεται από 1,5 έως 2,2.

Η αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας ορίζεται από αυτόν τον τύπο:

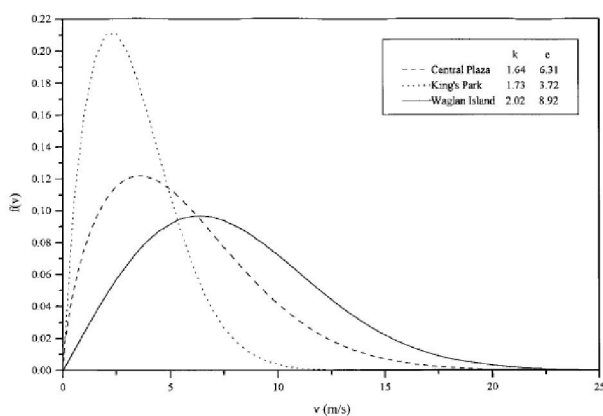
$$F(u) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{u}{c_w}\right)^{k_w}\right]$$

Η μορφή της συνάρτησης $F(u)$ καθορίζεται από την τιμή της παραμέτρου μορφής, k_w . Στο παρακάτω σχήμα εικονίζεται η συνάρτηση για τέσσερις ενδεικτικές τιμές. Παρατηρείται ότι αύξηση της τιμής του k_w προκαλεί αύξηση του ύψους της κατανομής, καθώς και κάποια μετατόπιση της κατανομής σε υψηλότερες ταχύτητες ανέμου.



Σχήμα 2.20. Μορφή της κατανομής Weibull για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου μορφής k .
 Παράμετρος κλίμακας $c=10$ m/s.

Γενικά, για την εκτίμηση των παραμέτρων k_w και c_w χρειάζονται δεδομένα ταχύτητας του ανέμου που να καλύπτουν περίοδο αρκετών χρόνων. Παρακάτω παρουσιάζεται η κατανομή Weibull της ταχύτητας του ανέμου που έχει εκτιμηθεί με την χρονοσειρά των μετρήσεων της ταχύτητας που αντιστοιχεί σε τρεις διαφορετικές περιοχές. Η χρονοσειρά καλύπτει τη περίοδο τριάντα ετών και οι παράμετροι της κατανομής υπολογίστηκαν με την παραπάνω γραμμική μέθοδο. Από το σχήμα 2.21 συμπεραίνεται ότι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Weibull είναι ασύμμετρη από την δεξιά πλευρά, κάτι που δείχνει ότι οι ισχυροί άνεμοι είναι πιο σπάνιοι από τους μέτριους και ασθενείς ανέμους.



Σχήμα 2.21. Η Weibull συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας του ανέμου για τρεις διαφορετικές περιοχές.

Τα χαρακτηριστικά του ανέμου αλλάζουν χρόνο με τον χρόνο με αποτέλεσμα να υπάρχουν σημαντικές μεταβολές στις παραμέτρους της κατανομής. Όλη η πληροφορία της συμπεριφοράς του ανέμου συγκεντρώνεται παρέχοντας τις δύο παραμέτρους της συνάρτησης Weibull σε συνάρτηση με την διεύθυνση του ανέμου. Η κατανομή της

διεύθυνσης του ανέμου έχει συνήθως δύο κέντρα και σχετίζεται αποκλειστικά με την μορφολογία του εδάφους της περιοχής. Αυτό σημαίνει ότι συνήθως ο άνεμος έρχεται από δύο καθορισμένες κατευθύνσεις. Με βάση την κατανομή της διεύθυνσης του ανέμου μπορεί να εκτιμηθεί ποιοι άνεμοι είναι εκείνοι που δίνουν μεγάλη παραγωγή εφόσον οι ισχυροί άνεμοι προέρχονται από συγκεκριμένες διευθύνσεις. Η στατιστική ανάλυση του ανέμου και πιο συγκεκριμένα ο καθορισμός των παραμέτρων της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας Weibull της ταχύτητας του ανέμου είναι ο καταλληλότερος τρόπος για την μελέτη του αιολικού δυναμικού της περιοχής που πρόκειται να εγκατασταθεί ένα αιολικό πάρκο. Η ταχύτητα του ανέμου πάνω από αρκετά μεγάλο ύψος από την επιφάνεια της γης (πάνω από 3 km) είναι σταθερή για αρκετό χρονικό διάστημα ενώ κοντά στην επιφάνεια της γης η ταχύτητα μεταβάλλεται πολύ γρήγορα ανάλογα τα εμπόδια που συναντάει και την υφή του εδάφους. Επίσης η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται με το ύψος από την επιφάνεια της γης.

2.3.5. Δυναμικό μοντέλο ενός μεταβλητού βήματος ανεμογεννήτριας

Το πλήρες μοντέλο αεροδυναμικής της ανεμογεννήτριας οδηγεί σε ένα σύνολο από μη γραμμικές εξισώσεις μεγάλου βαθμού. Ωστόσο το πεδίο εφαρμογής αυτής της ανάλυσης δεν περιλαμβάνει την δυναμική των πτερυγίων και κατά συνέπεια επιτρέπει σημαντικές απλουστεύσεις της δυναμικής των ανεμογεννητριών. Η θεωρία του Akhmatov αναφέρει ότι η λειτουργία της ανεμογεννήτριας μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μετασχηματισμός Laplace της 1^{ης} διαφορικής εξίσωσης. Η συνολική ροπή του ρότορα είναι το άθροισμα των ροπών κάθε πτερυγίου. Ωστόσο η ταχύτητα του ανέμου σε όλα τα σημεία του ρότορα δεν είναι ίση και κατά συνέπεια η ροπή που εφαρμόζεται σε κάθε πτερύγιο δεν είναι ενιαία. Ως εκ τούτου η συνολική διακύμανση της ροπής είναι λιγότερη από την διακύμανση της ροπής για κάθε πτερύγιο, επειδή οι παράγοντες αναταραχής των πτερυγίων εν μέρει αλληλοεξουδετερώνονται. **Ως εκ τούτου σε μεγάλες ανεμογεννήτριες, η μεγάλη περιοχή σάρωσης επιδρά σε έναν μέσο όρο ταχυτήτων ανέμου για αυτό τον λόγο δρα σαν ένα φίλτρο χαμηλών συχνοτήτων από τον τύπο [6]:**

$$G(s) = K_w \times \frac{1 + s \times T_{w1}}{1 + s \times T_{w2}}$$

Ένα μεσαίο μέγεθος ανεμογεννήτριας με επαγωγική γεννήτρια θα πρέπει να έχει κέρδος $K_w=1$ και οι χρονικές σταθερές $T_{w1}=3.3s$ και $T_{w2}=0.9s$, είναι εξαρτώμενες από τον σχεδιασμό της ανεμογεννήτριας. Η προσέγγιση βασίζεται σε εμπειρικά δεδομένα και βασίζεται στο γεγονός ότι η μεγαλύτερη τουρμπίνα θα φιλτράρει πιο αποτελεσματικά τις αναταράξεις του ανέμου. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα η ανεμογεννήτρια σπάνια επιτυγχάνει μετατροπή περισσότερο από το 50% της διαθέσιμης ισχύς του ανέμου. Ο αεροδυναμικός συντελεστής μιας ανεμογεννήτριας μεταβλητών ταχυτήτων ποικίλει ανάλογα με την γωνία βήματος των πτερυγίων Pitch angle (α , ή γ), και της εφαιπτόμενης ταχύτητας στο άκρο των πτερυγίων tip speed ratio(λ), που είναι ο λόγος της εφαιπτόμενης ταχύτητας στο άκρο του πτερυγίου και τα στοιχεία της ταχύτητας του

ανέμου που είναι προσχεδιασμένα για τον ρότορα. Το C_p είναι συνήθως γύρω στο 0.35 για μια καλά σχεδιασμένη γεννήτρια.

Η μετατροπή της αεροδυναμικής ισχύος του προσπίπτοντος ανέμου σε μηχανική ισχύ από τον δρομέα της ανεμογεννήτριας, πραγματοποιείται μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$P_m = C_p(\lambda, \alpha) \times P_w = \frac{1}{2} \times C_p(\lambda, \alpha) \times \rho \times A \times u_{wind}^3$$

Και

$$\lambda = \frac{R \times \omega_R}{V_w}$$

Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει ότι ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p είναι ο λόγος της μηχανικής ισχύος προς την διαθέσιμη ισχύ του ανέμου.

$$C_p = \frac{P_m}{P_w}$$

Ο συντελεστής αεροδυναμικής απόδοσης εκφράζει το ποσοστό της ισχύος του ανέμου λίγο πριν τον ανεμοκινητήρα (P_w) το οποίο μετατρέπεται σε μηχανική ισχύ στον άξονα του δρομέα (P_m).

Σε μια σωστά σχεδιασμένη ανεμογεννήτρια η μέγιστη τιμή του C_p συμβαίνει όταν τα πτερύγια της περιστρέφονται με την ονομαστική ταχύτητα. Η γραφική παράσταση $C_p=f(\lambda)$ (Σχ. 2.22) αποτελεί ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των Α/Γ εμπεριέχοντας και λαμβάνοντας υπόψη τα V_w και ω .

Συμπεραίνεται ότι ο αεροδυναμικός συντελεστής παρουσιάζει μία μη γραμμική σχέση με την γωνία βήματος των πτερυγίων, το Pitch angle (α) καθώς και με την εφαπτόμενη ταχύτητα στο άκρο των πτερυγίων, tip speed ratio(λ). Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι που ακολουθούν το μοντέλο αυτής της σχέσης όπως η γραμμική χρήση των σειρών Taylor. Μια άλλη προσέγγιση είναι να αναπτύξουν μια αριθμητική σχέση του $C_p(\lambda, \alpha)$ από καμπύλες προερχόμενες από μετρήσεις που έγιναν σε πραγματικές τουρμπίνες. Αυτή είναι και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε εδώ, χρησιμοποιώντας δηλαδή το αριθμητικό παράδειγμα που παρουσιάζεται.

Σύμφωνα με αυτό το $C_p(\lambda, \alpha)$ μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τις δύο ακόλουθες σχέσεις:

$$C_p(\lambda, \alpha) = C_1 \times (C_2 - C_3 \times \alpha - C_4 \times \alpha^x - C_5) \times e^{-C_6(\lambda,0)}$$

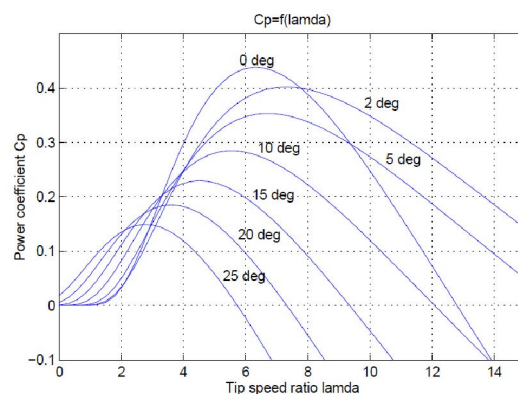
Και

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda - 0.02 \times \alpha} + \frac{0.003}{\alpha^3 + 1}$$

Με

- $C_1=0.73$
- $C_2=116/\lambda_i$
- $C_3=0.4$
- $C_4=0.0$
- $C_5=5/\lambda_i$
- $C_6=12.5/\lambda$

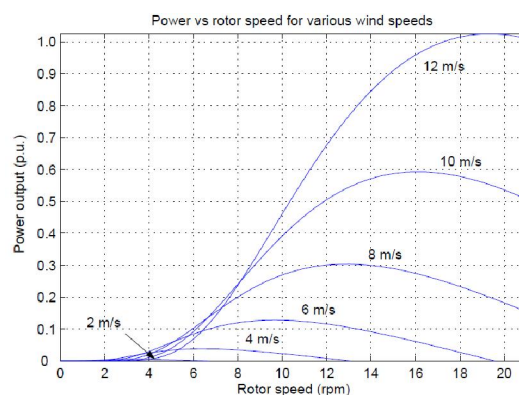
Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται οι καμπύλες του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος του δρομέα για διάφορες τιμές της γωνίας βήματος της έλικας των πτερυγίων.



Σχήμα 2.22 Ο αεροδυναμικός συντελεστής συναρτήσεως της ταχύτητας ακροπτερυγίου.

Είναι φανερό ότι ο αεροδυναμικός συντελεστής μειώνεται με την αύξηση της τιμής της γωνίας βήματος της έλικας, ωστόσο αξίζει να σημειωθεί ότι η βέλτιστη εφαιπόμενη ταχύτητα των πτερυγίων, λ είναι διαφορετική για κάθε τιμή της γωνίας βήματος έλικας α .

Στο επόμενο γράφημα απεικονίζεται η ισχύς εξόδου μιας ανεμογεννήτριας 2MW με διάμετρο 75m συναρτήσεως της ταχύτητας του ρότορα.



Σχήμα 2.23. Διάγραμμα ισχύος-ταχύτητας του ρότορα.

Η εξίσωση της κίνησης της ανεμογεννήτριας δίδεται από τον παρακάτω τύπο:

$$2 \times H \times \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e$$

Όπου H είναι η αδράνεια, $\frac{d\omega_m}{dt}$ είναι η γωνιακή επιτάχυνση και T_m, T_e είναι η μηχανική και ηλεκτρική ροπή αντίστοιχα.

2.3.6. Παραγωγή ενέργειας

Οι ανεμογεννήτριες δεν μπορούν να παράγουν όση ενέργεια θα θέλαμε, κι όση δηλώνει η ονομαστική ισχύ τους, διότι πολλές ώρες ετησίως λειτουργούν μακριά από αυτήν. Η παραγόμενη ενέργεια μιας αιολικής μηχανής εξαρτάται τόσο από την καμπύλη ισχύος της μηχανής, όσο και από το ρόδο των ανέμων στην περιοχή.

Για κάθε ταχύτητα ανέμου εντός των ορίων λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, η παραγόμενη ενέργεια προκύπτει από το γινόμενο του αριθμού των ωρών εμφάνισης της συγκεκριμένης ταχύτητας ετησίως με την ισχύ που αντιστοιχεί. Με αυτόν τον τρόπο κατασκευάζεται η καμπύλη της κατανομής παραγόμενης ενέργειας. Η συνολική ετήσια ενέργεια προκύπτει από το άθροισμα της παραγόμενης ενέργειας για όλες τις ταχύτητες ανέμου που λειτουργεί η ανεμογεννήτρια [13].

Πρόσθετοι παράγοντες που επηρεάζουν την παραγόμενη ενέργεια είναι η διαθεσιμότητα της μηχανής, οι απώλειες μεταφοράς και ο βαθμός απόδοσης του αιολικού πάρκου. Η

διαθεσιμότητα εκφράζει το ποσοστό του χρόνου που είναι διαθέσιμη η ανεμογεννήτρια για να λειτουργήσει και εκφράζεται με τον συντελεστή διαθεσιμότητας. Να σημειωθεί ότι ο συντελεστής διαθεσιμότητας δεν σχετίζεται με το αιολικό δυναμικό, αλλά το ποσοστό του χρόνου που προορίζεται για συντήρηση. Στο σύνολο του έτους υπάρχουν προγραμματισμένες εργασίες συντήρησης που πρέπει να γίνουν, αλλά υπάρχει και η περίπτωση, να σημειωθεί κάποια βλάβη, οπότε αναγκαστικά μένει εκτός λειτουργίας η μηχανή μέχρι να επισκευαστεί. Τυπικές τιμές του συντελεστή διαθεσιμότητας είναι 0,9-0,98. Σε περιοχές με καλή παροχή υπηρεσιών και εύκολη πρόσβαση στο πάρκο, η συντήρηση, επιδιόρθωση πιθανών βλαβών και παραλαβή των αναγκαίων ανταλλακτικών μπορεί να είναι άμεση, οπότε ο συντελεστής διαθεσιμότητας είναι ιδιαίτερα υψηλός. Το αντίθετο συμβαίνει σε απομονωμένες περιοχές. Ο βαθμός απόδοσης του αιολικού πάρκου, εκφράζει τις απώλειες που υπάρχουν λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ των ανεμογεννητριών που βρίσκονται σε αιολικά πάρκα, και οφείλεται κατά κύριο λόγο στο έλλειμμα της ταχύτητας που παρουσιάζεται στον ομόρροου της ανεμογεννήτριας.

Ο Συντελεστής Εκμεταλλευσιμότητας τις ανεμογεννήτριες ορίζεται ως :

$$CF = \frac{E}{E_R} = \frac{\bar{P}}{P_R}$$

Όπου $E_R = 8760P_R$

ουσιαστικά δηλώνει την ποιότητα της σχεδίασης και κατασκευής της μηχανής, σε σχέση με το αιολικό δυναμικό της περιοχής. Ο συντελεστής εκμεταλλευσιμότητας δείχνει πόση

ενέργεια παράγεται πραγματικά ως ποσοστό της ενέργειας που θα παραγόταν αν η αιολική μηχανή ή το πάρκο λειτουργούσαν όλο το χρόνο με την ονομαστική τους ισχύ. Ένας ικανοποιητικός συντελεστής εκμεταλλευσιμότητας είναι από 0,25 έως 0,35.

2.3.6.1. Βαθμός απόδοσης.

Ο συνολικός βαθμός απόδοσης του μετατροπέα αιολικής ενέργειας θα ισούται με [13]:

$$n = \frac{\text{ηλεκτρική ισχύς εξόδου}}{\text{ισχύ του ανέμου}}$$

$$n = \frac{P_{out}}{P_w} = \frac{P_m}{P_w} \times \frac{P_{mg}}{P_m} \times \frac{P}{P_{mg}} = C_p \times n_{gb} \times n_g$$

Όπου:

n_{gb} : Βαθμός απόδοσης του κιβωτίου ταχυτήτων.

n_g : Βαθμός απόδοσης της ηλεκτρικής γεννήτριας.

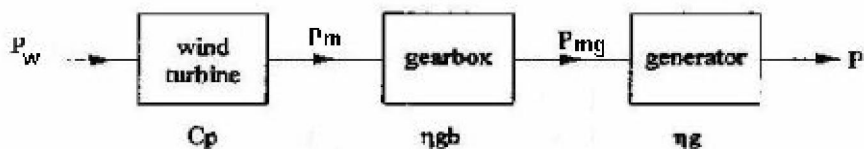
P_m : η μηχανική ισχύς που απομαστεύει ο ανεμοκινητήρας.

P_w : η ισχύς του ανέμου.

P_{mg} : η ισχύς εξόδου του κιβωτίου ταχυτήτων.

P_{out} : η ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο της γεννήτριας.

Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος απεικονίζεται και στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.24 Βαθμός απόδοσης του μετατροπέα με κιβώτιο ταχυτήτων.

2.4. Τύποι ανεμογεννητριών

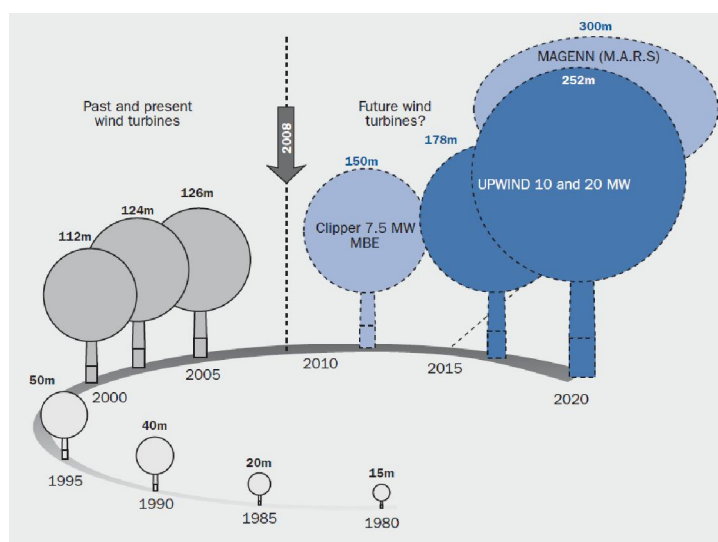
Η ποικιλία των μηχανών που επινοήθηκαν και προτάθηκαν για να δεσμεύσουν την αιολική ενέργεια είναι σημαντική και περιλαμβάνει πρωτότυπες επινοήσεις. Διάφορα είδη μηχανών οριζοντίου και κατακόρυφου άξονα έχουν προταθεί κατά καιρούς. Η σύγχρονη 'ανεμόμυλοι' ονομάζονται ανεμογεννήτριες και διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες τις

μηχανές οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα. Η πλειοψηφία των σύγχρονων μηχανών μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική. Τα μεγέθη τους ποικίλλουν από μηχανές που παράγουν μερικές δεκάδες η εκατοντάδες watt και φτάνουν τα μερικά MW.

Χαρακτηριστική είναι η διαφορά που υπάρχει στην αρχή λειτουργίας των παραδοσιακών ανεμόμυλων, με τις σύγχρονες ανεμογεννήτριες. Η παραδοσιακοί ανεμόμυλοι κινούνται είτε με τη βοήθεια της αντίστασης των πτερυγίων τους στον άνεμο, είτε με εκμετάλλευση της άνωσης που ασκείται πάνω τους. Στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες η κίνηση οφείλεται στην άνωση, η οποία αξίζει να σημειωθεί ότι μπορεί να γίνει υπερ-δεκαπλάσια της αντίστασης. Στις μέρες μας ο πιο γνωστός τύπος ανέμου κινητήρα που έχει εφαρμοσθεί ευρύτατα στην πράξη είναι δρομέα οριζόντιου άξονα.

2.4.1. Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα.

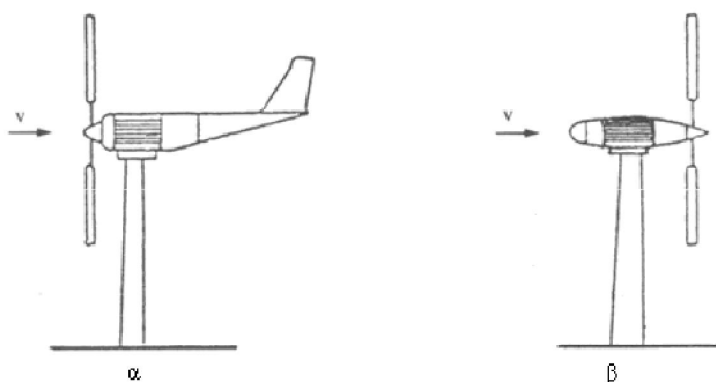
Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα αποτελούνται στην συντριπτική τους πλειοψηφία από τρία η δύο πτερύγια που θυμίζουν έντονα έλικα αεροπλάνου. Ανεμογεννήτριες με μεγαλύτερο αριθμό πτερυγίων εμφανίζονται ως πολύ στιβαρές κατασκευές, και βρίσκουν εφαρμογές σε ειδικές συνθήκες για άντληση νερού σε αγροκτήματα. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες έχουν μοντέρνα αεροδυναμική σχεδίαση, που οφείλεται στην πρόοδο που έχει επιτευχθεί τις τελευταίες δεκαετίες στον σχεδιασμό των αεροπορικών πτερυγίων και ελίκων. Οι μηχανές που έχουν τη μεγαλύτερη εμπορική επιτυχία είναι καλύτερες οι τρίπτερες ή οι δίπτερες μεγέθους περίπου μέχρι 1MW, και κατασκευάζονται στη Δανία, τις ΗΠΑ, την Αγγλία, την Ολλανδία, τη Γερμανία, την Ιταλία, την Ισπανία, το Βέλγιο, την Ιαπωνία, την Αυστρία και την Κίνα. Τυπικό μέγεθος μιας ανεμογεννήτριας σήμερα είναι: διάμετρος πτερυγίων 130 m και η ισχύ τους συνήθως 2 MW(ως και 3 MW), η εξέλιξη μέσα στα χρόνια φαίνεται στο σχήμα 2.7 . Μονόπτερες μηχανές παράγονται κυρίως στην Γερμανία και την Ιταλία. Παρά την ασυνήθιστη εμφάνιση τους, οι ένθερμοι υποστηρικτές τους πιστεύουν ότι η εξέλιξή τους μπορεί να δώσει φθηνότερες, ελαφρύτερες και με μικρότερες καταπόνησης μηχανές.



Σχήμα 2.25. Η εξέλιξη του μεγέθους και της ισχύος των ανεμογεννητριών.

Όπως αναφέρθηκε και πριν η πλειονότητα των Α/Γ που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροπαραγωγή έχουν τρία πτερύγια. Είναι πιο σταθερές καθώς το αεροδυναμικό φορτίο είναι σχετικά ομοιόμορφο. Μηχανές με μεγαλύτερο αριθμό πτερυγίων (6,8,12 ή και περισσότερα) είναι επίσης διαθέσιμες. Ο λόγος της πραγματικής επιφάνειας των πτερυγίων προς την επιφάνεια σάρωσης του ρότορα ονομάζεται στιβαρότητα. Οι ρότορες μεγάλης στιβαρότητας μπορούν να εκκινήσουν εύκολα, καθώς μεγαλύτερη επιφάνεια αλληλεπιδρά με τον άνεμο. Έχει αποδειχθεί όμως ότι οι τρίπτεροι ρότορες έχουν μεγαλύτερο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος από τους πολύπτερους, έτσι οι τελευταίοι χρησιμοποιούνται σε κάποιες εφαρμογές όπως η άντληση υδάτων, όπου η απαιτούμενη ροπή εκκίνησης είναι μεγάλη. Ο τρίπτερος δρομέας είναι κατά 5% πιο αποδοτικός από το δίπτερο και τα φορτία που ενεργούν σε κάθε πτερύγιο είναι μικρότερα. Παρόλα αυτά είναι ακριβότερος αφού υπάρχει άλλο ένα πτερύγιο. Ο μονόπτερος είναι φθηνός αφού έχει ένα μόνο πτερύγιο, παρουσιάζει 10% μικρότερη ενεργειακή απόδοση από το δίπτερο, περισσότερο θόρυβο και η ζυγοστάθμιση του παρουσιάζει προβλήματα.

Όσον αφορά την κατεύθυνση του προσπίπτοντος ανέμου, οι Α/Γ οριζόντιου άξονα ταξινομούνται σε ανάντη και κατάντη



Σχήμα 2.26 (α) Δρομέας ανάντη του πύργου (β) Δρομέας κατάντη του πύργου.

Στο πρώτο είδος, ο ρότορας δέχεται τον άνεμο άμεσα. Καθώς ο άνεμος περνάει πρώτα από τον ρότορα, δεν έχουν το πρόβλημα του φαινομένου της σκίασης του πυλώνα. Ο μηχανισμός του προσανατολισμού τους όμως είναι θεμελιώδης ώστε να διατηρεί τον ρότορα στην κατεύθυνση του ανέμου. Από την άλλη μεριά οι κατάντη μηχανές δεν χρειάζονται σερβομηχανισμό προσανατολισμού, αλλά επειδή ο ρότορας τους είναι τοποθετημένος στην υπήνεμη πλευρά του πύργου, μπορεί να φορτισθούν στα πτερύγια ασύμμετρα, καθώς ο άνεμος περνάει από την 'σκιά' του πύργου.

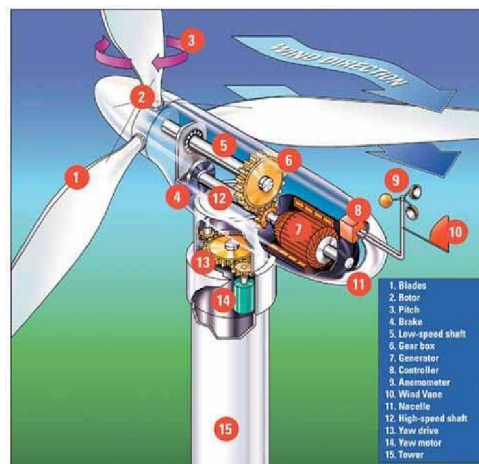
Χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα :

Τα κύρια μέρη των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα είναι ο δρομέας, το σύστημα αυξήσεις στροφών, το σύστημα πέδησης, τα έδρανα του άξονα και οι ελαστικοί σύνδεσμοι, η ηλεκτρική γεννήτρια, το σύστημα προσανατολισμού, ο πύργος στήριξης και τα θεμέλια, σχήμα 2.27 αναλυτικά :

- Ο δρομέας είναι ίσως το πιο βασικό ζήτημα στη σχεδίαση του όλου συστήματος. Αποτελείται από την πλήμνη και τα πτερύγια. Το πτερύγιο έχει αεροδυναμικό σχήμα και μπορεί να είναι ενιαίο ή να διαθέτει ακροπτερύγιο. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων (αριθμός πτερυγίων, κατανομή πλάτους, επιλογή αεροτομής, συστροφή) προκύπτουν από την βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής σχεδίασης.
- Η ηλεκτρική γεννήτρια μπορεί να είναι ασύγχρονη ή σύγχρονη γεννήτρια. Γενικά προτιμούνται οι ασύγχρονες γεννήτριες λόγω της απλότητάς της κατασκευής τους, αν και οι σύγχρονες έχουν καλύτερη συμπεριφορά σε αδύνατα δίκτυα.
- Ανεμομετρητής (Anemometer): Μετρά την ταχύτητα του ανέμου και μεταφέρει δεδομένα για την ταχύτητα του ανέμου στον ελεγκτή.
- Φρένο (Brake): Ένας δίσκος φρένου, ο οποίος μπορεί να εφαρμοστεί κατά τρόπο μηχανικό, ηλεκτρικό ή υδραυλικό, ώστε να σταματά ο ρότορας (ηλεκτρικός κινητήρας) σε περιπτώσεις επείγουσας ανάγκης.
- Κιβώτιο Ταχυτήτων (Gear box): Τα γρανάζια συνδέουν τον άξονα χαμηλής ταχύτητας με τον άξονα υψηλής ταχύτητας και αυξάνουν τις ταχύτητες περιστροφής από περίπου 30 έως 60 περιστροφές το λεπτό (rpm = περιστροφή ανά λεπτό) σε 1000 έως 1800 περιστροφές το λεπτό, που είναι η ταχύτητα περιστροφής που οι περισσότερες ανεμογεννήτριες απαιτούν ώστε να παραγάγουν ηλεκτρισμό. Το κιβώτιο ταχυτήτων είναι ακριβό (και βαρύ) εξάρτημα της ανεμογεννήτριας και οι μηχανικοί ερευνούν προς την κατεύθυνση ανεμογεννητριών «άμεσης ώθησης» (“direct-drive”) οι οποίες λειτουργούν σε χαμηλότερες ταχύτητες περιστροφής και δεν χρειάζονται κιβώτιο ταχυτήτων.
- Άξονας υψηλής ταχύτητας (High-speed shaft): Θέτει τη γεννήτρια σε κίνηση.
- Άξονας χαμηλής ταχύτητας (Low-speed shaft): Ο ρότορας (rotor, ηλεκτρικός κινητήρας) στρέφει τον άξονα χαμηλής ταχύτητας σε περίπου 30 έως 60 περιστροφές το λεπτό.
- Ατρακτίδιο (Nacelle) : Το ατρακτίδιο βρίσκεται στην κορυφή του πύργου και περιέχει το κιβώτιο ταχυτήτων, τους άξονες χαμηλής και υψηλής ταχύτητας, τη γεννήτρια, τον ελεγκτή και το φρένο. Μερικά ατρακτίδια είναι τόσο μεγάλα, ώστε ακόμη και ένα ελικόπτερο μπορεί να προσγειωθεί πάνω τους.
- Στροφή Πτερυγίων (Pitch): Οι λεπίδες στρέφονται, ή στρίβουν γύρω από τον άξονά τους, ανεξάρτητα από τον άνεμο, ώστε να ελέγχουν την ταχύτητα του ρότορα (ηλεκτρικού κινητήρα) και να εμποδίζουν τον ρότορα από το να στρίβει σε ανέμους οι οποίοι είναι υπερβολικά ισχυροί ή υπερβολικά ασθενείς για να παραγάγουν ηλεκτρισμό.
- Ανεμοδείκτης (Wind vane): Μετρά την κατεύθυνση του ανέμου και επικοινωνεί με το yaw drive για να προσανατολίσει την ανεμογεννήτρια σωστά, όσον αφορά στον άνεμο.
- Οδηγός για την Αποφυγή Εκτροπής (Yaw drive): Οι ανεμογεννήτριες που λειτουργούν με ανάντι, είναι στραμμένες προς τον άνεμο. Το yaw drive χρησιμοποιείται για να εξασφαλίσει ότι ο ρότορας θα είναι στραμμένος προς τον άνεμο καθώς ο άνεμος αλλάζει

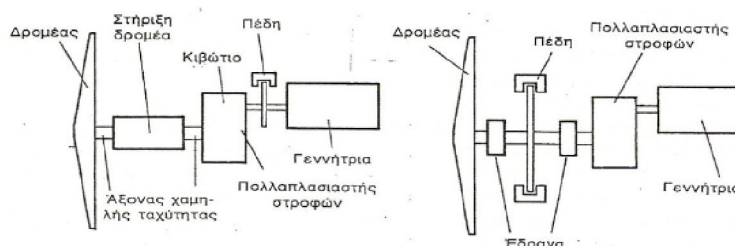
κατεύθυνση. Οι ανεμογεννήτριες που είναι σχεδιασμένες να λειτουργούν με κατάντι, δεν χρειάζονται yaw drive, διότι ο άνεμος φυσά και στρέφει τον ρότορα προς τα κάτω.

- Κινητήρας του Οδηγού για την Αποφυγή Εκτροπής (Yaw motor): Δίνει ενέργεια στο yaw drive.
- Το σύστημα προσανατολισμού είναι ένας σερβοκινητήρας ο οποίος ελέγχεται από τον ανεμοδείκτη του ανεμογράφου και αναγκάζει τον δρομέα να παρακολουθεί την κατεύθυνση του ανέμου και να παραμένει κάθετος σε αυτήν.
- Ο πύργος στις ανεμογεννήτριες στηρίζει τη νασέλλα και το δρομέα. Μπορεί να είναι τύπου δικτυώματος, σωληνωτός και σπανιότερα από σκυρόδεμα. Η θεμελίωση γίνεται με σπλισμένο σκυρόδεμα πάνω στο οποίο τοποθετείται με βίδες ο πύργος. Ο πύργος έχει σχήμα κώνου που εξυπηρετεί την αύξηση της αντοχής και στην εξοικονόμηση υλικών με τη διάμετρο να αυξάνεται όσο πλησιάζουμε τη βάση. Μεγάλης σημασίας είναι η γείωση που πρέπει να έχει τη μεταλλική κατασκευή της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 2.27Τα μηχανικά μέρη μίας ανεμογεννήτριας.

Στο σχήμα 2.28 παρουσιάζονται δύο τυπικές διατάξεις της ατράκτου οι οποίες διαφέρουν κυρίως στον τρόπο έδρασης του δρομέα και τη θέση του φρένου. Εκτός από αυτές υπάρχουν και αρκετές άλλες παραλλαγές, κυρίως χωρίς πολλαπλασιαστή στροφών.



Σχήμα 2.28 Δύο τυπικές διατάξεις ατράκτου.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω και άλλα στοιχεία διαπιστώνονται γενικά τα εξής για τους ανεμοκινητήρες οριζόντιου άξονα:

- Όσο λιγότερα πτερύγια έχουν τόσο λιγότερο στιβαροί είναι.
- Εμφανίζουν μεγάλο λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου λ, αφού με την αύξηση του μήκους του πτερυγίου για δεδομένη ταχύτητα άνεμου ο λόγος αυτός αυξάνει.
- Λόγω του παραπάνω παρουσιάζουν μεγάλο Cr το οποίο φθάνει το 50% σε κάποιες περιπτώσεις
- Η απόδοση τους μπορεί να αυξηθεί με αύξηση της διαμέτρου του δρομέα
- Ο τρίπτερος αν και αποδίδει λιγότερη ισχύ ως προς το δίπτερο φορτίζεται λιγότερο στα πτερύγια του. Και αυτός ο λόγος αιτιολογεί την ευρεία εφαρμογή τους.
- Όσο πιο πολλά τα πτερύγια τόσο λιγότερος αεροδυναμικός θόρυβος δημιουργείται.
- Απαιτούν σύστημα προσανατολισμού των πτερυγίων
- Κάνουν χρήση της άνωσης και επομένως εμφανίζουν καλή λειτουργική συμπεριφορά όσον αφορά την καμπύλη ισχύος
- Απαιτούν μεγάλη επιφάνεια εγκατάστασης

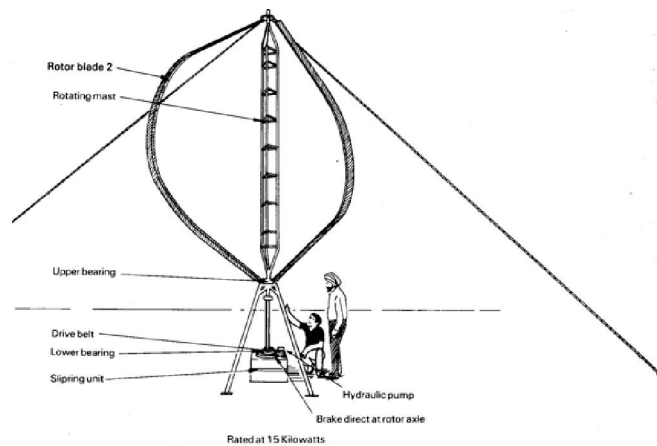
Οι ανεμογεννήτριες αυτού του είδους απαιτούν τα πτερύγια να είναι κατασκευασμένα από υλικά που δεν έχουν μεγάλο βάρος, να κάνουν κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο εκμετάλλευση του αέρα και να έχουν προστασία τα ίδια έναντι ατμοσφαιρικών εκκενώσεων.

2.4.2. Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα .

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα δεν έχουν γνωρίσει την εμπορική ανάπτυξη που έχουν οι οριζόντιου άξονα. Παρ' όλα αυτά, έχουν κάποια βασικά πλεονεκτήματα :

- Η κατακόρυφη συμμετρία συνεπάγεται απουσία ανάγκης προσανατολισμού του δρομέα προς τον άνεμο
- Το μηχανικό έργο μεταφέρεται μέσω του κατακόρυφου άξονα στο έδαφος όπου είναι τοποθετημένο το σύστημα μετατροπής σε άλλη μορφή ενέργειας
- Απλή κατασκευή του πλαισίου στήριξης και γενικότερα απλούστερη κατασκευή .

Οι μηχανές κατακόρυφου άξονα στηρίζονται στις ιδέες του Georges Darrieus και τις επινοήσεις του γύρω στα 1925.



Σχήμα 2.29 Ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα τύπου Darrieus.

2.5. Η καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας.

Η παραγωγή αιολικής ισχύος είναι σε μεγάλο βαθμό μεταβλητή, αφού, όπως προαναφέρθηκε, συνδέεται άμεσα με την ταχύτητα του ανέμου: οι ανεμογεννήτριες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια σε ηλεκτρική. Η διαδικασία αυτής της ενεργειακής μετατροπής σε μια ανεμογεννήτρια περιγράφεται από τη χαρακτηριστική καμπύλη, που ονομάζεται και *καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας*. Οι χαρακτηριστικές αυτές καμπύλες έχουν σχεδόν την ίδια μορφή οποιoσδήποτε κι αν είναι ο κατασκευαστή ή το είδος της ανεμογεννήτριας. Η παραγωγή ισχύος είναι μηδέν κάτω από το όριο έναρξης λειτουργίας της ανεμογεννήτριας (2-4 m/s) (cut-in) και αυξάνεται απότομα μέχρι να φτάσει τις ταχύτητες των 12-16 m/s. Σε αυτές τις ταχύτητες φτάνει σε ένα επίπεδο παραγωγής που είναι πολύ κοντά στο ονομαστικό της. Η παραγωγή ισχύος είναι σχεδόν σταθερή ανάμεσα στις ταχύτητες αυτές και 25-30m/s, που είναι και η ταχύτητα διακοπής λειτουργίας της ανεμογεννήτριας για λόγους ασφαλείας (cut-off). Μπορεί να υπάρχει μια διαφορά ανάμεσα στη μέγιστη παραγόμενη ισχύ και την ονομαστική της τάξης του 10-20%. Η ονομαστική ισχύς P_n χρησιμεύει σαν ενδεικτική τιμή για να υποδηλώνει την ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας με απώτερο στόχο τον υπολογισμό της αναμενόμενης παραγόμενης ισχύος με βάση, πάντα, τα χαρακτηριστικά του αιολικού πάρκου.

2.5.1. Ταχύτητα έναρξης λειτουργίας ανεμοκινητήρα (cut in speed).

Ο ανεμοκινητήρας δύναται να αποδώσει ωφέλιμη ισχύ μόνο όταν η ισχύς του ανέμου είναι μεγαλύτερη από τις εσωτερικές απώλειες. Τέτοιες είναι οι τριβές, οι απώλειες στο δρομέα, στο κιβώτιο ταχυτήτων κ.τ.λ. Η ταχύτητα του ανέμου κατά την οποία ο ανεμοκινητήρας ξεκινάει να περιστρέφεται λέγεται **ταχύτητα έναρξης λειτουργίας (cut in speed)**.

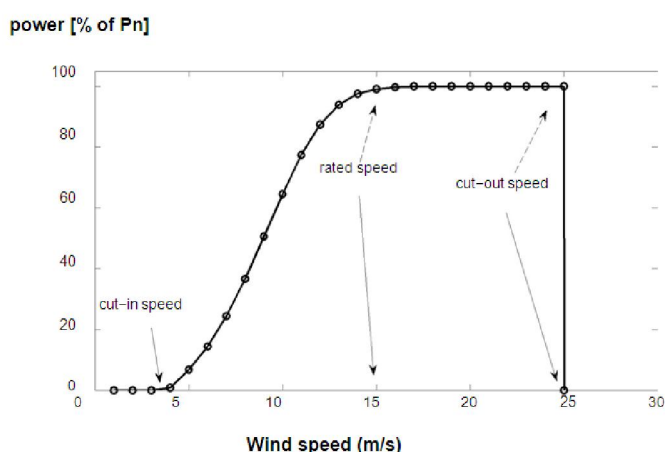
2.5.2. Ονομαστική ταχύτητα (Rated speed).

Όπως έγινε γνωστό καθώς η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται, αυξάνει και η αποδιδόμενη ισχύς μέχρι να φτάσει την ονομαστική ισχύ της γεννήτριας. Μόλις αυτό συμβεί επιδιώκεται η ισχύς που απομαστεύεται από τον άνεμο και η ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο να διατηρούνται σταθερές. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με αλλαγή της γωνίας κλίσεως των

πτερυγίων, είτε με μεταπτερύγια (flaps), είτε με αλλαγή της γωνιακής θέσης του δρομέα ως προς τον άνεμο είτε με αλλαγή της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα ανάλογα με το σύστημα που διαθέτει η γεννήτρια. Η μικρότερη ταχύτητα ανέμου στην οποία ο δρομέας αναπτύσσει την ονομαστική ισχύ της μηχανής-γεννήτριας λέγεται **ονομαστική ταχύτητα (rated speed)** και συμβολίζεται με V_{wr} . Για ταχύτητες μεγαλύτερες της V_{wr} δεν έχουμε μέγιστη απομάστευση της ισχύος από τον άνεμο. **Ένας εμπειρικός κανόνας αναφέρει ότι λαμβάνουμε μέγιστη ετήσια παραγωγή ενέργειας, όταν η V_{wr} είναι 1.5 - 2 φορές μεγαλύτερη από τη μέση ταχύτητα του ανέμου στη συγκεκριμένη τοποθεσία.**

2.5.3. Ταχύτητα απόξεσης ή διακοπής λειτουργίας (cut-off speed).

Όταν ο άνεμος εμφανίζει υψηλές ταχύτητες (πάνω από 25-30 m/sec) διακόπτεται η λειτουργία της ανεμογεννήτριας για λόγους προστασίας της.



Σχήμα 2.30 Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας μεταβλητού βήματος πτερυγίων.

Η απότομη αύξηση της χαρακτηριστικής καμπύλης στις χαμηλές ταχύτητες εξηγείται όπως προαναφέραμε στο ότι η ισχύς είναι ανάλογη της 3^{ης} δύναμης της ταχύτητας του ανέμου:

$$P_m = C_p(\lambda, \alpha) \times P_W = \frac{1}{2} \times C_p(\lambda, \alpha) \times \rho \times A \times u_{Wind}^3$$

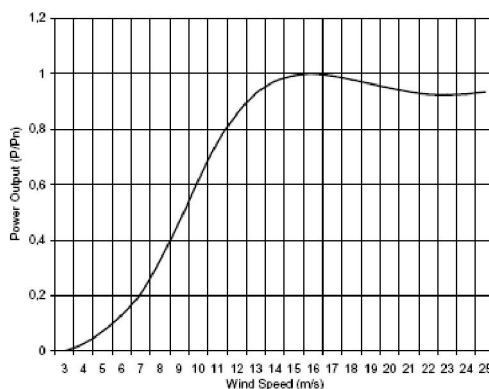
Επειδή οι χαμηλές ταχύτητες ανέμου είναι πιο συχνές από τις υψηλές, μπορούμε να καταλάβουμε γιατί οι ανεμογεννήτριες λειτουργούν στα χαμηλά σημεία της καμπύλης ισχύος. Τα σημεία αυτά αποτελούν μια ζώνη, όπου μικρές μεταβλητότητες της ταχύτητας του ανέμου προκαλούν μεγάλες μεταβλητότητες στην παραγόμενη ισχύ. Η μεταβλητότητα της ταχύτητας του ανέμου οδηγεί σε μια δυναμική συμπεριφορά της παραγωγής αιολικής ισχύος.

2.6.Αεροδυναμικός έλεγχος ισχύος ανεμογεννήτριας.

Σε υψηλές ταχύτητες του ανέμου είναι απαραίτητος ο περιορισμός της παραγόμενης μηχανικής ισχύος της Α/Γ, για να μην έχουμε υπέρβαση των ονομαστικών μεγεθών της γεννήτριας. Επίσης έλεγχος εφαρμόζεται και για την αποφυγή υπερτάχυνσης του ρότορα και την αποσύνδεση της Α/Γ στις πολύ υψηλές ταχύτητες.

Οι κύριοι τρόποι ελέγχου είναι:

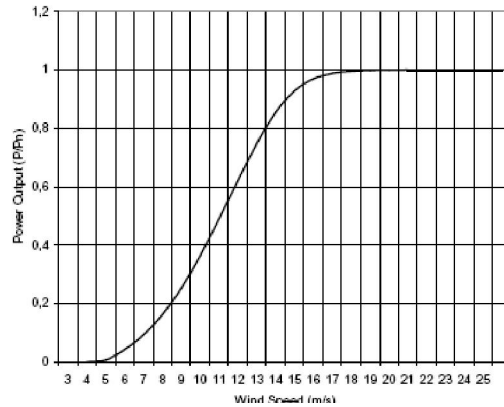
- ❖ **Έλεγχος παθητικής απώλειας στήριξης (Passive stall control).** Είναι η απλούστερη μορφή ελέγχου της ισχύος. Η γωνία κλίσης των πτερυγίων είναι σταθερή. Σε κανονική λειτουργία επιτυγχάνεται ομαλή ροή του αέρα στα πτερύγια του ρότορα, συνεπώς ένας υψηλός λόγος άντωσης προς οπισθέλκουσα διατηρείται, που έχει σαν αποτέλεσμα έναν υψηλό βαθμό αεροδυναμικής απόδοσης. Από την άλλη μεριά όταν η ταχύτητα του ανέμου προσεγγίζει την τιμή στην οποία η γεννήτρια φθάνει την ονομαστική της ισχύ, περαιτέρω αύξηση της ροπής πρέπει να αποφευχθεί. Μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου όμως προκαλούν αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης, και η ροή του αέρα στο χείλος διαφυγής γίνεται τυρβώδης, που έχει σαν συνέπεια την μείωση της άντωσης και την αύξηση της οπισθέλκουσας. Ο λόγος τους μικραίνει και μαζί του και η αεροδυναμική απόδοση. Η σταθερή γωνία κλίσης των πτερυγίων επιλέγεται έτσι ώστε η τουρμπίνα να φθάσει την ονομαστική ισχύ στην επιθυμητή ταχύτητα ανέμου.



Σχήμα 2.31 Καμπύλη ισχύος Α/Γ με έλεγχο παθητικής απώλειας στήριξης.

Κύριο πλεονέκτημα, η σταθερή σύνδεση των πτερυγίων στην πλήμνη. Κύριο μειονέκτημα, η μεγιστοποίηση ισχύος σε συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου που εξαρτάται από την γεωμετρία των πτερυγίων.

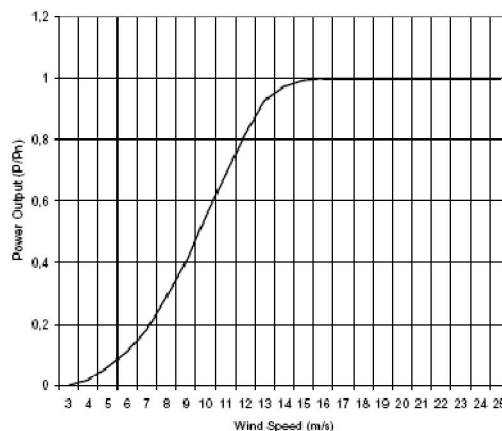
- ❖ **Έλεγχος βήματος πτερυγίου (pitch control).** Επιτυγχάνει περιορισμό της ισχύος πάνω από την ονομαστική ταχύτητα, περιστρέφοντας όλο ή μέρος κάθε πτερυγίου γύρω από τον άξονα του, στην κατεύθυνση η οποία μειώνει την γωνία πρόσπτωσης και άρα τον συντελεστή άντωσης, μία διαδικασία γνωστή σαν βήμα πτέρωσης (pitch feathering).



Σχήμα 2.32 Καμπύλη ισχύος Α/Γ με έλεγχο θήματος πτερυγίου.

Τα κύρια οφέλη είναι αυξημένη δέσμευση ισχύος αεροδυναμική πέδηση και μειωμένα φορτία στην τουρμπίνα κατά το σταμάτημα. Το εύρος της γωνίας για έλεγχο της ισχύος είναι περίπου από 0° (fine tuning), όπου η χορδή ακροπτερυγίου είναι στο επίπεδο περιστροφής έως 35° . Όμως για αεροδυναμική πέδηση τα πτερύγια πρέπει να στραφούν σας 90° (full feather) όπου η χορδή του ακροπτερυγίου είναι παράλληλη με τον άξονα του ρότορα και το χείλος προσβολής προς τον άνεμο.

- ❖ **Έλεγχος ενεργής απώλειας στήριξης (active stall control).** Αυτός ο έλεγχος επιτυγχάνει περιορισμό ισχύος πάνω από την ονομαστική ταχύτητα ανέμου στρέφοντας αρχικά τα πτερύγια προς την απώλεια στήριξης, δηλαδή στην αντίθετη κατεύθυνση από ότι στον έλεγχο βήματος πτερυγίου και μερικές φορές λέγεται αρνητικός έλεγχος βήματος (negative pitch control). Εδώ το εύρος της γωνίας είναι μικρό (περίπου 0° - 4°). Εκτός της καλύτερης εκμετάλλευσης της Α/Γ, επιτυγχάνεται ευκολότερη εκκίνηση και αποσύνδεση. Αυτή η μέθοδος εφαρμοσθεί σε μεγαλύτερες τουρμπίνες σταθερής ταχύτητας.



Σχήμα 2.33 Καμπύλη ισχύος Α/Γ με έλεγχο ενεργητικής απώλειας στήριξης.

- ❖ **Έλεγχος προσανατολισμού (yaw control).** Οι περισσότερες Α/Γ οριζόντιου άξονα χρησιμοποιούν ένα μηχανισμό οδήγησης του συστήματος προσανατολισμού για να κρατήσει την τουρμπίνα αντιμέτωπη με τον άνεμο. Η χρήση του ίδιου μηχανισμού για να προσανατολίσει την τουρμπίνα 'έξω' από τον άνεμο ώστε να περιοριστεί η παραγόμενη ισχύς είναι προφανώς ελκυστική. Υπάρχουν όμως δύο παράγοντες που αντιστρατεύονται την γρήγορη απόκριση ενός τέτοιου συστήματος. Πρώτον, η μεγάλη ροπή αδράνειας της ατράκτου και του ρότορα γύρω από τον άξονα του συστήματος προσανατολισμού και δεύτερον, ότι για μία μεταβολή της γωνίας προσανατολισμού έστω κατά 10° η μείωση της ισχύος είναι ένα μικρό ποσοστό, ενώ για την ίδια μεταβολή της γωνίας του βήματος πτερυγίου η ισχύς υποδυπλασιάζεται [10].

2.7. Περίληψη - Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν οι θεμελιώδεις αρχές της θεωρίας της αιολικής ενέργειας στις οποίες βασίζεται η κατασκευή και η λειτουργία των ανεμοκινητήρων, οι οποίοι μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανικό έργο. Ο συντελεστής αεροδυναμικής απόδοσης (C_p) είναι συνάρτηση της γεωμετρίας του, της γωνιακής του ταχύτητας και της ταχύτητας του ανέμου. Ο συντελεστής C_p μεγιστοποιείται για συγκεκριμένη τιμή της ταχύτητας του δρομέα για κάθε ταχύτητα του ανέμου. Σύμφωνα με το νόμο του Betz η απόδοση θεωρητικά μπορεί να ανέλθει σε 60% αλλά στην πραγματικότητα σήμερα δεν υπερβαίνει το 40%. Ακόμα, στο κεφάλαιο αυτό περιγράφηκε ο μετατροπέας αιολικής ενέργειας συνοπτικά αλλά και ουσιαστικά. Αρχικά αναφέρθηκαν τα διάφορα είδη ανεμοκινητήρων και εξηγήθηκαν οι λόγοι για τους οποίους επικράτησε ο τρίπτερος ανεμοκινητήρας. Ωστόσο έγινε κατανοητό ότι ένας από τους παράγοντες που πρέπει απαραίτητα να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό ή την επιλογή μιας ανεμογεννήτριας είναι το κατά πόσο μπορεί η ίδια να «αυτοπροστατευτεί» από υψηλές ταχύτητες ανέμου. Με βάση λοιπόν αυτό εξετάστηκαν στο κεφάλαιο αυτό οι κυριότερες τεχνικές ελέγχου και προστασίας της ανεμογεννήτριας.

Κεφάλαιο 3

3. Το Ηλεκτρικό Σύστημα Των Α/Γ

3.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο περιγράφηκε συνοπτικά ο μετατροπέας αιολικής ενέργειας, η συνολική δηλαδή μηχανή η οποία παράγει ηλεκτρική ενέργεια μετατρέποντας τη κινητική ενέργεια του ανέμου. Τα δύο βασικά μέρη είναι ο ανεμοκινητήρας (Α/Κ) και η ηλεκτρική γεννήτρια. Αρχικά σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί το μαθηματικό υπόβαθρο που διέπει την λειτουργία των σύγχρονων και ασύγχρονων μηχανών που χρησιμοποιούνται σήμερα. Επίσης, ένα πολύ βασικό τμήμα της μηχανής είναι η ηλεκτρική διάταξη που χρησιμοποιείται προκειμένου να συνδεθεί η γεννήτρια με το δίκτυο, γιατί η απευθείας σύνδεση δημιουργεί πολλά προβλήματα. Σήμερα, με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος όλοι οι μετατροπέες αιολικής ενέργειας που χρησιμοποιούνται για σύνδεση με το δίκτυο χρησιμοποιούν μετατροπείς με ηλεκτρονικά ισχύος και έτσι τα αρχικά προβλήματα των ανεμογεννητριών έχουν επιλυθεί στο μεγαλύτερο μέρος τους. Ωστόσο, η χρήση των ηλεκτρονικών ισχύος, εισάγει στο δίκτυο αρμονικές τάσεως και ρεύματος ή είναι πιθανή η απορρόφηση αέργου ισχύος από το δίκτυο. Εύκολα μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι εμφανίζονται νέα μειονεκτήματα όπως αύξηση του κόστους και μείωση της αξιοπιστίας. Για το λόγο αυτό περιγράφονται αναλυτικά όλες οι εναλλακτικές ηλεκτρικές διατάξεις σύνδεσης της γεννήτριας με το δίκτυο όπως χρησιμοποιούνται σήμερα από τις κατασκευάστριες εταιρείες με τα πλεονεκτήματά τους και τα μειονεκτήματα ώστε να υπάρχει μια ολοκληρωμένη εικόνα.

3.1. Γενικά για τις μηχανές επαγωγής.

3.1.1. Ηλεκτρική μηχανή ΕΡ

Ηλεκτρική μηχανή είναι η συσκευή που μετατρέπει μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και αντίστροφα: όταν η συσκευή μετατρέπει μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ονομάζεται **γεννήτρια** ενώ όταν μετατρέπει την ηλεκτρική σε μηχανική ονομάζεται **κινητήρας**. Οι ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος είναι γεννήτριες που μετατρέπουν μηχανική ενέργεια σε εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια και κινητήρες που μετατρέπουν εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Οι δυο βασικές κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται οι μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος είναι [11,12] :

- ✓ Σύγχρονες Μηχανές
- ✓ Ασύγχρονες (επαγωγικές) Μηχανές.

Το ρεύμα διέγερσης των σύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών (γεννητριών και κινητήρων) παράγεται από ανεξάρτητες πηγές συνεχούς ρεύματος, ενώ το ρεύμα διέγερσης των επαγωγικών μηχανών παράγεται επαγωγικά (αρχή λειτουργίας του μετασχηματιστή) στα τυλίγματα διέγερσης τους. Στις ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος το τύλιγμα του οπλισμού βρίσκεται σχεδόν πάντα τοποθετημένο στο στάτη ενώ το τύλιγμα διέγερσης τοποθετείται στο δρομέα. Το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του δρομέα μιας μηχανής εναλλασσόμενου ρεύματος επάγει τριφασικά εναλλασσόμενα ρεύματα στο τύλιγμα οπλισμού του στάτη. Κατ' αναλογία, αν το τύλιγμα οπλισμού του στάτη της μηχανής τροφοδοτηθεί με ένα τριφασικό σύστημα ρευμάτων, στο εσωτερικό της αναπτύσσεται ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο το οποίο επιδρώντας στο πεδίο του δρομέα της μηχανής παράγει ροπή στον άξονα της. Τα δυο αυτά φαινόμενα αποτελούν τις εκδοχές της αρχής λειτουργίας της γεννήτριας και της αρχής λειτουργίας του κινητήρα.

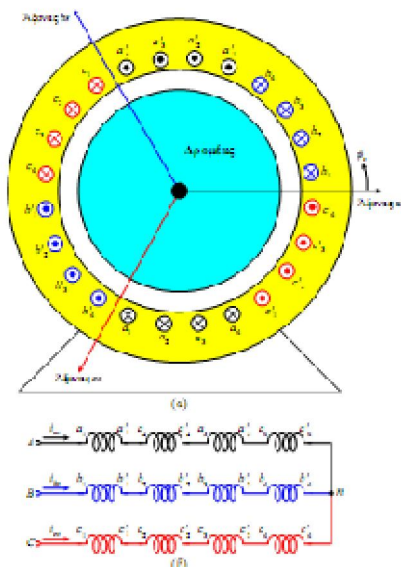
3.1.2. Ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες

Στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης οι ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες επαγωγής είναι οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενοι καλύπτοντας ένα ευρύτατο φάσμα εφαρμογών με απαιτήσεις ισχύος που ξεκινούν από μερικά κλάσματα του Watt και φτάνουν μέχρι χιλιάδες ή εκατομμύρια Watts. Αυτό συμβαίνει διότι παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα όπως μικρό βάρος και όγκο, υψηλή αξιοπιστία και απόδοση και μεγάλη διάρκεια ζωής χωρίς ιδιαίτερες ανάγκες συντήρησης. Όλα τα ανωτέρω χαρακτηριστικά σε συνδυασμό με τους μοντέρνους αντιστροφείς και τις προηγμένες τεχνικές ελέγχου τους καθιστούν την ιδανική επιλογή για τα περισσότερα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης. Το ενδιαφέρον για νέες εφαρμογές αυξάνεται συνεχώς και ήδη υπάρχει η τάση αντικατάστασης των κινητήρων συνεχούς ρεύματος σε βιομηχανικό επίπεδο από τους πιο οικονομικούς και αξιόπιστους κινητήρες επαγωγής. Συνεπώς το ερευνητικό ενδιαφέρον πάνω σε συστήματα ηλεκτρικής κίνησης με ασύγχρονους τριφασικούς κινητήρες επαγωγής είναι διαρκώς διογκούμενο καθώς τα αποτελέσματα έχουν μεγάλη πρακτική αξία.

Η αρχή λειτουργίας της μηχανής επαγωγής είναι η ακόλουθη : Το τύλιγμα του στάτη τροφοδοτείται με συμμετρικά τριφασικά εναλλασσόμενα ρεύματα. Το τύλιγμα του δρομέα αναπτύσσει ρεύματα εξ επαγωγής σε συχνότητα διαφορετική από τη συχνότητα του στάτη και συγκεκριμένα στη συχνότητα που αντιστοιχεί στη διαφορά ανάμεσα στη σύγχρονη ταχύτητα και την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα (συχνότητα ολισθήσεως). Έτσι το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που παράγουν τα ρεύματα εξ επαγωγής περιστρέφεται ως προς τον δρομέα με την ταχύτητα ολισθήσεως και έχει τελικά την ίδια ταχύτητα περιστροφής με το πεδίο του στάτη. Τα δυο πεδία παραμένουν λοιπόν ακίνητα το ένα ως προς το άλλο και έχουμε τις συνθήκες για ανάπτυξη σταθερής ροπής. Τα τελευταία χρόνια οι μηχανές επαγωγής χρησιμοποιούνται με αυξανόμενο ρυθμό σαν γεννήτριες κυρίως σε αιολικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Επειδή η μηχανή επαγωγής δεν έχει ανεξάρτητη διέγερση, για να λειτουργήσει σαν γεννήτρια πρέπει να συνδεθεί με ένα τριφασικό σύστημα εναλλασσόμενης τάσεως, από το οποίο απορροφά άεργο ισχύ.

3.1.2.1. Το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο

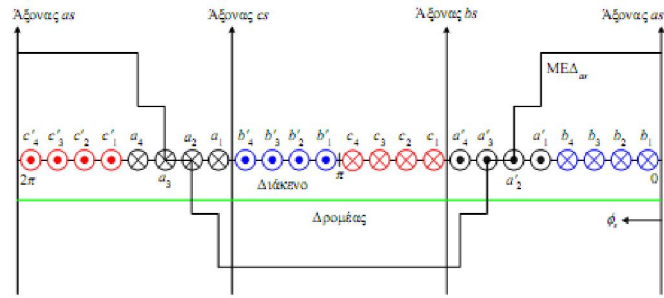
Όπως και στην ανάλυση των μηχανών συνεχούς ρεύματος, θεωρούμε αρχικά μια μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος, ο στάτης της οποίας φέρει ένα στοιχειώδες τριφασικό τύλιγμα. Το τύλιγμα του στάτη, όπως εικονίζεται στο Σχ. 3.1α, δημιουργεί ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο με δύο πόλους (διπολική μηχανή). Το τριφασικό τύλιγμα είναι σε σύνδεση αστέρα (Σχ. 3.1β).



Σχήμα 3.1 (α) Τύλιγμα στάτη, (β) Τριφασικό τύλιγμα σε αστέρα

Στην τριφασική μηχανή, η κάθε φάση του τυλίγματος είναι μετατοπισμένη κατά 120° , σε σχέση με τις άλλες δύο. Οι άξονες a_s , b_s , c_s , δηλώνουν τη θετική φορά των μαγνητικών πεδίων, που παράγουν τα τρία τυλίγματα μόνα τους. Τα τρία τυλίγματα έχουν την ίδια αντίσταση και τον ίδιο αριθμό σπειρών, οπότε το τριφασικό τύλιγμα του στάτη ονομάζεται συμμετρικό. Οι πλευρές των ομάδων (coil sides), κάθε τυλίγματος είναι τοποθετημένες σε αυλάκια (slots), τα οποία σχηματίζουν γωνία (span) 180° στη διπολική μηχανή. Η φορά του ρεύματος σε κάθε πλευρά των ομάδων, οι οποίες αποτελούνται από ορισμένο αριθμό σπειρών, εικονίζεται στο Σχ.3.1α. Τα άκρα των τεσσάρων ομάδων κάθε τυλίγματος συνδέονται σε σειρά, με τον τρόπο που εικονίζεται στο Σχ.3.1β. Τα άκρα $a'4$, $b'4$ και $c'4$ από τα τρία τυλίγματα συνδέονται μεταξύ τους, σε σύνδεση αστέρα.

Στη στοιχειώδη μηχανή του Σχ. 3.1α, οι πλευρές των ομάδων κάθε τυλίγματος, είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες στην επιφάνεια του στάτη, σε γωνία 60° . Στις πραγματικές μηχανές, οι πλευρές των ομάδων κατανέμονται σε μεγαλύτερη γωνία. Έτσι, στην ίδια αυλάκωση τοποθετούνται οι πλευρές από δύο ομάδες. Επιπλέον, οι ομάδες δεν έχουν τον ίδιο αριθμό σπειρών. Το τύλιγμα του Σχ. 3.1α ονομάζεται full-pitch, επειδή οι αντίθετες πλευρές των ομάδων σχηματίζουν γωνία 180° (διπολική μηχανή). Συχνά, οι αντίθετες πλευρές των ομάδων σχηματίζουν γωνία μικρότερη από 180° , οπότε το τύλιγμα ονομάζεται fractional-pitch [11,12].



Σχήμα. 3.2 Αναπτυσσόμενη ΜΕΔ από φάση as

Στο Σχ. 3.2 εικονίζεται το ανάπτυγμα της στοιχειώδους μηχανής. Ως αρχή των αξόνων θεωρείται ο άξονας as στα δεξιά του σχήματος. Ακόμη, στο Σχ. 3.2 εικονίζεται η μαγνητεγερτική δύναμη ΜΕΔ, που αναπτύσσεται από το τύλιγμα της φάσης as. Η ΜΕΔas μεταβάλλεται βηματικά στο κέντρο των αγωγών του τυλίγματος. Σημειώνουμε ότι, το μαγνητικό πεδίο διατρέχει ακτινικά το διάκενο. Η ακτινική διεύθυνση του πεδίου οφείλεται στο μικρό πλάτος του διακένου σχετικά με τη διάμετρο του δρομέα και τη μεγάλη μαγνητική του αντίσταση, σε σχέση μ' εκείνη του σιδήρου στο στάτη και το δρομέα. Η ΜΕΔ που αναπτύσσεται από το τύλιγμα bs (ΜΕΔ bs) έχει την ίδια μορφή με την ΜΕΔas, αλλά είναι μετατοπισμένη κατά 120° προς τα αριστερά. Αντίστοιχα, η ΜΕΔcs είναι μετατοπισμένη κατά 240° προς τα αριστερά ως προς την ΜΕΔas. Οι άξονες as, bs, cs, βρίσκονται στο μέσο της μέγιστης θετικής ΜΕΔ κάθε τυλίγματος.

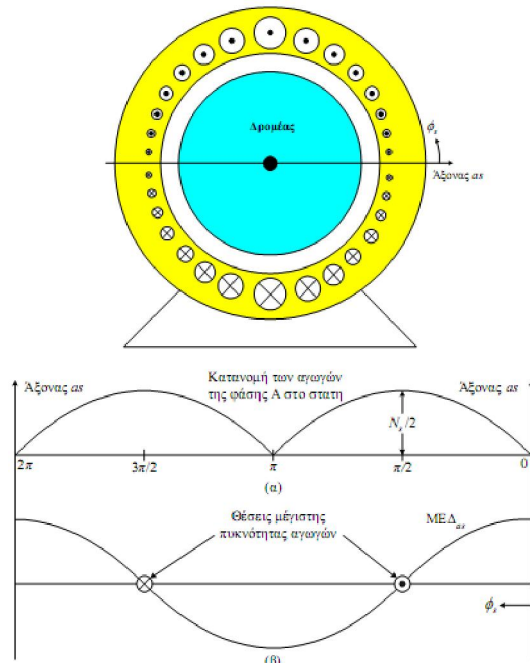
Οι κυματομορφές των ΜΕΔ που αναπτύσσουν τα τυλίγματα της στοιχειώδους μηχανής στο διάκενο, είναι μη ημιτονοειδείς συναρτήσεις της χωρικής γωνίας φ_s . Αυτό είναι ανεπιθύμητο, ιδιαίτερα στις μηχανές μεγάλης ισχύος, γιατί προκαλεί την ανάπτυξη αρμονικών τάσεων και ρευμάτων. Για την παραγωγή ημιτονοειδούς ΜΕΔ στο διάκενο της μηχανής, τα τυλίγματα του στάτη πρέπει να έχουν ημιτονοειδή κατανομή, όπως εικονίζεται στο Σχ. 3.3α. Τότε, η ΜΕΔ έχει την ημιτονοειδή μορφή του Σχ. 3.3β και ορίζεται από την παρακάτω σχέση, για τη φάση as :

$$ME\Delta_{as} = \frac{N_s}{2} \times i_{as} \times \cos \varphi_s$$

Όπου i_{as} είναι το ρεύμα στη φάση as του τυλίγματος και N_s είναι ο ισοδύναμος αριθμός σπειρών ενός ημιτονοειδούς κατανεμημένου τυλίγματος, ο οποίος δίνει την ίδια θεμελιώδη συνιστώσα με το πραγματικό τύλιγμα. Οι ΜΕΔ που αναπτύσσονται από τα τυλίγματα των φάσεων bs και cs, ορίζονται από τις σχέσεις :

$$ME\Delta_{bs} = \frac{N_s}{2} \times i_{bs} \times \cos \varphi_s$$

$$ME\Delta_{cs} = \frac{N_s}{2} \times i_{cs} \times \cos \varphi_s$$



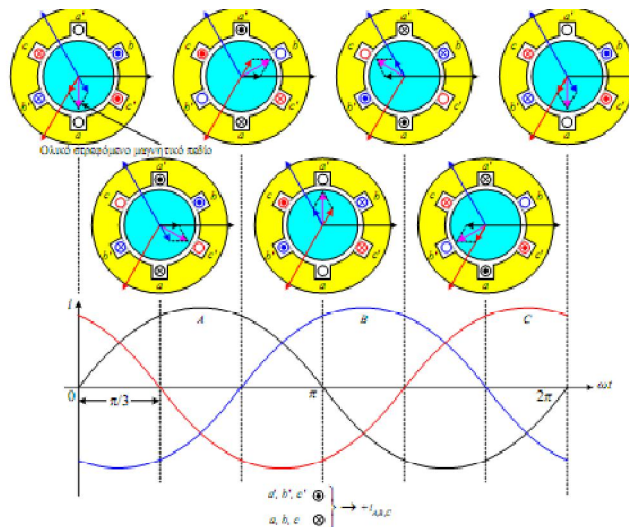
Σχήμα 3.3 (α) Ημιτονοειδή κατανομή τυλιγμάτων στάτη, (β) ημιτονοειδής μορφή ΜΕΔ

Η ολική ΜΕΔ στο διάκενο, από τα τρία τυλίγματα, είναι ίση με το άθροισμα των επιμέρους ΜΕΔ :

$$ME\Delta_s = \frac{N_s}{2} \times [i_{as} \times \cos \varphi_s + i_{bs} \times \cos(\varphi_s - 2\pi/3) + i_{cs} \times \cos(\varphi_s - 2\pi/3)]$$

Τα συμμετρικά ρεύματα στο τριφασικό τυλίγμα της μηχανής, ορίζονται από τις σχέσεις :

$$\begin{aligned} i_{as} &= i_{ms} \times \cos(\omega_e t) \\ i_{bs} &= i_{ms} \times \cos(\omega_e t - 2\pi/3) \\ i_{cs} &= i_{ms} \times \cos(\omega_e t + 2\pi/3) \end{aligned}$$



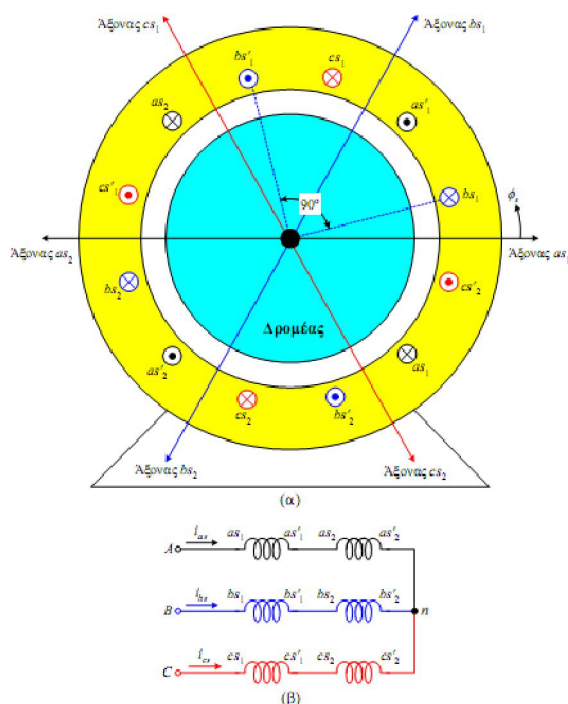
Σχήμα 3.4 Στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.

Όπου ω_e είναι η κυκλική συχνότητα των ρευμάτων. Αντικαθιστώντας ορίζεται η ολική ΜΕΔ στο διάκενο της μηχανής :

$$ME\Delta_s = \frac{N_s}{2} \times \frac{3}{2} \times i_{ms} \times \cos(\omega_e t - \varphi_s)$$

Η παραπάνω εξίσωση παριστά μια ΜΕΔ με ημιτονοειδή κατανομή, η οποία στρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω σε σχέση με το στάτη της μηχανής, με φορά αντίθετη των δεικτών του ρολογιού. Η ΜΕΔ έχει ένα ζεύγος πόλων. Επομένως, η ροή των τριφασικών ρευμάτων από το τριφασικό τύλιγμα του στάτη δημιούργησε ένα μαγνητικό πεδίο, ο βόρειος και ο νότιος πόλος του οποίου κάνουν μια πλήρη περιστροφή σε κάθε περίοδο των ρευμάτων.

Η δημιουργία του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου γίνεται φανερή από το Σχ. 3.4. Η θετική φορά των ρευμάτων σε καθένα από τα τρία τυλίγματα του στάτη, αντιστοιχεί σ' εκείνη του Σχ. 3.1α. Κάθε τύλιγμα από τη ροή του αντίστοιχου ρεύματος παράγει ένα μαγνητικό πεδίο, η θετική φορά του οποίου (βόρειος πόλος) εικονίζεται στο Σχ. 3.4 και είναι ίδια μ' εκείνη στο Σχ. 3.1α. Στο Σχ. 3.4 εικονίζονται τα μαγνητικά πεδία που παράγει κάθε τύλιγμα του στάτη μόνο του, καθώς και το ολικό πεδίο της μηχανής σε επτά διακριτές χρονικές στιγμές, οι οποίες αντιστοιχούν σε γωνίες των ρευμάτων 60° . Η διαδοχή φάσης των ρευμάτων είναι ABC. Παρατηρούμε ότι στη διπολική μηχανή που εξετάζουμε το ολικό μαγνητικό πεδίο στρέφεται κατά 60 μηχανικές μοίρες σε κάθε 60° μεταβολή της φασικής γωνίας των ρευμάτων με αντιωρολογιακή φορά, όπως ήδη γνωρίζουμε από την πιο πάνω εξίσωση. Αν η σειρά διαδοχής φάσης των ρευμάτων αντιστραφεί, τότε θα αντιστραφεί και η φορά περιστροφής του μαγνητικού πεδίου (ωρολογιακή).



Σχήμα 3.5 (α) Τυλίγματα στάτη σε τετραπολική μηχανή, (β) Τυλίγματα σε αστέρα

Στο Σχ. 3.5 εικονίζονται τα τυλίγματα του στάτη σε μια τετραπολική μηχανή. Το τύλιγμα της κάθε φάσης αποτελείται από δύο επιμέρους τυλίγματα, τα οποία συνδέονται σε σειρά. Τα τρία τυλίγματα συνδέονται σε αστέρα. Οι αντίθετες πλευρές των ομάδων κάθε τυλίγματος

(span) σχηματίζουν γωνία 90° . Η ΜΕΔ που αναπτύσσεται στο διάκενο των μηχανών με P πόλους, ορίζεται με αντίστοιχο τρόπο από τη σχέση :

$$ME\Delta_s = \frac{N_s}{2} \times \frac{3}{2} \times i_{ms} \times \cos(\omega_e t - \frac{P}{2} \varphi_s)$$

Η ταχύτητα περιστροφής της ΜΕΔ είναι μειωμένη και ίση με $\omega_e / (P / 2)$. Η ταχύτητα της ΜΕΔ ονομάζεται σύγχρονη ταχύτητα. Το μαγνητικό πεδίο αποτελείται από P πόλους.

3.1.2.2. *Είδη επαγωγικών μηχανών*

Οι επαγωγικές μηχανές διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με την κατασκευαστική δομή του δρομέα τους:

- Σε κινητήρες με βραχυκυκλωμένο δρομέα ή κλωβό (squirrel cage rotor)
- Κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα (wound rotor).

Οι μηχανές με βραχυκυκλωμένο κλωβό είναι οι πλέον διαδεδομένοι. Ο δρομέας των μηχανών αυτών αποτελείται από ελάσματα μονωμένα μεταξύ τους, τα οποία προσαρμόζονται στον άξονα. Τα ελάσματα φέρουν οδοντώσεις, οι οποίες σχηματίζουν αυλάκια κατά μήκος του δρομέα. Η γεωμετρική μορφή των αυλακώσεων καθορίζει την ηλεκτρική συμπεριφορά του κινητήρα, δηλαδή τη χαρακτηριστική ταχύτητας –ροπής. Στα αυλάκια του δρομέα τοποθετούνται ράβδοι από χαλκό ή ορείχαλκο, τα άκρα των οποίων συνδέονται μεταξύ τους με δακτυλίους βραχυκύκλωσης (shorting rings). Έτσι, σχηματίζεται το τύλιγμα κλωβού του δρομέα. Στους επαγωγικούς κινητήρες μικρής ισχύος, το τύλιγμα κλωβού κατασκευάζεται με χύτευση αλουμινίου στα αυλάκια του δρομέα. Στην περίπτωση αυτή, οι δακτύλιοι βραχυκύκλωσης και τα πτερύγια εξαερισμού χυτεύονται μαζί με τους αγωγούς του κλωβού, οι οποίοι δεν είναι μονωμένοι ως προς το σίδηρο του δρομέα. Όμως, τα ρεύματα κυκλοφορούν κυρίως από τον κλωβό, καθώς η αγωγιμότητα του αλουμινίου είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη του σιδήρου. Είναι φανερό ότι, ο δρομέας του επαγωγικού κινητήρα με βραχυκυκλωμένο κλωβό, δεν συνδέεται ηλεκτρικά με καμία πηγή. Στο γεγονός αυτό οφείλεται η απλή κατασκευή και η ευρεία χρήση του επαγωγικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού. Ο δρομέας των επαγωγικών κινητήρων με δακτυλιοφόρο δρομέα φέρει αυλακώσεις, μέσα στις οποίες τοποθετείται ένα τριφασικό τύλιγμα, αντίστοιχο μ' εκείνο του στάτη. Οι τρεις φάσεις του τυλίγματος στο δρομέα συνδέονται σχεδόν πάντα σε αστέρα. Τα τρία άκρα του τυλίγματος αστέρα καταλήγουν σε ισάριθμους δακτυλίους, που φέρει ο δρομέας. Μέσω των δακτυλίων και των ψηκτρών που εφάπτονται σ' αυτούς, είναι δυνατή η σύνδεση ρυθμιστικών αντιστάσεων στο τύλιγμα του δρομέα. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η τροποποίηση της χαρακτηριστικής ταχύτητας –ροπής του κινητήρα, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας.

3.1.2.3. *Ηλεκτρομαγνητική δομή της επαγωγικής μηχανής*

Ο επαγωγικός κινητήρας έχει στο στάτη ένα συμμετρικό τριφασικό τύλιγμα, με ωμική αντίσταση R_s , αυτεπαγωγή L_{st} και ισοδύναμο αριθμό σπειρών w_s ανά φάση (Σχήμα 3.6).

Όταν το τύλιγμα του στάτη τροφοδοτηθεί από μια συμμετρική τριφασική πηγή με τάση u και συχνότητα ω_e , δημιουργείται το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη Φ_s . Η συνιστώσα Φ_{sr} του πεδίου του στάτη (κοινή ροή, mutual flux), διασχίζει ακτινικά το διάκενο και συνδέει το τύλιγμα του δρομέα. Η συνιστώσα Φ_{ls} ονομάζεται ροή σκέδασης (leakage flux) και συνδέει μόνο τις σπείρες του στάτη. Το μέγεθος της ροής σκέδασης εξαρτάται από τη σύζευξη μεταξύ των τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα. Η σύζευξη των τυλιγμάτων στις ηλεκτρικές μηχανές είναι πολύ μικρότερη από εκείνη στους μετασχηματιστές, εξαιτίας του διακένου. Το ολικό πεδίο του στάτη είναι ίσο με:

$$\Phi_s = \Phi_{sr} + \Phi_{ls}$$

Το τύλιγμα του δρομέα έχει τη μορφή πλήρους τριφασικού τυλίγματος, με τον ίδιο αριθμό πόλων μ' εκείνο του στάτη, στον κινητήρα με δακτυλιοφόρο δρομέα. Στον κινητήρα με βραχυκυκλωμένο κλωβό το τύλιγμα του δρομέα αποτελείται από ράβδους, τα άκρα των οποίων συνδέονται με δακτυλίους βραχυκύκλωσης. Το τύλιγμα κλωβού μπορεί να θεωρηθεί αντίστοιχο με ένα πλήρες συμμετρικό τριφασικό τύλιγμα, με αριθμό πόλων ίσο μ' εκείνο του στάτη. Καθώς το στρεφόμενο πεδίο του στάτη (συνιστώσα Φ_{sr}) τέμνει τους αγωγούς του τυλίγματος του δρομέα, επάγει σ' αυτούς συμμετρικές τριφασικές τάσεις E_r . Το πλάτος και η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων, εξαρτάται από τη σχετική ταχύτητα του δρομέα ως προς το στρεφόμενο πεδίο του στάτη. Το τύλιγμα του δρομέα έχει ωμική αντίσταση R_r , αυτεπαγωγή L_{rot} και ισοδύναμο αριθμό σπειρών w_r ανά φάση. Εξαιτίας της επαγωγικής φύσης του βραχυκυκλωμένου τυλίγματος του δρομέα, το ρεύμα στο δρομέα I_r καθυστερεί ως προς την επαγόμενη τάση E_r . Στο σχήμα 3.6 εικονίζεται μόνο η μία φάση των τυλιγμάτων στο στάτη και το δρομέα.

Τα τριφασικά ρεύματα που ρέουν στο δρομέα, ως συνέπεια των επαγόμενων τάσεων από το στρεφόμενο πεδίο του στάτη, προκαλούν την ανάπτυξη του στρεφόμενου πεδίου του δρομέα Φ_r . Η συνιστώσα Φ_{rs} του πεδίου του δρομέα, συνδέει το τύλιγμα του στάτη.

Η συνιστώσα Φ_{lr} αντιπροσωπεύει τη ροή σκέδασης. Έτσι, ισχύει:

$$\Phi_l = \Phi_{ls} + \Phi_{sr}$$

Το διανυσματικό διάγραμμα των παραπάνω μεγεθών εικονίζεται στο Σχήμα 3.6. Η ολική μαγνητική ροή στο διάκενο του κινητήρα Φ_m , είναι ίση με το διανυσματικό άθροισμα των κοινών ροών του στάτη και του δρομέα :

$$\Phi_m = \Phi_{sr} + \Phi_{rs}$$

Η αλληλεπίδραση των μαγνητικών πεδίων του στάτη και του δρομέα, τα οποία στρέφονται με την ίδια ταχύτητα, προκαλεί την ανάπτυξη μιας σταθερής ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Η ροπή είναι ανάλογη με το εξωτερικό γινόμενο των πεδίων :

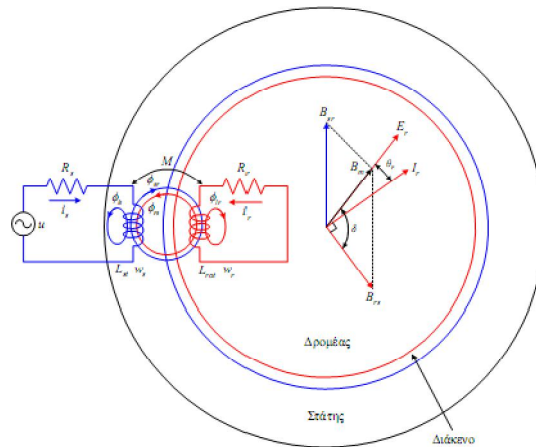
$$T_e = C_1 \times (B_{sr} \times B_{rs})$$

Ή αντίστοιχα για τα πεδία:

$$T_e = C_2 \times (B_m \times B_{rs}) \leftrightarrow T_e = C_T \times B_m \times B_{rs} \times \sin \delta = C_T \times B_m \times B_{rs} \times \cos \theta_r$$

και η φορά της είναι η ίδια με τη φορά περιστροφής των πεδίων του στάτη και του δρομέα. Από τα προηγούμενα προκύπτει ότι, τα ρεύματα στο δρομέα του κινητήρα προέρχονται από τις τάσεις εξ επαγωγής που προκαλεί το στρεφόμενο πεδίο του στάτη. Επομένως, ο δρομέας δεν απαιτείται να τροφοδοτηθεί από κάποια εξωτερική πηγή ενέργειας. Οι

μηχανές με τροφοδότηση μόνο στο στάτη, ονομάζονται απλής διέγερσης (singly excited). Αντίστοιχα, οι μηχανές που τροφοδοτούνται από εξωτερικές πηγές τόσο στο στάτη όσο και στο δρομέα, όπως οι ασύγχρονες και οι μηχανές συνεχούς ρεύματος, ονομάζονται διπλής διέγερσης (doubly excited).



Σχήμα 3.6 Μία φάση τυλιγμάτων στάτη και δρομέα.

3.1.2.4. Η ολίσθηση

Η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του στάτη, εξαρτάται από τη συχνότητα των ρευμάτων εξόδου $\omega_e = 2\pi f_e$ και τον αριθμό των πόλων P , σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση. Η ταχύτητα του στρεφόμενου πεδίου ονομάζεται σύγχρονη ταχύτητα n_s και ορίζεται από την παρακάτω σχέση σε rpm :

$$n_s = \frac{60f_e}{P/2} = \frac{120f_e}{P}$$

Στον επαγωγικό κινητήρα, η ανάπτυξη της ροπής οφείλεται στην αλληλεπίδραση των μαγνητικών πεδίων του στάτη και του δρομέα. Όμως, το πεδίο του δρομέα οφείλεται στις τάσεις εξ' επαγωγής, οι οποίες αναπτύσσονται στο δρομέα μόνο όταν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ του δρομέα και του στρεφόμενου πεδίου. Επομένως, η ταχύτητα του δρομέα δεν μπορεί να είναι ίση με τη σύγχρονη, καθώς τότε δεν θα επάγονταν τάσεις στο δρομέα, με συνέπεια το ρεύμα και η ροή του δρομέα να ήταν μηδενικά. Έτσι, η ροπή θα μηδενίζονταν και η ταχύτητα του κινητήρα θα μειώνονταν σε μια τιμή μικρότερη από τη σύγχρονη.

Η διαφορά της ταχύτητας του δρομέα n_r από τη σύγχρονη n_s ονομάζεται ταχύτητα ολίσθησης (slip speed) και ορίζεται από τη σχέση :

$$n_{slip} = n_s - n_r$$

Η ποσοστιαία διαφορά της ταχύτητας του κινητήρα από τη σύγχρονη ταχύτητα ονομάζεται ολίσθηση (slip) :

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100\%$$

Όταν ο κινητήρας είναι ακίνητος, η ολίσθηση είναι ίση με τη μονάδα ($s = 1$). Αν ο δρομέας στρέφονταν με τη σύγχρονη ταχύτητα, η ολίσθηση θα ήταν μηδέν ($s = 0$). Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει η παρακάτω σχέση της ταχύτητας του κινητήρα, ως συνάρτηση της σύγχρονης ταχύτητας και της ολίσθησης :

$$n_r = (1 - s) \times n_s$$

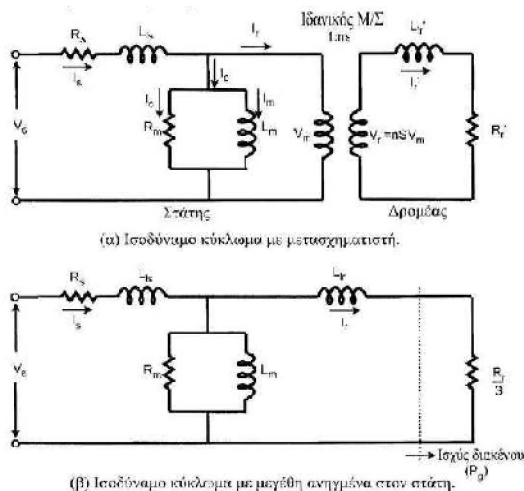
Η ονομασία ασύγχρονος κινητήρας, προέρχεται από τη διαφορά της ταχύτητας του δρομέα από τη σύγχρονη, η οποία είναι ανάλογη με τη ροπή του φορτίου.

3.1.2.5. Ισοδύναμο κύκλωμα μηχανής επαγωγής

Στην ανάλυση και στο σχεδιασμό των μηχανών επαγωγής, το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα της μηχανής επαγωγής έχει ευρέως χρησιμοποιηθεί και φαίνεται στο σχήμα 2.1:

Στο κύκλωμα :

- R_s και R_r είναι οι αντιστάσεις του στάτη και του δρομέα αντίστοιχα
- L_m είναι η αλληλεπαγωγή των τυλιγμάτων στάτη-δρομέα ή επαγωγή μαγνήτισης (magnetizing inductance)
- L_{ls} και L_{lr} είναι η αυτεπαγωγές σκεδάσεως του τυλίγματος του στάτη (stator leakage inductance) και του δρομέα (rotor leakage inductance) αντίστοιχα.
- V_s τάση στάτη ή της πηγής (δίκτυο)
- S η ολίσθηση



Σχήμα 3.7 Ισοδύναμο ανά φάση κύκλωμα της ασύγχρονης τριφασικής μηχανής επαγωγής στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Στον στάτη της μηχανής εφαρμόζεται η τάση V_s της πηγής (δίκτυο). Ανάλογα με το αν τα τριφασικά τυλίγματα της μηχανής είναι συνδεδεμένα κατ' αστέρα ή σε τρίγωνο η τάση αυτή είναι η φασική ή η πολική τάση του δικτύου αντίστοιχα. Το ανά φάση τύλιγμα του στάτη παρίσταται από μια ωμική αντίσταση R_s και μια επαγωγή L_{ls} (πηνίο). Η αντίσταση προσομοιώνει τις απώλειες Joule (θερμότητα) στο τύλιγμα λόγω της κυκλοφορίας ρεύματος σε αυτό, ενώ η επαγωγή προσομοιώνει τη σκέδαση (ροή που δημιουργείται από το τύλιγμα και εμπλέκει το ίδιο το τύλιγμα χωρίς να εμπλέκει άλλα τυλίγματα της μηχανής) του μαγνητικού πεδίου του τυλίγματος. Η επαγωγή L_{ls} ονομάζεται και αυτεπαγωγή του τυλίγματος του στάτη (stator leakage inductance). Ο εγκάρσιος κλάδος που ακολουθεί και αποτελείται από μια ωμική αντίσταση παράλληλα με μια επαγωγή καλείται κλάδος μαγνήτισης. Ο κλάδος μαγνήτισης διαρρέεται από το ρεύμα πυρήνα (I_0) το οποίο αποτελείται από δύο συνιστώσες: το ρεύμα απωλειών πυρήνα (I_c) και από το ρεύμα μαγνήτισης (I_m). Το ρεύμα απωλειών πυρήνα (I_c) διαρρέει την αντίσταση R_m , η οποία

συμβολίζει τις θερμικές απώλειες του σιδηρομαγνητικού πυρήνα από τον συνεχή επαναπροσανατολισμό των στοιχειωδών μαγνητικών δίπολων του μαγνητικού υλικού (υστέρηση) και από τα δινορρεύματα. Το ρεύμα μαγνήτισης (I_m) διαρρέει την επαγωγή L_m , η οποία μοντελοποιεί το μαγνητικό πεδίο εντός της μηχανής που εμπλέκει τα τυλίγματα στάτη και δρομέα. Η επαγωγή L_m ονομάζεται και αλληλεπαγωγή τυλιγμάτων στάτη-δρομέα ή επαγωγή μαγνήτισης (magnetizing inductance). Επιπλέον, στο ισοδύναμο αυτό κύκλωμα, όλες οι μεταβλητές και οι παράμετροι του δρομέα δεν είναι οι πραγματικές τους τιμές αλλά οι ποσότητες που είναι ανηγμένες στο στάτη. Είναι επίσης γνωστό ότι οι μηχανές επαγωγής δεν στρέφονται σύγχρονα με την συχνότητα διέγερσης. Σε ονομαστικό φορτίο η ταχύτητα της μηχανής επαγωγής είναι ελαφρώς μικρότερη, κατά 2-7% από την σύγχρονη ταχύτητα [11].

3.1.2.6. Απώλειες των επαγωγικών μηχανών

Ο βαθμός απόδοσης του τριφασικού επαγωγικού κινητήρα, εκφράζει την ικανότητά του να μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια εισόδου σε μηχανική. Κατά τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας, ένα ποσοστό της ισχύος εισόδου καταναλώνεται από τον κινητήρα, με αποτέλεσμα την ανύψωση της θεοκρασίας του. Αυτό το ποσοστό αντιπροσωπεύει τις απώλειες της μηχανής, οι οποίες πρέπει να είναι οι ελάχιστες δυνατές. Οι ολικές απώλειες των επαγωγικών κινητήρων, απαρτίζονται από τις παρακάτω επιμέρους συνιστώσες:

- **Απώλειες χαλκού ή ωμικές απώλειες (copper, winding losses).** Οι απώλειες χαλκού οφείλονται στη ροή των ρευμάτων από τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα. Οι απώλειες χαλκού στο στάτη ορίζονται από τη σχέση :

$$P_{cu,s} = 3R_s \times I_s^2$$

και στο δρομέα από τη σχέση :

$$P_{cu,r} = 3R_r \times I_r^2$$

Οι ολικές απώλειες χαλκού είναι ίσες με το άθροισμα των απωλειών στο στάτη και το δρομέα :

$$P_{cu} = P_{cu,s} + P_{cu,r}$$

Οι απώλειες χαλκού εξαρτώνται από το μέγεθος των αντιστάσεων των τυλιγμάτων και το μέγεθος των ρευμάτων στο στάτη I_s και το δρομέα I_r , τα οποία είναι συνάρτηση της ροπής του φορτίου. Οι απώλειες χαλκού στο στάτη και το δρομέα συμβάλλουν κατά 33–40% και 15–22% αντίστοιχα, στις ολικές απώλειες των συμβατικών επαγωγικών κινητήρων υπό ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας.

- **Απώλειες σιδήρου ή μαγνητικές απώλειες (core, iron losses).** Οι απώλειες σιδήρου προκύπτουν από το άθροισμα των απωλειών υστέρησης και δινορρευμάτων στο

στάτη και το δρομέα. Εξαρτώνται από το μέγεθος της ολικής μαγνητικής ροής στο διάκενο Φ_m και τη συχνότητα μεταβολής της, ενώ είναι ανεπηρέαστες από τη ροπή του φορτίου. Οι απώλειες σιδήρου στο στάτη προσεγγίζονται από τη σχέση :

$$P_{iron,s} = k_e \times \omega_e^2 \times \Phi_m^2 + k_h \times \omega_e \times \Phi_m^n$$

$$P_{iron,r} = k_e \times (s\omega_e)^2 \times \Phi_m^2 + k_h \times s \times \omega_e \times \Phi_m^n$$

Όπου k_e είναι ο συντελεστής απωλειών δινορρευμάτων και k_h ο συντελεστής απωλειών υστέρησης. Ο εκθέτης n λαμβάνει τιμές από 1.5 έως 2.5 και συνήθως θεωρείται $n = 2$. Στην περίπτωση αυτή, οι ολικές απώλειες σιδήρου του επαγωγικού κινητήρα είναι ίσες με :

$$P_{iron,s+r} = [k_e \times (1 + s^2) \times \omega_e^2 + k_h \times (1 + s^2) \times \omega_e] \Phi_m^n$$

Οι απώλειες σιδήρου στο δρομέα είναι σημαντικά μικρότερες από εκείνες στο στάτη, εξαιτίας της μικρότερης συχνότητας $s\omega_e$. Οι απώλειες σιδήρου αποτελούν τη δεύτερη σημαντικότερη συνιστώσα των ολικών απωλειών, με ποσοστό περίπου 20%. Στο ισοδύναμο κυκλώματος Σχήμα 3.7 οι μαγνητικές απώλειες μοντελοποιούνται με μια αντίσταση R_m σε παράλληλη σύνδεση με την αντίδραση μαγνήτισης. Η τιμή της αντίστασης απωλειών σιδήρου, υπολογίζεται από τη σχέση :

$$P_{iron,s+r} = \frac{E^2}{R_m}$$

Αντικαθιστώντας $E = \omega_e \times \Phi_m$

$$R_m = \frac{1}{k_e \times (1 + s^2) + ((1 + s) \times k_h / \omega_e)}$$

- **Μηχανικές απώλειες (mechanical losses).** Οι μηχανικές απώλειες P , περιλαμβάνουν τις απώλειες τριβών (friction), λόγω της περιστροφής του άξονα και τη συνιστώσα αερισμού (windage) από τη λειτουργία του ανεμιστήρα. Οι απώλειες τριβών-αερισμού, μεταβάλλονται προσεγγιστικά ανάλογα με το τετράγωνο της ταχύτητας :

$$P_{fw} = C_{fw} \times n_r^2$$

όπου, C_{fw} είναι ο συντελεστής μηχανικών απωλειών. Οι μηχανικές απώλειες αποτελούν το 8–10% των ολικών απωλειών στο ονομαστικό φορτίο.

- **Κατανεμημένες απώλειες (stray losses).** Πρόκειται για πρόσθετες απώλειες της μηχανής, οι οποίες οφείλονται στην αύξηση της ροής σκέδασης με το φορτίο και στις υψηλής συχνότητας διακυμάνσεις της ροής αυτής. Ο προσδιορισμός των κατανεμημένων απωλειών P_{stray} είναι εξαιρετικά δύσκολος. Έτσι, συνήθως λαμβάνονται ίσες με το 1% της ισχύος εξόδου της μηχανής, στη λειτουργία με το

ονομαστικό φορτίο. Οι κατανεμημένες απώλειες αποτελούν το 8–20% των ολικών απωλειών, ανάλογα με την ιπποδύναμη του κινητήρα [12].

3.1.2.7. Ισχύς και ροπή επαγωγικών μηχανών

Ο τριφασικός επαγωγικός κινητήρας μετατρέπει την ηλεκτρική ισχύ εισόδου σε μηχανική. Η ηλεκτρική ισχύς εισόδου ορίζεται από τη σχέση :

$$P_{in} = 3 \times V \times I_s \times \cos \Phi$$

όπου V είναι η φασική τάση, I_s το φασικό ρεύμα και Φ η διαφορά φάσης μεταξύ της τάσης και του ρεύματος. Η ισχύς που απομένει, αν από την ισχύ εισόδου αφαιρεθούν οι απώλειες χαλκού και οι μαγνητικές απώλειες στο στάτη, είναι η ισχύς που μέσω του διακένου μεταφέρεται στο δρομέα. Η ισχύς αυτή ονομάζεται ισχύς διακένου (air gap power). Από το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα, η ισχύς διακένου μπορεί να καταναλωθεί μόνο στην αντίσταση R'_r . Επομένως, η ισχύς διακένου ορίζεται από τη σχέση :

$$P_{ag} = 3 \times I_r'^2 \times \left(\frac{R'_r}{s} \right) = 3 \times E \times I_r' \times \cos \theta_r$$

Ένα τμήμα της ισχύος διακένου χάνεται ως απώλειες χαλκού στο δρομέα και ένα τμήμα ως απώλειες σιδήρου στο δρομέα. Η ισχύς που απομένει P_m , μετατρέπεται σε μηχανική. Η ισχύς αυτή ονομάζεται αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύς και ορίζεται από την παρακάτω σχέση, αν αγνοήσουμε τις μικρές απώλειες σιδήρου στο δρομέα.

$$P_m = P_{ag} - P_{cu,r} = 3 \times I_r'^2 \times \left(\frac{R'_r}{s} \right) - 3 \times I_r'^2 \times R'_r = P_{ag} \times (1 - s)$$

Συνήθως, οι απώλειες σιδήρου του δρομέα ενσωματώνονται στις μαγνητικές απώλειες του στάτη. Οι απώλειες χαλκού του δρομέα, από την παραπάνω εξίσωση υπολογίζονται από το γινόμενο της ισχύος διακένου με την ολίσθηση :

$$P_{cu,r} = s \times P_{ag}$$

Όταν ο κινητήρας δεν στρέφεται ($s = 1$), όλη η ισχύς διακένου μετατρέπεται σε θερμότητα στην αντίσταση του δρομέα. Αυτό συμβαίνει γιατί η ισχύς εξόδου είναι μηδενική. Η ωφέλιμη ισχύς εξόδου του επαγωγικού κινητήρα, είναι μικρότερη από την αναπτυσσόμενη ισχύ κατά τις μηχανικές και τις κατανεμημένες απώλειες :

$$P_{out} = P_m - P_{fw} - P_{stray}$$

Αντίστοιχα, η πραγματική ροπή στον άξονα του κινητήρα, εξαιτίας των τριβών και των κατανεμημένων απωλειών είναι μικρότερη από την εσωτερική ροπή. Η εσωτερική ροπή ονομάζεται αναπτυσσόμενη ή ηλεκτρομαγνητική ροπή (developed torque). Η ηλεκτρομαγνητική ροπή ορίζεται από την αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύ και την κυκλική ταχύτητα του κινητήρα, ή ισοδύναμα από την ισχύ διακένου και τη σύγχρονη ταχύτητα :

$$T_e = \frac{P_m}{\omega_r} = \frac{(1-s) \times P_{ag}}{(1-s) \times \omega_s} = \frac{P_{ag}}{\omega_s}$$

3.2. Σύγχρονες γεννήτριες.

Η σύγχρονη γεννήτρια είναι πιο πολύπλοκη και ακριβότερη σε σχέση με μια αντίστοιχη επαγωγική. Εμφανίζει όμως ένα σημαντικό πλεονέκτημα έναντι της επαγωγικής: δεν απαιτεί άεργο ρεύμα μαγνήτισης. Σε γενικές γραμμές η λειτουργία των σύγχρονων μηχανών έχει ως εξής: Όλες οι τριφασικές γεννήτριες χρησιμοποιούν ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο δημιουργείται από τρεις ηλεκτρομαγνήτες. Καθένας από τους τρεις ηλεκτρομαγνήτες είναι συνδεδεμένος με μια φάση του ηλεκτρικού δικτύου. Καθένας από τους ηλεκτρομαγνήτες μετατρέπεται διαδοχικά από Νότιος σε Βόρειος πόλος και αντίστροφα. Η μεταβολή αυτή του μαγνητισμού αντικατοπτρίζει ακριβώς τη μεταβολή της τάσης της κάθε φάσης. Όταν η μια φάση βρίσκεται στο μέγιστο, οι άλλες δυο διαρρέονται από ρεύμα αντίθετης διεύθυνσης στη μισή τάση. Αφού οι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι ανά 120 μοίρες, το μαγνητικό πεδίο θα κάνει μια πλήρη περιστροφή ανά κύκλο. Η σύγχρονη μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια αν επιβληθεί στον δρομέα ρεύμα ώστε να τον εξαναγκάσει στην κυκλική κίνηση, αντί να τον περιστρέφει το ρεύμα του δικτύου. Πρέπει συνεπώς να υπάρχει ένας ισχυρός μαγνήτης για να παράγεται αρκετό ρεύμα. Όσο περισσότερη δύναμη εφαρμόζεται στο δρομέα τόσο περισσότερο ρεύμα παράγεται, η γεννήτρια όμως συνεχίζει να λειτουργεί στην ίδια ταχύτητα η οποία προσδιορίζεται από τη συχνότητα του δικτύου και τους πόλους της μηχανής. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα να αποσυνδεθεί η γεννήτρια από το δίκτυο, και να προκύψει ένα ανεξάρτητο τριφασικό δίκτυο. Εάν όμως αποσυνδεθεί η γεννήτρια από το δίκτυο, θα πρέπει να διατηρηθεί σταθερή περιστροφική ταχύτητα προκειμένου να παραχθεί εναλλασσόμενο ρεύμα με σταθερή συχνότητα. Επομένως, με τέτοιου είδους γεννήτρια θα πρέπει συνήθως να χρησιμοποιείται έμμεση σύνδεση με το δίκτυο. Στην πράξη, σύγχρονες γεννήτριες με μόνιμους μαγνήτες δεν χρησιμοποιούνται πολύ. Υπάρχουν αρκετοί λόγοι γι' αυτό. Ένας είναι ότι οι μόνιμοι μαγνήτες τείνουν να απομαγνητιστούν όταν λειτουργούν κάτω από ισχυρά μαγνητικά πεδία όπως αυτά της γεννήτριας. Ένας άλλος είναι ότι ισχυροί μαγνήτες φτιάχνονται από σπάνια μέταλλα π.χ. Νεοδύμιο, και είναι πολύ ακριβοί. Συνήθως οι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούν σύγχρονες γεννήτριες χρησιμοποιούν στον δρομέα ηλεκτρομαγνήτες που λειτουργούν με συνεχές ρεύμα το οποίο παρέχεται από το δίκτυο. Αφού όμως το δίκτυο παρέχει εναλλασσόμενο ρεύμα, πρέπει να προηγηθεί ένα στάδιο μετατροπής του εναλλασσόμενου σε συνεχές ρεύμα. Η ταχύτητα μιας γεννήτριας που είναι άμεσα συνδεδεμένη με το τριφασικό δίκτυο είναι σταθερή, προσδιορίζεται από τη συχνότητα του δικτύου, και από τα ζεύγη πόλων του στάτη. Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες με σύγχρονες μηχανές χρησιμοποιούν γεννήτριες με δύο ή τρία ζεύγη πόλων. Ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιούνται αυτές οι σχετικά υψηλής ταχύτητας γεννήτριες είναι η οικονομία σε μέγεθος και κόστος. Η μέγιστη δύναμη την οποία μπορεί να 'αντέξει' η γεννήτρια εξαρτάται από το μέγεθος του δρομέα. Για δεδομένη ισχύ εξόδου υπάρχει η δυνατότητα επιλογής μεταξύ μιας αργόστροφης, μεγάλης και άρα ακριβής γεννήτριας, ή μιας υψηλόστροφης και άρα φθηνότερης μικρότερης γεννήτριας [11].

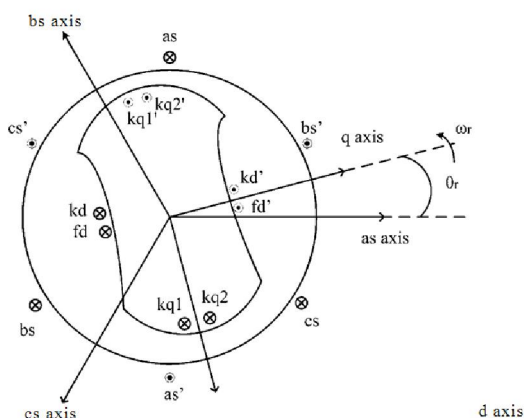
3.2.1. Γενικά περί σύγχρονων μηχανών.

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται οι βασικές διαφορικές και αλγεβρικές εξισώσεις, οι οποίες περιγράφουν μία συμμετρική τριφασική σύγχρονη γεννήτρια.

Για την εξαγωγή των εξισώσεων της σύγχρονης γεννήτριας γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές

- Τα τυλίγματα του στάτη έχουν ημιτονοειδή κατανομή κατά μήκος του διακένου.
- Οι αύλακες του στάτη δεν προκαλούν σημαντική μεταβολή των αυτεπαγωγών και των αλληλεπαγωγών λόγω της θέσης του δρομέα.

Μία 2-πολική, 3-φασική σύγχρονη μηχανή, με έκτυπους πόλους και τα τυλίγματα του στάτη συνδεδεμένα κατά αστέρα φαίνεται στο σχήμα 3.2



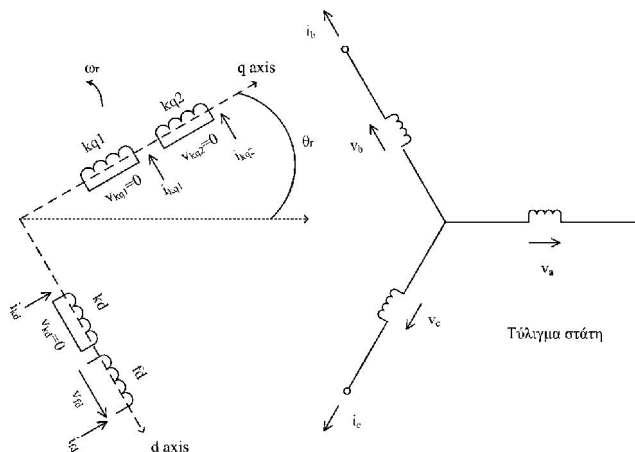
Σχήμα 3.8 Παράσταση σύγχρονης μηχανής με έκτυπους πόλους

Τα τυλίγματα των τριών φάσεων του στάτη είναι όμοια μεταξύ τους και ημιτονοειδώς διανεμημένα. Το κάθε ένα έχει N_s ισοδύναμα ελίγματα και ωμική αντίσταση r_s . Ο δρομέας διαθέτει τύλιγμα πεδίου, με N_{fd} ισοδύναμα ελίγματα και ωμική αντίσταση r_{fd} , καθώς και τρία βραχυκυκλωμένα τυλίγματα αποσβέσεως τα οποία έχουν ισοδύναμα ελίγματα N_{kq1} , N_{kq2} , N_{kd} και αντιστάσεις r_{kq1} , r_{kq2} , r_{kd} αντίστοιχα.

Στο σχήμα 3.2 σημειώνονται οι μαγνητικοί άξονες των τυλιγμάτων του στάτη. Επίσης, εισάγονται ο εγκάρσιος άξονας (άξονας q - quadrature) και ο ευθύς άξονας (άξονας d - direct). Ο άξονας q είναι ο άξονας των τυλιγμάτων αποσβέσεως $kq1$ και $kq2$, ενώ ο άξονας d ταυτίζεται με τον άξονα του τυλιγματος διέγερσης και του τυλιγματος αποσβέσεως kd . Ο άξονας q για τη θετική φορά περιστροφής, λαμβάνεται να προηγείται κατά 90° του άξονα d . Η γωνία του δρομέα θ_r μετράται ως προς τον άξονα του πηνίου as .

Οι εντάσεις του στάτη θεωρούνται συμβατικά εξερχόμενες από τους ακροδέκτες της μηχανής, δηλαδή ακολουθείται η γνωστή σύμβαση γεννήτριας για τη γραφή των

εξισώσεων. Συνεπώς, με τη δεδομένη θετική φορά των μαγνητικών αξόνων, αρνητικές πεπλεγμένες ροές προκύπτουν από θετικά ρεύματα στο στάτη.



Σχήμα 3.9 Κυκλωματική παράσταση σύγχρονης μηχανής.

3.2.2. Μετασχηματισμός του Park.

Με δεδομένο ότι οι επαγωγές των τυλιγμάτων της μηχανής είναι συναρτήσεις της γωνίας του δρομέα θ_f και επομένως, της γωνιακής ταχύτητας ω_r , οι διαφορικές εξισώσεις των τάσεων είναι μη γραμμικές και οι συντελεστές των μεταβλητών είναι χρονικά μεταβαλλόμενοι. Επιπλέον, η ταχύτητα του δρομέα είναι συνάρτηση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής, η οποία προκύπτει από γινόμενα εντάσεων. Προφανώς, η επίλυση των εξισώσεων είναι εξαιρετικά πολύπλοκη, και καθίσταται αναγκαία η χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Ο μετασχηματισμός του Park αποτελεί το μαθηματικό εργαλείο για την ανάλυση των σύγχρονων μηχανών. Ο μετασχηματισμός αυτός συνίσταται στην αντικατάσταση των τριών τυλιγμάτων a, b, c του στάτη από τρία υποθετικά (ισοδύναμα) τυλίγματα d, q, 0. Με τον τρόπο αυτό ο μετασχηματισμός του Park συμβάλει στην απλοποίηση των εξισώσεων μετατρέποντας τους χρονικά μεταβαλλόμενους συντελεστές σε χρονικά αμετάβλητους. Τα τυλίγματα d, q του στάτη περιστρέφονται μαζί με τον δρομέα της μηχανής και βρίσκονται στους ίδιους άξονες με τα αντίστοιχα τυλίγματα του δρομέα (τύλιγμα διεγέρσεως και τυλίγματα αποσβέσεως). Το τρίτο τύλιγμα 0 δεν είναι μαγνητικά συζευγμένο με τα άλλα δύο νέα τυλίγματα του στάτη και παίζει ρόλο μόνο σε συνθήκες ασύμμετρης φόρτισης της μηχανής. Η σχηματική παράσταση των τυλιγμάτων μίας σύγχρονης μηχανής μετά τους μετασχηματισμούς του Park φαίνονται στο σχήμα 2.7. Στη γενικότερη περίπτωση, η αλλαγή των μεταβλητών, που συνιστά έναν μετασχηματισμό των τριφασικών μεταβλητών ενός στατικού κυκλώματος (abc) σε μεταβλητές ενός στρεφόμενου συστήματος αναφοράς (qd0s), γράφεται:

$$f_{qdos} = k_s \times f_{abc}$$

Όπου:

$$(f_{qdos})^T = [f_{qs} \quad f_{ds} \quad f_{os}]$$

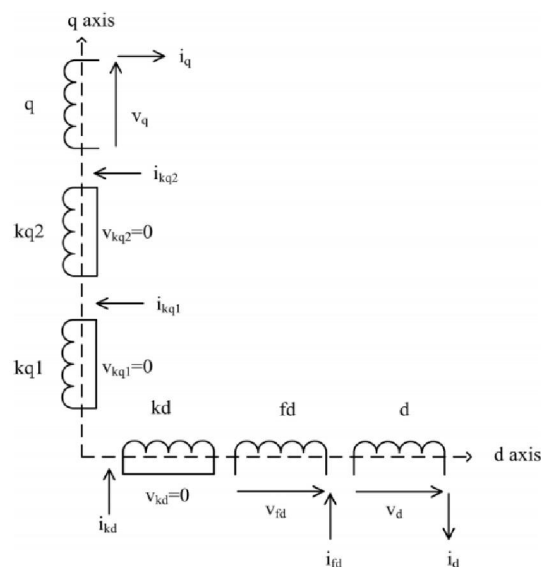
$$(f_{abcs})^T = [f_{as} \quad f_{bs} \quad f_{cs}]$$

$$k_s = \frac{2}{3} \times \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$\theta = \int_0^t \omega(\xi) d\xi + \theta(0)$$

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός: $f_{abcs} = k_s^{-1} \times f_{qdos}$ κάνει χρήση του πίνακα

$$k_s^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix}$$



Σχήμα 3.10 Τυλίγματα σύγχρονης μηχανής μετά το μετασχηματισμό του Park

Στις εξισώσεις αυτές, το σύμβολο f συμβολίζει τάση, ένταση, ή πεπλεγμένη ροή. Ο εκθέτης T συμβολίζει τον ανάστροφο ενός πίνακα. Η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής των αξόνων είναι αυθαίρετη, και μπορεί να είναι οποιαδήποτε συνάρτηση του χρόνου, αρκεί η γωνία θ να είναι συνεχής.

Ο μετασχηματισμός του Park αποτελεί μια ειδική περίπτωση του μετασχηματισμού $abcs \rightarrow qdos$, όπου η γωνιακή ταχύτητα του στρεφόμενου πλαισίου λαμβάνεται ίση

με τη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα. Ο άξονας d ταυτίζεται με τον άξονα του μαγνητικού πεδίου του τυλίγματος διέγερσης. Αφού εφαρμοσθεί ο μετασχηματισμός, οι εξισώσεις του Park για τα τυλίγματα d, q του στάτη στο πλαίσιο αναφοράς του δρομέα είναι:

$$U_{ds} = -r_s \times i_{ds} + \frac{1}{\omega_b} \times \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \frac{\omega_r}{\omega_b} \times \psi_{qs}$$

$$U_{qs} = -r_s \times i_{qs} + \frac{1}{\omega_b} \times \frac{d\psi_{qs}}{dt} - \frac{\omega_r}{\omega_b} \times \psi_{ds}$$

όπου U_{ds}, U_{qs} : οι τάσεις των τυλιγμάτων d, q του στάτη αντίστοιχα,

i_{ds}, i_{qs} : τα ρεύματα των τυλιγμάτων d,q του στάτη αντίστοιχα.

Ψ_{ds}, Ψ_{qs} : οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο των τυλιγμάτων d,q του αντίστοιχα.

ω_b : η ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα (σε rad/sec) του συστήματος.

r_s : η ωμική αντίσταση του στάτη.

Οι εξισώσεις του Park για τα τυλίγματα του δρομέα είναι:

$$U_{fd} = -r_{fd} \times i_{fd} + \frac{1}{\omega_b} \times \frac{d\psi_{fs}}{dt}$$

$$U_{kd} = 0 = r_{kd} \times i_{kd} + \frac{1}{\omega_b} \times \frac{d\psi_{kd}}{dt}$$

$$U_{kq1} = 0 = r_{kq1} \times i_{kq1} + \frac{1}{\omega_b} \times \frac{d\psi_{kq1}}{dt}$$

$$U_{kq2} = 0 = r_{kq2} \times i_{kq2} + \frac{1}{\omega_b} \times \frac{d\psi_{kq2}}{dt}$$

Όπου $U_{fd}, U_{kd}, U_{kq1}, U_{kq2}$: οι τάσεις του τυλίγματος διέγερσης και των τυλιγμάτων απόσβεσης αντίστοιχα.

$i_{fd}, i_{kd}, i_{kq1}, i_{kq2}$: τα ρεύματα του τυλίγματος διέγερσης και των τυλιγμάτων απόσβεσης αντίστοιχα.

$\Psi_{fd}, \Psi_{kd}, \Psi_{kq1}, \Psi_{kq2}$: οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο του τυλίγματος διέγερσης και των τυλιγμάτων απόσβεσης αντίστοιχα

$r_{fd}, r_{kd}, r_{kq1}, r_{kq2}$: οι ωμικές αντιστάσεις του τυλίγματος διέγερσης και των

τυλιγμάτων απόσβεσης αντίστοιχα.

Οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο δίνονται από τις σχέσεις:

$$\psi_{ds} = -X_{is} \times i_{ds} + X_{md} \times (-i_{ds} + i_{kd} + i_{fd})$$

$$\psi_{qs} = -X_{is} \times i_{qs} + X_{mq} \times (-i_{qs} + i_{kq1} + i_{kq2})$$

$$\psi_{fd} = -X_{ifd} \times i_{fd} + X_{md} \times (-i_{ds} + i_{fd} + i_{kd})$$

$$\psi_{kd} = -X_{ikd} \times i_{kd} + X_{md} \times (-i_{ds} + i_{kd} + i_{fd})$$

$$\psi_{kq1} = -X_{ikq1} \times i_{kq1} + X_{mq} \times (-i_{qs} + i_{kq1} + i_{kq2})$$

$$\psi_{kq2} = -X_{ikq2} \times i_{kq2} + X_{mq} \times (-i_{qs} + i_{kq1} + i_{kq2})$$

Όπου X_{is} , X_{ifd} , X_{ikd} , X_{ikq1} , X_{ikq2} : Οι αυτεπαγωγές του στάτη του τυλίγματος διέγερσης και των τυλιγμάτων απόσβεσης αντίστοιχα.

X_{md} , X_{mq} : οι αμοιβαίες επαγωγικές αντιδράσεις στον άξονα d,q αντίστοιχα.

3.2.3. Ανά μονάδα σύστημα.

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή συναρτηίσει των πεπλεγμένων ροών ανά δευτερόλεπτο και των ρευμάτων δίνεται σε φυσικές τιμές από τη σχέση:

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \times \left(\frac{p}{2}\right) \times \left(\frac{1}{\omega_b}\right) \times (\psi_{ds} \times i_{qs} - \psi_{qs} \times i_{ds})$$

Όπου p ο αριθμός των πόλων της μηχανής.

Η βασική ισχύς μπορεί να εκφραστεί:

$$S_B = 3V_{B(abc)} \times I_{B(abc)}$$

Ή ισοδύναμα:

$$S_B = \frac{3}{2} V_{B(qd0)} \times I_{B(qd0)}$$

Θεωρώντας ως βασική ροπή :

$$T_B = \frac{p}{2} \times \frac{S_B}{\omega_b}$$

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή σε per unit τιμές ισούται με:

$$T_e = \psi_{ds} \times i_{qs} - \psi_{qs} \times i_{ds}$$

Η ενεργός και η άεργος ισχύς δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$P = \frac{3}{2} \times (\mathbf{u}_d \times \mathbf{i}_d + \mathbf{u}_q \times \mathbf{i}_q)$$

$$Q = \frac{3}{2} \times (\mathbf{u}_q \times \mathbf{i}_q - \mathbf{u}_d \times \mathbf{i}_d)$$

Σε per unit τιμές τα παρακάτω μεγέθη ισούται με:

$$P = \mathbf{u}_d \times \mathbf{i}_d + \mathbf{u}_q \times \mathbf{i}_q$$

$$Q = \mathbf{u}_q \times \mathbf{i}_q - \mathbf{u}_d \times \mathbf{i}_d$$

Η εξίσωση της κίνησης του μηχανικού μέρους της μηχανής γράφεται:

$$T_m - T_e = j \frac{d\omega_m}{dt} = j \left(\frac{2}{p}\right) \times \frac{d\omega_m}{dt}$$

Όπου: ω_m : η μηχανική γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα

ω_e : η αντίστοιχη ηλεκτρική ταχύτητα (σε rad/sec)

j : η ροπή αδράνειας (σε Kg*m²) του στρεφόμενου μηχανικού μέρους της

διάταξης.

Η ανηγμένη σταθερά αδράνειας σε sec ορίζεται ως:

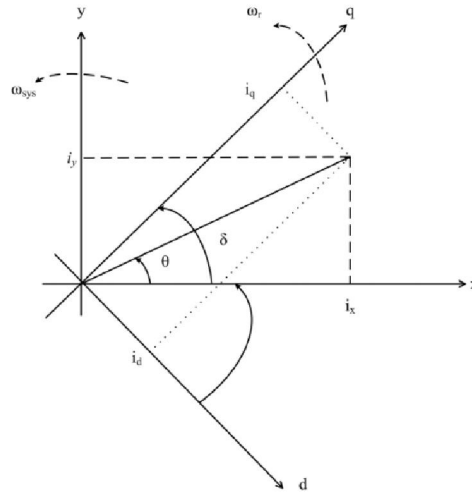
$$H = \left(\frac{1}{2}\right) \times \left(\frac{2}{p}\right)^2 \times \frac{j\omega_b^2}{S_B} = \left(\frac{1}{2}\right) \times \left(\frac{2}{P}\right) \times \frac{d\omega_b}{T_B}$$

Συνεπώς λύνοντας ως προς j έχουμε:

$$T_m - T_e = 2H \frac{d\omega_e}{dt}$$

3.2.4. Σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς.

Σε ένα σύστημα με πολλές μηχανές είναι αναγκαίο να οριστεί ένα κοινό ορθογώνιο πλαίσιο αναφοράς, το οποίο θα περιστρέφεται με τη γωνιακή ταχύτητα του συστήματος ω_{sys} . Το κοινό αυτό πλαίσιο αναφοράς αναφέρεται σαν χγ πλαίσιο αναφοράς. Στο 3.5 φαίνεται το σύγχρονο χγ πλαίσιο αναφοράς του συστήματος, καθώς επίσης και το dq πλαίσιο αναφοράς του δρομέα μιας σύγχρονης γεννήτριας, του οποίου ο άξονας x θεωρείται ότι αποτελεί τον άξονα αναφοράς όλων των γωνιών, ενώ ο άξονας γ προπορεύεται κατά 90⁰



Σχήμα 3.11 Ορθογώνιο πλαίσιο αναφοράς συστήματος και σύγχρονης μηχανής.

Η δυναμική απόκριση της γωνίας δ μίας σύγχρονης μηχανής περιγράφεται από τη διαφορική σχέση:

$$\dot{\delta} = \omega_r - \omega_{sys}$$

Στο σύγχρονο xy πλαίσιο αναφοράς, κάθε εναλλασσόμενο μέγεθος παριστάνεται σαν μιγαδικός αριθμός όπως για παράδειγμα, το ρεύμα στο στάτη I_s .

$$\hat{I}_s = i_x + ji_y$$

ή η τερματική τάση V_t της σύγχρονης γεννήτριας:

$$\hat{V}_t = u_x + ju_y$$

Ο μετασχηματισμός του ρεύματος στάτη I_s από το dq πλαίσιο της σύγχρονης γεννήτριας στο σύγχρονο xy πλαίσιο αναφοράς, παριστάνεται από την ακόλουθη μητρική σχέση, όπου ο πίνακας T ονομάζεται πίνακας μετασχηματισμού.

$$\begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \delta & \cos \delta \\ -\cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}$$

Η ανά μονάδα φαινόμενη ισχύς S_G , που παράγεται από τη σύγχρονη μηχανή είναι:

$$S_G = P_G + jQ_G = \hat{V}_t \times \hat{I}_s^*$$

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη του στάτη με την παράσταση τους στο σύγχρονο xy πλαίσιο αναφοράς του συστήματος προκύπτει:

$$S_G = (u_x + ju_y) \times (i_x + ji_y)^* = (u_x \times i_x + u_y \times i_y) + (ju_y \times i_x - u_x \times i_y)$$

Δηλαδή ισοδύναμα:

$$P_G = u_x \times i_x + u_y \times i_y$$

$$Q_G = u_y \times i_x - u_x \times i_y$$

3.3. Κατάταξη των Α/Γ.

Οι δύο χρησιμοποιούμενοι τύποι Α/Γ είναι οι εξής:

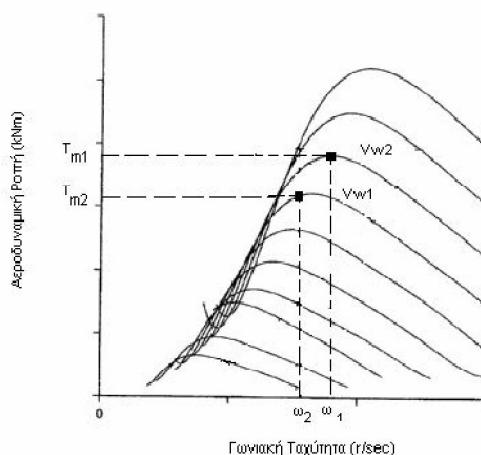
- ✓ Α/Γ σταθερών στροφών ή σταθερής ταχύτητας (fixed speed),
- ✓ Α/Γ μεταβλητών στροφών (Variable speed)

3.3.1. Αρχή και πλεονεκτήματα από τη λειτουργία μεταβλητών στροφών

Οι συμβατικές Α/Γ σταθερών στροφών σταθερής συχνότητας (Α/Γ-ΣΣΣΣ.), που αποτελούσαν την πλειοψηφία των εν λειτουργία μηχανών διαθέτουν επαγωγικές γεννήτριες τύπου κλωβού (συνήθως δύο, με τη μικρότερη να χρησιμοποιείται στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου για μείωση των απωλειών), οι οποίες συνδέονται απ' ευθείας στο δίκτυο σταθερής συχνότητας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ταχύτητα του δρομέα να είναι πρακτικά σταθερή. Το σύστημα αυτό παρουσιάζει το πλεονέκτημα της εξαιρετικής απλότητας και αξιοπιστίας και των μηδενικών αναγκών συντήρησης, γεγονός που συνέβαλλε στην καθιέρωσή του, σε μια εποχή όπου η αξιοπιστία ήταν το βασικότερο πρόβλημα των Α/Γ. Ταυτόχρονα, το σχήμα αυτό εμφανίζει καθοριστικά μειονεκτήματα τα οποία σχετίζονται με τη σταθερότητα των στροφών και με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της επαγωγικής μηχανής. Τα σημαντικότερα είναι η αυξημένη μεταβλητότητα των ροπών και της ισχύος εξόδου, η αδυναμία απόσβεσης των ταλαντώσεων του μηχανικού συστήματος, ο χαμηλός συντελεστής ισχύος εξόδου και τα μεταβατικά φαινόμενα εκκίνησης της επαγωγικής γεννήτριας[15].

Ριζική λύση σε πολλά από τα παραπάνω προβλήματα μπορεί να δώσει η λειτουργία μεταβλητών στροφών (ΛΜΣ), όπου η ταχύτητα του δρομέα της Α/Γ μεταβάλλεται κατά ελεγχόμενο τρόπο, ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Έτσι έχουμε τις ανεμογεννήτριες Μεταβλητών Στροφών Σταθερής Συχνότητας (ΜΣΣΣ). Έχουν χρησιμοποιηθεί υδραυλικά συστήματα ή κιβώτια ταχυτήτων μεταβαλλόμενου λόγου, αλλά ο πλέον κατάλληλος τρόπος είναι η χρήση μετατροπέων συχνότητας για τη σύνδεση της ηλεκτρικής γεννήτριας στο δίκτυο. Με τον τρόπο αυτό ή ταχύτητα περιστροφής αποδεδειγμένα από τη σταθερή συχνότητα του δικτύου και είναι δυνατή η μεταβολή της εντός ευρέων ορίων. Ο βασικός λόγος που οδήγησε στην εισαγωγή της ΛΜΣ είναι η βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης της μηχανής, η οποία καθορίζεται από τα αεροδυναμικά του δρομέα. Στο σχήμα 4.4 εμφανίζεται η τυπική μορφή των καμπυλών της αεροδυναμικής ροπής του δρομέα της Α/Γ συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του, με παράμετρο την ταχύτητα του ανέμου. Διαπιστώνεται ότι η μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης της Α/Γ απαιτεί τη μεταβολή της ταχύτητας του δρομέα ανάλογα προς την ταχύτητα του ανέμου ώστε να επιτυγχάνεται

η λειτουργία στην κορυφή των αντίστοιχων καμπυλών, δηλαδή υπό βέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος. Η λειτουργία σταθερών στροφών της Α/Γ στην ταχύτητα ω_1 , που αντιστοιχεί στη βέλτιστη απόδοση T_{m1} για ταχύτητα ανέμου 12 m/s στο σχήμα 3.1, έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική απώλεια ισχύος σε μικρότερες ταχύτητες, όπου η μηχανή λειτουργεί το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου. Για μικρότερες ταχύτητες ανέμου, η καμπύλη μέγιστης αεροδυναμικής ροπής του ανεμοκινητήρα θα βρίσκεται αριστερά της τιμής της που αντιστοιχεί στην ίδια ταχύτητα ω_1 . Αυτό σημαίνει ότι η αεροδυναμική ροπή του δρομέα δεν θα είναι η μέγιστη δυνατή για τη συγκεκριμένη ταχύτητα του ανέμου. Αντίθετα, αν με την ελάττωση του ανέμου, είχε πραγματοποιηθεί και ελάττωση της ταχύτητας του δρομέα σε κατάλληλη τιμή ω_2 θα ήταν δυνατή η μεγιστοποίηση και πάλι της ροπής στον άξονα του δρομέα σε μια νέα τιμή T_{m2} .



Σχήμα 3.12 Λειτουργία μεταβλητών στροφών με παράμετρο την ταχύτητα του ανέμου

Η αύξηση της απόδοσης πάντως σε σχέση με τη ΛΣΣ είναι πολύ μικρότερη της αναμενόμενης από τις στατικές καμπύλες ισχύος, διότι σε δυναμικές συνθήκες ο δρομέας λόγω αδράνειας μπορεί να παρακολουθεί μόνο τις αργές μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου και άρα βρίσκεται συνεχώς σε μη-βέλτιστη κατάσταση λειτουργίας. Σε υψηλές ταχύτητες ανέμου, όπου η αεροδυναμική ισχύς και ροπή έχουν φθάσει τις ονομαστικές τους τιμές, η ταχύτητα του δρομέα διατηρείται γενικά σταθερή στη μέγιστη τιμή της. Σε αυτήν την περιοχή ο περιορισμός της ισχύος του δρομέα πραγματοποιείται σήμερα γενικά από το σύστημα μεταβολής της κλίσης των πτερυγίων (pitch control).

Το βασικότερο πλεονέκτημα από τη ΛΜΣ είναι η σημαντική αύξηση της εξομάλυνσης της μεταβλητότητας των μηχανικών ροπών, η απόσβεση των στρεπτικών συντονισμών του μηχανικού συστήματος μετάδοσης της κίνησης και ο περιορισμός των αιχμών της ροπής p_{ch} για ριπές του ανέμου. Άμεση συνέπεια των παραπάνω είναι ο περιορισμός των καταπονήσεων και άρα η αύξηση της αναμενόμενης διάρκειας ζωής των μηχανικών συνιστωσών και η δυνατότητα μείωσης του μεγέθους τους, του βάρους και του κόστους κατασκευής.

Η εξομάλυνση των ροπών έχει θετική επίπτωση στην ποιότητα της παραγόμενης ισχύος, η οποία εμφανίζει σημαντική μείωση της μεταβλητότητας της σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό των διαταραχών της συχνότητας από τη σύνδεση σε αυτόνομα συστήματα καθώς και τη μείωση των διακυμάνσεων της

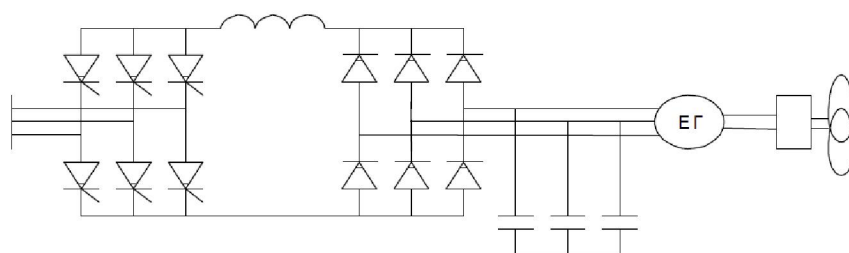
τάσης που αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα στην περίπτωση των ασθενών δικτύων. Ταυτόχρονα παρέχεται η δυνατότητα της ελεγχόμενης μεταβολής (μείωσης) της παραγόμενης ισχύος, εάν αυτό είναι επιθυμητό, πχ προκειμένου να αποφευχθεί η αποσύνδεση της Α/Γ λόγω χαμηλού φορτίου.

Άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα είναι τα χαμηλότερα επίπεδα θορύβου, λόγω λειτουργίας σε μειωμένες στροφές και η διευκόλυνση των διαδικασιών εκκίνησης. Η λειτουργία της Α/Γ σε μειωμένη ταχύτητα έχει ως αποτέλεσμα και τη μείωση των απωλειών ισχύος του συστήματος μετάδοσης της κίνησης, η οποία όμως αντισταθμίζεται από τις απώλειες του μετατροπέα ισχύος ο οποίος στη ΛΜΣ είναι απαραίτητος.

Το βασικότερο μειονέκτημα είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα και το κόστος λόγω κυρίως του μετατροπέα ισχύος. Ένα άλλο μειονέκτημα της λειτουργίας μεταβλητών στροφών σχετίζεται με το γεγονός ότι οι αρμονικές της αεροδυναμικής ροπής σε πολλαπλάσια της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων αφού η ταχύτητα είναι μεταβαλλόμενη και άρα είναι πιθανή η διέγερση ιδιοσυχνοτήτων της μηχανής, γεγονός που απαιτεί προσοχή κατά τη σχεδίαση της μηχανής. Επίσης η εμφάνιση των μετατροπέων έχει ως αποτέλεσμα την αρμονική παραμόρφωση των ρευμάτων της γεννήτριας και την έγχυση αρμονικών στο δίκτυο απαιτώντας την εγκατάσταση ειδικών φίλτρων στην έξοδο της μηχανής[15].

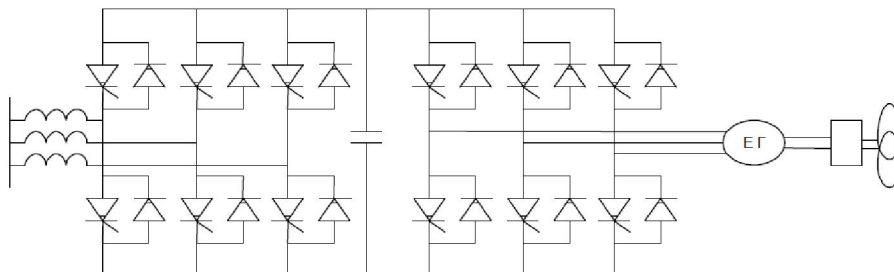
3.4.Εναλλακτικές διατάξεις του ηλεκτρικού μέρους.

Οι ονομαστικές ισχείς των μηχανών που προορίζονται για λειτουργία σε δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας κυμαίνονται μεταξύ μερικών εκατοντάδων kW έως κάποια MW (περίπου 5 MW για τις Α/Γ που αυτή τη στιγμή βρίσκονται στο στάδιο των δοκιμών). Το ηλεκτρικό μέρος αυτού του μεγέθους Α/Γ μπορεί κατ' αρχήν να περιλαμβάνει οποιοδήποτε συνδυασμό ηλεκτρικής μηχανής εναλλασσόμενου ρεύματος και συστήματος μετατροπέων ισχύος, ο οποίος εξασφαλίζει λειτουργία γεννήτριας και είναι διαθέσιμος στα παραπάνω επίπεδα ισχύος. Η μηχανή συνεχούς ρεύματος δε χρησιμοποιείται λόγω πολυπλοκότητας, αυξημένης συντήρησης, βάρους και κόστους. Στο Σχήμα 3.13 εμφανίζεται η απλούστερη δυνατή διάταξη ανεμογεννήτριας με χρήση ασύγχρονης μηχανής. Η αυτοδιέγερση της επαγωγικής μηχανής πραγματοποιείται μέσω συστοιχίας πυκνωτών. Στους ακροδέκτες της μηχανής υπάρχει μη ελεγχόμενος ανορθωτής με διόδους ενώ στην πλευρά του δικτύου υπάρχει 6-παλμικός αντιστροφέας με θυρίστορ και μεταγωγή από την τάση του δικτύου[18,19].



Σχήμα 3.13. Ανεμογεννήτρια ΜΣΣΣ με ασύγχρονη μηχανή και διάταξη ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ στο στάτη.

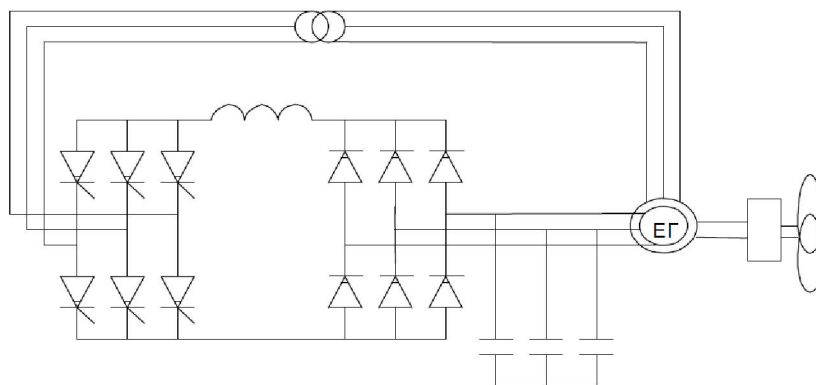
Κύριο πλεονέκτημα αυτής της διάταξης είναι βέβαια το χαμηλό κόστος και η απλή κατασκευή του ανορθωτή. Η διάταξη αυτή όμως δεν χρησιμοποιείται λόγω των προβλημάτων που προκαλεί η αυτοδιέγερση των πυκνωτών (π.χ. ανεπιθύμητοι συντονισμοί κυρίως σε χαμηλές συχνότητες λόγω της βηματικής μεταβολής της χωρητικότητας [13]. Στο Σχήμα 3.14 εμφανίζεται μία διάταξη η οποία έχει εφαρμοσθεί σε ανεμογεννήτρια λόγω των πολύ καλών λειτουργικών και δυναμικών της χαρακτηριστικών.



Σχήμα 3.14. Ανεμογεννήτρια ΜΣΣΣ με ασύγχρονη γεννήτρια και διάταξη EP/SP/EP με δύο ελεγχόμενους μετατροπείς στο στάτη.

Στη διάταξη αυτή χρησιμοποιούνται δύο όμοιοι μετατροπείς πηγής τάσης, τόσο στην πλευρά της γεννήτριας όσο και στην έξοδο του συστήματος προς το δίκτυο. Η χρήση μετατροπέα πηγής τάσης στην έξοδο του συστήματος εξασφαλίζει τη δυνατότητα ροής ισχύος και προς τις δύο κατευθύνσεις, ελαχιστοποιεί την παραμόρφωση του ρεύματος εξόδου και επιτρέπει τον έλεγχο της αέργου ισχύος της διάταξης. Ο μετατροπέας από την πλευρά της γεννήτριας, αντί απλού ανορθωτή, περιορίζει τις αρμονικές των ρευμάτων και ομαλοποιεί σημαντικά τη ροπή της μηχανής με την παλμοδότηση, η οποία βασίζεται στις μεθόδους του διανυσματικού ελέγχου για βελτίωση της δυναμικής απόκρισης της μηχανής.

Σημαντικότερο μειονέκτημα της διάταξης αυτής είναι η πολυπλοκότητα σε υλικό (hardware) και σε λογισμικό (software) και το πολύ υψηλό κόστος. Όπως γίνεται προφανές και από το παραπάνω σχήμα, το σύνολο της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος πρέπει να περάσει στο δίκτυο διαμέσω των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος. Συνεπώς, η ονομαστική τιμή των μετατροπέων θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας, με προφανείς επιπτώσεις στο κόστος, την πολυπλοκότητα και τις ανάγκες συντήρησης. Για τους λόγους αυτούς η χρήση της διάταξης αυτής δεν έχει ευρεία εφαρμογή στους κατασκευαστές ανεμογεννητριών. Στο Σχήμα 3.15 απεικονίζεται η διάταξη με χρήση ασύγχρονης μηχανής με τυλίγμα στο δρομέα και σύστημα μετατροπέων συνδεδεμένων στα άκρα του [13,17]. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα του συστήματος αυτού είναι η σημαντικά μειωμένη ισχύς των μετατροπέων, οι οποίοι ελέγχουν μόνο την ολίσθηση του δρομέα. Στην απλούστερη μορφή της η διάταξη αυτή αποτελείται από έναν απλό ανορθωτή με διόδους στην πλευρά του τυλίγματος του δρομέα και μετατροπέα πηγής ρεύματος στην έξοδο, όπως δείχνεται και στο σχήμα. Το σχήμα αυτό είναι απλό, αξιόπιστο και με πολύ χαμηλό κόστος και έτσι είναι αρκετά ελκυστικό για εφαρμογή σε ανεμογεννήτρια. Παρ' όλα αυτά εμφανίζονται σημαντικές αρμονικές παραμορφώσεις των ρευμάτων και της ροπής της μηχανής, μειονεκτήματα τα οποία μπορούν να ελαττωθούν σημαντικά με τη χρήση διπλών μετατροπέων διαμόρφωσης πλάτους παλμών (PWM).

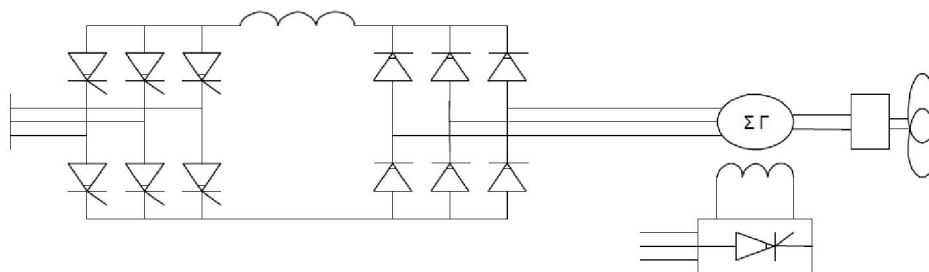


Σχήμα 3.15. Ανεμογεννήτρια ΜΣΣΣ με ασύγχρονη γεννήτρια και μετατροπέα ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ στο δρομέα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι με τη μείωση του κόστους και την αύξηση της ικανότητας διαχείρισης ισχύος μοντέρνων ημιαγωγών ισχύος όπως τα Gate Turn-Off (GTO) thyristors, τα MOSFETs και τα Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBTs), έχουν δημιουργηθεί και χρησιμοποιούνται διατάξεις με μεγαλύτερες δυνατότητες ελέγχου και βελτιωμένα λειτουργικά χαρακτηριστικά.

3.4.1. Χρήση της σύγχρονης γεννήτριας

Το βασικό μειονέκτημα των διατάξεων με την επαγωγική γεννήτρια τύπου κλωβού είναι το γεγονός ότι απαιτείται η δυνατότητα παραγωγής αέργου ισχύος για τη μαγνήτιση της μηχανής. Στο Σχήμα 3.16 απεικονίζεται η απλούστερη δυνατή διάταξη που χρησιμοποιεί σύγχρονη γεννήτρια και ανορθωτή στους ακροδέκτες της και συμβατικό μετατροπέα με θυρίστορ στην πλευρά του δικτύου η οποία έχει χρησιμοποιηθεί σε μεγάλες πρωτότυπες μηχανές.

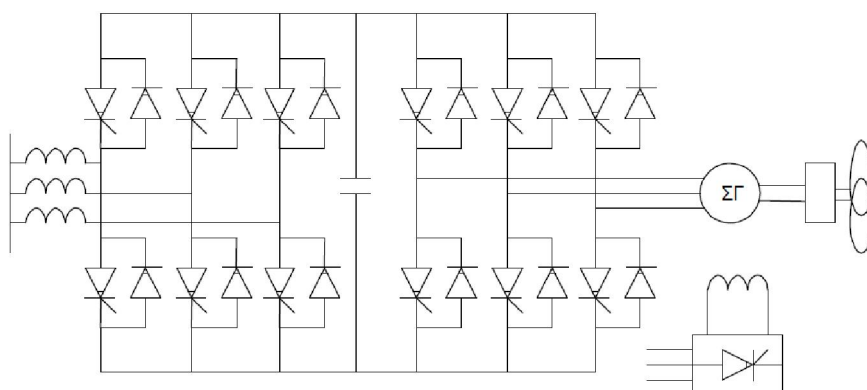


Σχήμα 3.16. Ανεμογεννήτρια ΜΣΣΣ με σύγχρονη μηχανή και διάταξη ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ με ανορθωτή με διόδους στο στάτη.

Η σύγχρονη γεννήτρια προσφέρει τη δυνατότητα κατασκευής και ρύθμισης του μαγνητικού της πεδίου μέσω του κυκλώματος του δρομέα και απορροφώντας μία ελάχιστη ενεργό ισχύ από το δίκτυο κατά τη διαδικασία της εκκίνησης της μηχανής. Με τη δυνατότητα ρύθμισης του πεδίου μπορεί να λειτουργήσει υπό μοναδιαίο, επαγωγικό ή και χωρητικό συντελεστή ισχύος στους ακροδέκτες της ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του δικτύου στο οποίο συνδέεται, καθιστώντας δυνατή τη χρήση απλών μετατροπέων φυσικής μετάβασης χωρίς

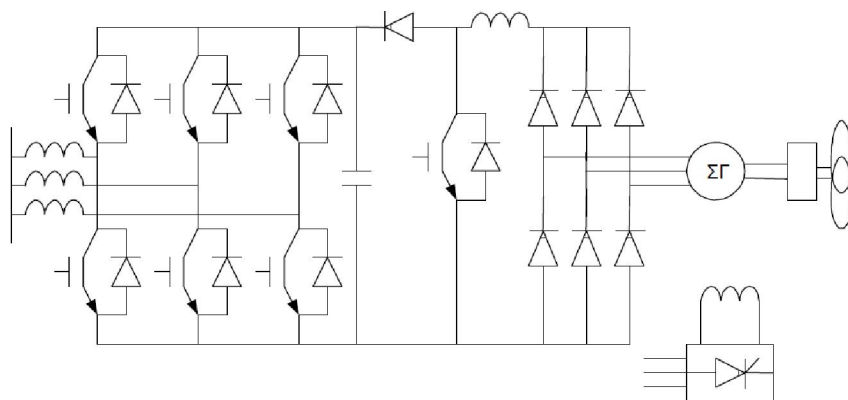
να είναι αναγκαία η εγκατάσταση πυκνωτών. Αυτό είναι και το σημαντικότερο πλεονέκτημα των διατάξεων με χρήση της σύγχρονης γεννήτριας. Σήμερα πλέον το κόστος της σύγχρονης γεννήτριας με ανορθωτή καθίσταται συγκρίσιμο με αυτό των διατάξεων με χρήση της επαγωγικής μηχανής.

Η διάταξη του Σχήματος 3.16 πέρα από την απλότητα της κατασκευής και το σχετικά χαμηλό κόστος δεν εμφανίζει κάποιο άλλο πλεονέκτημα. Τα μειονεκτήματα είναι αρκετά, όπως αυξημένη παρουσία αρμονικών στο ρεύμα εξόδου και στη ροπή της μηχανής, μη δυνατότητα ελέγχου της συνεχούς τάσης της διασύνδεσης ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ και φυσικά όσον αφορά τη χρήση της σύγχρονης γεννήτριας αυξημένο κόστος κατασκευής – αγοράς αλλά και συντήρησης στη συνέχεια. Μία διάταξη η οποία μπορεί να ελαττώσει σημαντικά τις αρμονικές αλλά και να προσφέρει τη δυνατότητα ελέγχου της συνεχούς τάσης της διασύνδεσης ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ προκύπτει με την αντικατάσταση του απλού ανορθωτή από μετατροπέα με θυρίστορ. Η διάταξη αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 3.17 και είναι αντίστοιχη της διάταξης του σχήματος 3.14 όπως παρουσιάσθηκε στην προηγούμενη παράγραφο με χρήση της επαγωγικής μηχανής τύπου κλωβού.



Σχήμα 3.17. Ανεμογεννήτρια ΜΣΣΣ με σύγχρονη μηχανή και διάταξη ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ με δύο μετατροπείς με ελεγχόμενα στοιχεία στο στάτη.

Με τη διάταξη αυτή, αν και συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των δύο μετατροπέων πηγής τάσης και της σύγχρονης γεννήτριας, αυξάνεται σημαντικά το κόστος της όλης κατασκευής. Η λύση η οποία μπορεί να διατηρήσει το κόστος σε χαμηλότερο επίπεδο διατηρώντας το συνδυασμό σύγχρονης γεννήτριας – ανορθωτή με ταυτόχρονη εύκολη σύνδεση με το δίκτυο, αλλά προσφέροντας και τη δυνατότητα ελέγχου της συνεχούς τάσης της διασύνδεσης ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ είναι η διάταξη η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 3.18. Στο σχήμα αυτό χρησιμοποιείται μετατροπέας πηγής τάσης με IGBT στην πλευρά του δικτύου ενώ στην πλευρά της γεννήτριας διατηρείται η παρουσία μόνο ενός απλού ανορθωτή ελαττώνοντας με αυτόν τον τρόπο το συνολικό κόστος και παράλληλα αυξάνοντας ίσως και την αξιοπιστία του συστήματος αφού είναι γνωστό ότι η παρουσία λιγότερων ηλεκτρονικών στοιχείων συμβάλλει στον τομέα αυτόν. Επίσης δίνεται η δυνατότητα ελέγχου της συνεχούς τάσης στην είσοδο του αντιστροφέα μέσω του ανυψωτή τάσης (boost converter).



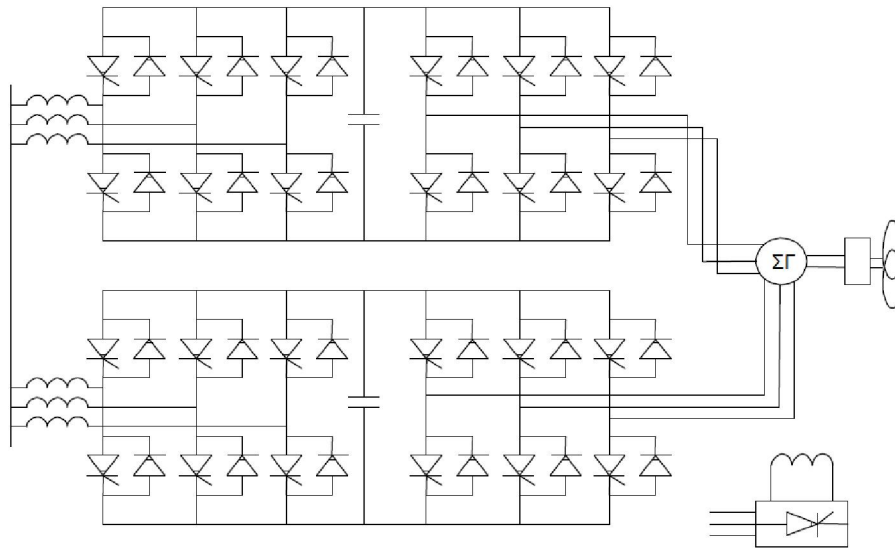
Σχήμα 3.18. Ανεμογεννήτρια ΜΣΣΣ με σύγχρονη μηχανή και διάταξη ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ με ανορθωτή με διόδους και ανυψωτή τάσης στο στάτη.

Ένα άλλο πολύ σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης της σύγχρονης γεννήτριας σε συνδυασμό με τις παραπάνω διατάξεις, που ουσιαστικά την αποδεσμεύουν από το δίκτυο, είναι το γεγονός ότι μπορεί να λειτουργήσει σε οποιονδήποτε αριθμό στροφών ακόμα και σε αρκετά μικρό. Αυτή η ιδιότητα της επιτρέπει πολύ εύκολα να στρέφεται με τις ίδιες στροφές με τον ανεμοκινητήρα και να παράγει εύκολα ηλεκτρική ισχύ χαμηλής συχνότητας, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε αυτήν του δικτύου από τον αντιστροφέα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απάλειψη του κιβωτίου ταχυτήτων από το μηχανικό σύστημα μετάδοσης της κίνησης της ανεμογεννήτριας, επιτυγχάνοντας έτσι μείωση του συνολικού βάρους, του κόστους και της συντήρησης, βελτίωση της αξιοπιστίας, απάλειψη των προβλημάτων ευθυγράμμισης με το δρομέα αλλά και το σημαντικότερο ίσως ελάττωση του θορύβου που αποτελεί το σημαντικότερο μειονέκτημα ανάπτυξης και ευρείας χρήσης των αιολικών συστημάτων.

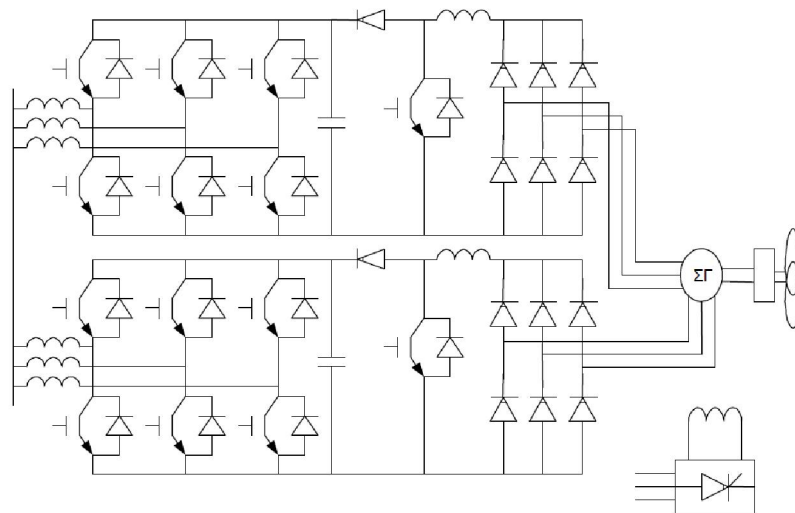
3.4.2. Η εξαφασική σύγχρονη γεννήτρια.

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, ο ανεμοκινητήρας αποδίδει τη μέγιστη ισχύ από τον άνεμο όταν αποκτά μία συγκεκριμένη ταχύτητα ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου (λειτουργία μεταβλητών στροφών). Αναφέρθηκε επίσης στην προηγούμενη παράγραφο ότι η σύγχρονη γεννήτρια μπορεί να χρησιμοποιηθεί σχετικά εύκολα σε λειτουργία μεταβλητών στροφών και μάλιστα χαμηλών τιμών. Το σχήμα: «σύγχρονη γεννήτρια άμεσα συνδεδεμένη με τον άξονα του ανεμοκινητήρα» φαίνεται να ικανοποιεί την απαίτηση για απορρόφηση μέγιστης ισχύος από τον άνεμο με τρόπο ικανοποιητικό όσον αφορά τη λειτουργία της σύγχρονης μηχανής. Παρ' όλα αυτά, όταν η σύγχρονη μηχανή οδηγείται σε λειτουργία χαμηλών και μεταβλητών στροφών είναι αναπόφευκτη η εμφάνιση ταλαντώσεων της ηλεκτρομαγνητικής ροπής της μηχανής (οποίος συγκρίνει συνεχώς την ισχύ κάθε τυλίγματος και στην περίπτωση που αυτές διαφέρουν μεταξύ τους διακόπτει αμέσως τη λειτουργία της μηχανής). Η κατασκευή αυτή του συνολικού τυλίγματος του στάτη επιφέρει την απαλοιφή κάποιων ανώτερων αρμονικών στην ηλεκτρομαγνητική ροπή της μηχανής με αποτέλεσμα την ομαλοποίησή της και κατά συνέπεια την ποιοτικότερη ισχύ στην έξοδο. Η μηχανή αυτής της κατασκευής έχει καθιερωθεί με την ονομασία «εξαφασική σύγχρονη μηχανή». Στην προηγούμενη παράγραφο περιγράφηκαν όλες οι διατάξεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα

σχήματα με σύγχρονη μηχανή. Ακόμα σε άλλη περίπτωση η μηχανή μπορεί να αποτελείται από δύο τριφασικά τυλίγματα στον στάτη και όχι από ένα. Συνεπώς το κάθε ένα από τα δύο τυλίγματα είναι συνδεδεμένο στο δικό του ζεύγος μετατροπέων. Με άλλα λόγια υπάρχουν δύο διασυνδέσεις συνεχούς ρεύματος στο στάτη της γεννήτριας. Στα Σχήματα 3.19, 3.20 που ακολουθούν απεικονίζονται τα δύο επικρατέστερα ηλεκτρικά σχήματα όπως περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο με εφαρμογή στην εξαφασική μηχανή.



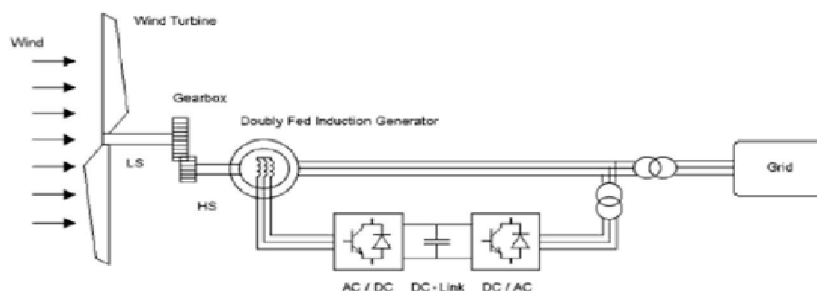
Σχήμα 3.19. Ανεμογεννήτρια ΜΣΣΣ με εξαφασική σύγχρονη μηχανή και διάταξη EP/SP/EP σε κάθε τύλιγμα του στάτη αποτελούμενη από δύο ελεγχόμενους μετατροπείς.



Σχήμα 3.20. Ανεμογεννήτρια ΜΣΣΣ με εξαφασική σύγχρονη μηχανή και διάταξη EP/SP/EP σε κάθε τύλιγμα του στάτη αποτελούμενη από ανορθωτή με διόδους, ανυψωτή τάσης και αντιστροφέα με IGBT.

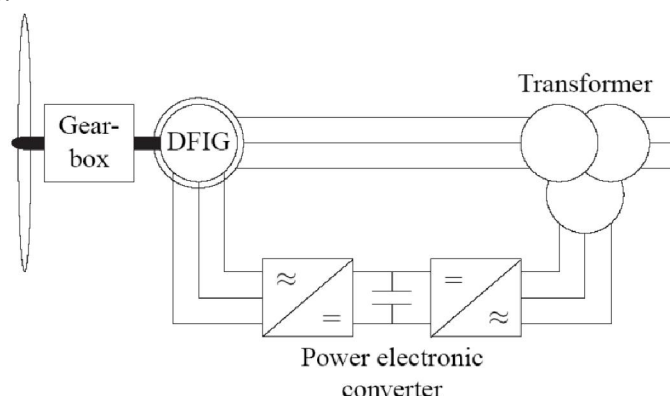
3.5. Ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας με ΓΕΔΤ (DFIG).

Η γεννήτρια διπλής τροφοδότησης κερδίζει συνεχώς έδαφος στη σημερινή αγορά. Αποτελείται από μια γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα με τα τυλίγματα του στάτη απευθείας συνδεδεμένα στο δίκτυο ΕΡ και τα τυλίγματα του ρότορα συνδεδεμένα σε μια διάταξη διασύνδεσης Εναλλασσόμενου Ρεύματος /Συνεχούς Ρεύματος /Εναλλασσόμενου Ρεύματος (ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ) με μετατροπείς πηγής τάσης. Ο όρος «διπλής τροφοδότησης» αναφέρεται στο γεγονός ότι η τάση στο στάτη εφαρμόζεται από το δίκτυο και η τάση στο ρότορα εφαρμόζεται από τον μετατροπέα ισχύος. Ο μετατροπέας αντισταθμίζει τη διαφορά ανάμεσα στη μηχανική και την ηλεκτρική συχνότητα εκχύοντας στο ρότορα ένα ρεύμα με μεταβλητή συχνότητα. Έτσι, κατά την κανονική λειτουργία αλλά και κατά τη διάρκεια σφαλμάτων, η συμπεριφορά της γεννήτριας ελέγχεται από τον μετατροπέα ισχύος και τους ελεγκτές του. Η διάταξη των μετατροπέων αποτελείται από δύο μετατροπείς πηγής τάσης, ο ένας στην πλευρά του ρότορα και ο άλλος στην πλευρά του δικτύου, οι οποίοι ελέγχονται ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο. Ο μετατροπέας που βρίσκεται στην πλευρά του ρότορα ελέγχει την πραγματική και την άεργο ισχύ ελέγχοντας τις συνιστώσες του ρεύματος του ρότορα, ενώ ο μετατροπέας από την πλευρά του δικτύου ελέγχει την τάση ΣΡ ώστε η άεργος ισχύς που απορροφάται από το δίκτυο να είναι ίση με μηδέν. Ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας στο σύστημα οδήγησης, η ισχύς τροφοδοτείται στο ρότορα ή απορροφάται από αυτόν. Σε μια υπέρ-σύγχρονη κατάσταση λειτουργίας, η ισχύς οδηγείται από το ρότορα μέσω του μετατροπέα στο δίκτυο, ενώ στην υπο-σύγχρονη κατάσταση λειτουργίας η κατεύθυνση της ισχύος είναι από το δίκτυο προς το ρότορα. Και στις δύο καταστάσεις ο στάτης τροφοδοτεί με ενέργεια το δίκτυο. Η γεννήτρια διπλής τροφοδότησης παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα. Έχει την ιδιότητα να ελέγχει ανεξάρτητα την πραγματική από την άεργο ισχύ μέσω του ρεύματος στο ρότορα. Δεν είναι αναγκαίο να μαγνητιστεί από το δίκτυο, καθώς μπορεί να μαγνητιστεί και από το δίκτυο του ρότορα. Έχει επίσης την ικανότητα να παράγει άεργο ισχύ, η οποία τροφοδοτείται στο δίκτυο μέσω του μετατροπέα που βρίσκεται προς την πλευρά του δικτύου. Παρόλα αυτά αυτός ο μετατροπέας υπό κανονικές συνθήκες λειτουργεί υπό μοναδιαίο συντελεστή ισχύος και δεν εμπλέκεται σε ανταλλαγή άεργου ισχύος ανάμεσα στην ανεμογεννήτρια και το δίκτυο. Στην περίπτωση που το δίκτυο είναι ασθενές με διακυμάνσεις στην τάση, η γεννήτρια διπλής τροφοδότησης μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να παράγει ή να καταναλώνει ένα ποσό άεργου ισχύος με σκοπό τον έλεγχο της τάσης [14,15].



Σχήμα 3.21 Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης.

Πιο αναλυτικά, για συστήματα μεταβλητής ταχύτητας με περιορισμένο εύρος (για παράδειγμα 30 % της σύγχρονης ταχύτητας) η ΓΕΔΤ μπορεί να είναι μια ενδιαφέρουσα λύση. Όπως προαναφέρθηκε νωρίτερα ο λόγος για αυτό είναι ότι ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος έχει μόνο να χειριστεί ένα μέρος (20-30%) της συνολικής ισχύος. Αυτό σημαίνει ότι οι απώλειες στον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος μπορούν να μειωθούν έναντι ενός συστήματος όπου ο μετατροπέας πρέπει να χειριστεί τη ολική ισχύ. Επιπλέον, το κόστος του μετατροπέα γίνεται χαμηλότερο. Το κύκλωμα του στάτη της ΓΕΔΤ συνδέεται με το δίκτυο ενώ το κύκλωμα του δρομέα συνδέεται με έναν μετατροπέα μέσω των δαχτυλιδιών ολίσθησης. Ο μετατροπέας που συνδέεται μεταξύ δρομέα και τερματικό ζυγό της Α/Γ αποτελείται από δύο μετατροπείς, δηλ. το μετατροπέα στην πλευρά της μηχανής και το μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου, οι οποίοι συνδέονται μέσω της dc πλευράς τους. Στη διεθνή βιβλιογραφία το σχήμα αυτό των μετατροπέων είναι γνωστό ως back to back. Μια πιο λεπτομερής εικόνα του συστήματος της ΓΕΔΤ με back-to-back μετατροπείς φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 3.22 Σύστημα επαγωγικής γεννήτριας διπλής εξόδου.

Ο back to back μετατροπέας αποτελείται από δύο μετατροπείς :έναν μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου (grid side converter) και έναν στην πλευρά του δρομέα (rotor side converter),οι οποίοι συνδέονται back to back. Μεταξύ των δύο μετατροπέων τοποθετείται ένας DC-link πυκνωτής, σαν αποθήκη ενέργειας, με στόχο να διατηρεί μικρές τις διακυμάνσεις (ή τον κυματισμό) της DC-link τάσης. Με τον μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα είναι δυνατό να ελεγχθεί η ροπή ή η ταχύτητα της ΓΕ/Τ και επίσης ο συντελεστής ισχύος στα τερματικά του στάτη, ενώ ο κύριος στόχος του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου (στάτη) είναι να κρατήσει την DC-link τάση σταθερή. Μια συνήθης εφαρμογή για ΓΕΔΤ είναι οι Α/Γ καθώς αυτές λειτουργούν σε ένα περιορισμένο εύρος ταχύτητας περίπου $\pm 30\%$. Άλλες εφαρμογές ,πέρα από Α/Γ, είναι για παράδειγμα αυτόνομα συστήματα diesel συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, στρεφόμενοι μετατροπείς που τροφοδοτούν ένα δίκτυο σιδηροδρόμων από ένα δίκτυο σταθερής συχνότητας.

3.6 Περίληψη-Συμπεράσματα.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε το μαθηματικό μοντέλο των ασύγχρονων, σύγχρονων και διπλής τροφοδότησης μηχανών. Επιπλέον, περιγράφηκαν οι δύο βασικές μεθόδους λειτουργίας των συστημάτων μετατροπής της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική, τη μέθοδο λειτουργίας σταθερής ταχύτητας (fixed speed) και τη μέθοδο λειτουργίας μεταβλητής ταχύτητας (variable speed). Ωστόσο η λειτουργία της ανεμογεννήτριας υπό μεταβλητές στροφές παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα αφού, επιτρέπει την λειτουργία υπό τις βέλτιστες στροφές δηλαδή με βέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος για μεγαλύτερο εύρος ταχυτήτων ανέμου και συνεπώς έχει την καλύτερη εκμετάλλευση αιολικής ενέργειας με αύξηση της παραγόμενης ενέργειας που μπορεί να φτάσει από 5 έως 10%. Ωστόσο, τα μειονεκτήματα των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών, μπορούν να τοποθετηθούν κυρίως στον οικονομικό τομέα. Πιο συγκεκριμένα, τα χρησιμοποιούμενα ηλεκτρονικά ισχύος που είναι απαραίτητα για τη σύνδεση τέτοιου τύπου ανεμογεννητριών στο δίκτυο, επιβαρύνουν κατά πολύ το κόστος τους, μιας και αυτά αντιπροσωπεύουν από οικονομικής πλευράς το μεγαλύτερο μέρος του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού. Εκτός από τα οικονομικά μειονεκτήματα της λειτουργίας των μεταβλητών στροφών, κρίνεται απαραίτητο να σταθούμε και σε μερικά ακόμη όπως για παράδειγμα η αυξημένη πολυπλοκότητα, η έγχυση αρμονικών συχνοτήτων στο δίκτυο και τέλος η εγκατάσταση φίλτρων.

Κεφάλαιο 4

4. Συμβατική μετάδοση ισχύος σε ανεμογεννήτριες.

4.1. Εισαγωγή.

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται συνοπτικά τα κλασσικά συστήματα μετάδοσης κίνησης που χρησιμοποιούνται ευρέως σε ανεμογεννήτριες. Πιο αναλυτικά, αρχικά περιγράφεται η λειτουργία του κιβωτίου ταχυτήτων: μέσα από τις σχέσεις μετάδοσης των γραναζιών η ταχύτητα που προσλαμβάνει η Α/Γ από τα πτερύγια του ρότορα προσαρμόζεται κατάλληλα για την τροφοδότηση της γεννήτριας. Στη συνέχεια του κεφαλαίου αναλύονται τα προβλήματα που τίθενται από την εφαρμογή των ηλεκτρονικών μετατροπέων που χρησιμοποιούν οι Α/Γ για την σύνδεση τους στο δίκτυο. Η πιο συνηθισμένη διάταξη που χρησιμοποιείται για την σύνδεση Α/Γ στο δίκτυο είναι μία διάταξη δύο ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος αποτελούμενων από έναν αντιστροφέα και έναν ανορθωτή. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στα μειονεκτήματα των παραπάνω διατάξεων και τις λύσεις τις οποίες η επιστημονική και ερευνητική κοινότητα που ασχολείται με θέματα αξιοποίησης και εκμετάλλευσης αιολικών συστημάτων, προσπαθεί να βρει.

4.2. Κιβώτια ταχυτήτων.

4.2.1. *Είδη κιβωτίων ταχυτήτων.*

Τα περισσότερα συστήματα μετάδοσης κίνησης που χρησιμοποιούνται για Α/Γ περιλαμβάνουν ένα κιβώτιο ταχυτήτων, που αυξάνει την ταχύτητα που προσλαμβάνεται από τα πτερύγια του ρότορα. Η αύξηση αυτή της ταχύτητας απαιτείται επειδή ο ρότορας της ανεμογεννήτριας, και κατά συνέπεια ο κύριος άξονας της περιστρέφεται με πολύ χαμηλότερη ταχύτητα από αυτή που απαιτείται για την τροφοδότηση της ηλεκτρικής γεννήτριας. Για παράδειγμα ένας μικρός ρότορας Α/Γς, περιστρέφεται σε ταχύτητες της τάξης των μερικών εκατοντάδων rpm, ενώ μεγαλύτερες Α/Γ περιστρέφονται πιο αργά. Τα περισσότερα είδη γεννητριών που χρησιμοποιούνται σήμερα περιστρέφονται με 1800rpm (60Hz) ή 1500rpm (50Hz).

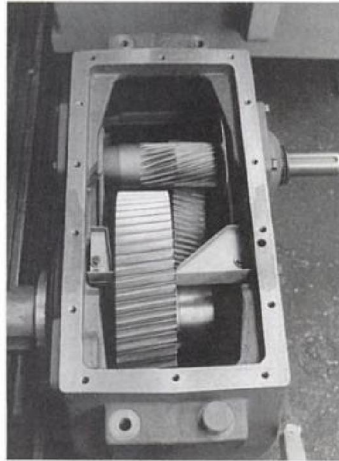
Κάποια όμως κιβώτια ταχυτήτων εκτός από το να αυξάνουν τις στροφές εκτελούν και κάποιες δευτερεύουσες λειτουργίες όπως το να στηρίζουν τα έδρανα του κύριου άξονα. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο το κιβώτιο ταχυτήτων αποτελεί ένα από τα πιο βαριά εξαρτήματα μίας Α/Γ. Τα κιβώτια ταχυτήτων κανονικά σχεδιάζονται και παρέχονται κυρίως από διαφορετικό κατασκευαστή, κυρίως από εκείνον που κατασκεύασε και την ίδια την Α/Γ. Δεδομένου ότι οι καταστάσεις λειτουργίας που αντιμετωπίζει ένα κιβώτιο ταχυτήτων για Α/Γ είναι σημαντικότερα πολύ διαφορετικές από κάθε άλλη εφαρμογή του, για αυτό τον λόγο οι κατασκευαστές Α/Γ θα πρέπει να κατανοούν εις βάθος την λειτουργία του κιβωτίου ταχυτήτων όπως επίσης και οι κατασκευαστές κιβωτίων ταχυτήτων την λειτουργία των Α/Γ. Η πάροδος των χρόνων έχει δείξει ότι το κιβώτιο ταχυτήτων αποτελεί μία κύρια πηγή λειτουργικών προβλημάτων για μία Α/Γ.

Όλα τα κιβώτια ταχυτήτων έχουν κάποιες ομοιότητες, αποτελούνται κυρίως από το πλαίσιο, τους άξονες, τα γρανάζια, τα έδρανα, και τις τάπες λαδιού. Ωστόσο υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες κιβωτίων ταχυτήτων που χρησιμοποιούν οι Α/Γ [5].

1. **Κιβώτιο ταχυτήτων παράλληλων αξόνων (parallel gearboxes),**
2. **Πλανητικού τύπου κιβώτιο ταχυτήτων (planetary gearboxes).**

4.2.1.1. Κιβώτιο ταχυτήτων παράλληλων αξόνων (parallel-shaft gearboxes).

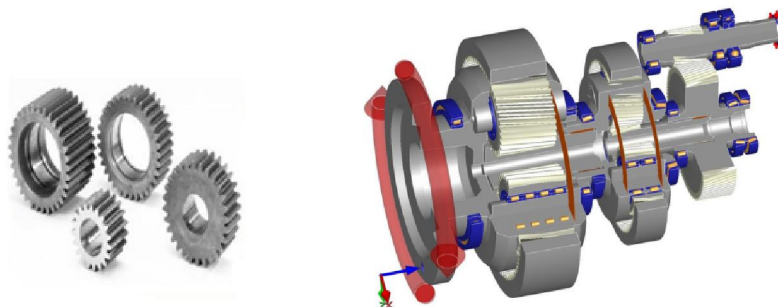
Στα κιβώτια ταχυτήτων παράλληλων αξόνων, τα γρανάζια στηρίζονται σε δύο ή περισσότερους παράλληλους άξονες. Αυτοί οι άξονες στηρίζονται σε έδρανα τοποθετημένα στο πλαίσιο. Σε ένα κιβώτιο ταχυτήτων μίας φάσης υπάρχουν δύο άξονες, ο άξονας χαμηλής ταχύτητας και ο άξονας υψηλής ταχύτητας. Και οι δύο αυτοί άξονες οι οποίοι είναι παράλληλα τοποθετημένοι περνούν μέσα από το πλαίσιο, όπου ο ένας από αυτούς θα συνδεθεί με τον κύριο άξονα του ρότορα και ο άλλος θα συνδεθεί με την γεννήτρια. Ωστόσο υπάρχουν δύο γρανάζια, με διαφοροποίηση μεγέθους, με το γρανάζι που είναι συνδεδεμένο στον άξονα χαμηλής ταχύτητας να είναι το μεγαλύτερο από τα δύο. Ακόμα ισχύει ότι ο λόγος της διαμέτρου κάθε γραναζιού είναι αντιστρόφως ανάλογος με τον λόγο της ταχύτητας περιστροφής. Υπάρχει όμως ένα πρακτικό όριο στο μέγεθος της αναλογίας που έχουν τα δύο γρανάζια ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα κιβώτιο ταχυτήτων παράλληλου αξόνων μίας φάσης. Για αυτό το λόγο κιβώτια ταχυτήτων με μεγάλο λόγο στη σχέση μετάδοσης χρησιμοποιούν πολύπλοκα είδη γραναζιών και αξόνων. Για παράδειγμα ένα κιβώτιο ταχυτήτων δύο φάσεων θα περιλαμβάνει τρεις άξονες, 1) άξονας εισόδου(χαμηλής ταχύτητας), 2) άξονας εξόδου(υψηλής ταχύτητας), και 3) ο ενδιάμεσος άξονας. Το μεγαλύτερο από αυτά τα τρία γρανάζια είναι αυτό που οδηγεί τον άξονα υψηλής ταχύτητας.



Σχήμα 4.1 Κιβώτιο ταχυτήτων παράλληλων αξόνων.

4.2.1.2. Κιβώτια ταχυτήτων πλανητικού τύπου (planetary gearboxes).

Τα κιβώτια ταχυτήτων πλανητικού τύπου παρουσιάζουν ένα σημαντικό αριθμό από διαφορές σε σχέση με τα κιβώτια ταχυτήτων παράλληλου τύπου. Πιο συγκεκριμένα, οι άξονες εισόδου και εξόδου είναι ομοαξονικά συνδεδεμένοι μεταξύ τους. Αυτό συνεπάγεται πολύπλοκα είδη οδοντωτών γραναζιών αλληλοσυνδεδεμένα μεταξύ τους έτσι ώστε κάθε φορά το φορτίο στο κάθε γρανάζι να μειώνεται. Αυτό το γεγονός είναι που καθιστά τα πλανητικά κιβώτια ταχυτήτων σημαντικά ελαφρύτερα και συμπαγή. Στα κιβώτια ταχυτήτων πλανητικού τύπου, ο άξονας χαμηλής ταχύτητας στηρίζεται από έδρανα στο πλαίσιο, συνδεδεμένα σε έναν μεταφορέα πλανητικού τύπου, ο οποίος κρατάει τρία ίδιου τύπου μικρά γρανάζια που αναφέρονται ως γρανάζια «πλανήτες». Αυτά τα γρανάζια είναι συνδεδεμένα σε έναν μικρό εσωτερικό άξονα με ρουλεμάν ώστε να μπορούν να περιστρέφονται ελεύθερα και αλληλοσυνδέονται με έναν μεγάλης διαμέτρου εσωτερικό δακτυλιωτό γρανάζι και ένα γρανάζι μικρότερης διαμέτρου που αναφέρεται ως γρανάζι «ήλιος». Επιπλέον, όπως και στα κιβώτια ταχυτήτων παράλληλου τύπου, και εδώ υπάρχει ένα όριο στην σχέση μετάδοσης των ταχυτήτων που μπορεί να επιτευχθεί με την τοποθέτηση ενός γραναζιού μονής φάσης πλανητικού τύπου. Για υψηλότερη τιμή της σχέσης μετάδοσης τοποθετούμε εν σειρά γρανάζια με περισσότερες φάσεις-στάδια [5].



Σχήμα 4.2 Αριστερά της εικόνας φαίνονται τα γρανάζια «πλανήτες», ενώ δεξιά είναι ένα κιβώτιο ταχυτήτων δύο φάσεων πλανητικού τύπου.

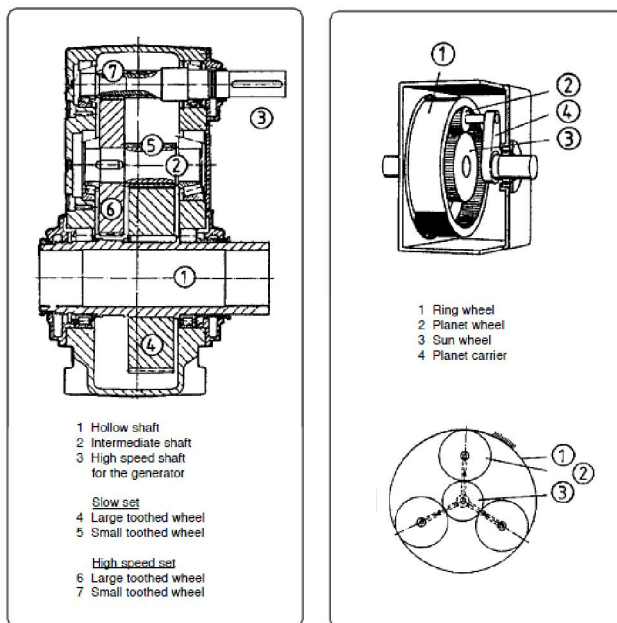
Ωστόσο, και τα κιβώτια πλανητικού τύπου έχουν παρουσιάζουν κάποια μειονεκτήματά . Η συμπαγής κατασκευή (που είναι πολύ πρακτική για τον σχεδιασμό και την κατασκευή του υπόλοιπου μέρους της μηχανής), μπορεί να είναι από μόνη της ένα μειονέκτημα. Η συμπαγής κατασκευή καθιστά δύσκολο να απορρίψει αποτελεσματικά κάθε υπέρβαση θερμότητας στο περιβάλλον. Επιπλέον, ένα γρανάζι δεν είναι 100% αποδοτικό και σύμφωνα με μετρήσεις περίπου το 1% της ισχύος χάνεται σε απώλειες θερμότητας σε κάθε στάδιο . Έτσι για παράδειγμα σε ένα κιβώτιο ταχυτήτων 600 KW τα 18KW είναι απώλειες θερμότητας. Για αυτό η ψύξη του κιβωτίου ταχυτήτων αποτελεί πολύ σημαντική παράμετρο ώστε να αποφεύγονται σημαντικά ποσά απωλειών θερμότητας. Ένα άλλο μειονέκτημα των γραναζιών τύπου planet, είναι ότι δεν μπορούν να κατασκευαστούν με λοξοτομημένα μηχανικά δόντια. Τα λοξοτομημένα μηχανικά δόντια που χρησιμοποιούνται συνήθως στα κιβώτια ταχυτήτων των ανεμογεννητριών προσφέρουν μείωση του εκπεμπόμενου θορύβου [23].



Σχήμα 4.3 Λοξοτομημένα μηχανικά δόντια που συνήθως χρησιμοποιούνται στα κιβώτια ταχυτήτων.

Παράδειγμα λειτουργίας ενός κιβωτίου ταχυτήτων είναι ένα κιβώτιο ταχυτήτων πλανητικού τύπου (Flender SZAK) που διαθέτει 1380 γρανάζια για μία ανεμογεννήτρια των 150 KW. Όπως γίνεται φανερό και από το σχήμα που ακολουθεί, τα γρανάζια αυτά αποτελούνται από δύο σετ οδοντωτών γραναζιών , ένα γρανάζι για τον άξονα χαμηλής ταχύτητας και ένα δεύτερο γρανάζι για τον άξονα υψηλής ταχύτητας. Κατά την σύνδεση με τον άξονα χαμηλής ταχύτητας το μεγάλο γρανάζι είναι απευθείας συνδεδεμένο με το γρανάζι του εσωτερικού άξονα (hollow shaft), ενώ το μικρότερο γρανάζι είναι συνδεδεμένο στον ενδιάμεσο άξονα. Η διαφορά στο μέγεθος των δύο γραναζιών είναι της τάξης του 1:5. Έτσι ο ενδιάμεσος άξονας γυρίζει 5 φορές για κάθε μία πλήρη περιστροφή που κάνει ο εσωτερικός άξονας . Αντίθετα κατά την σύνδεση με τον άξονα υψηλής ταχύτητας το μεγάλο γρανάζι είναι συνδεδεμένο στον ενδιάμεσο άξονα, ενώ το μικρό γρανάζι είναι συνδεδεμένο στον άξονα της γεννήτριας. Εδώ η διαφορά μεγέθους είναι της τάξης του 1:5 έτσι ώστε ο άξονας εξόδου της γεννήτριας να γυρίζει 5 φορές για κάθε μία πλήρη περιστροφή του ενδιάμεσου άξονα. Όταν οι δύο λόγοι ταχυτήτων συνδυάζονται τότε ο άξονας εξόδου θα γυρίζει 25 φορές για κάθε μία πλήρη περιστροφή του εσωτερικού άξονα . Σύμφωνα με κανονισμό η αναλογία της σχέσης μετάδοσης σε κάθε σύνολο γραναζιών περιορίζεται σε περίπου λιγότερο από το 1:6. Κατά συνέπεια για μία ανεμογεννήτρια των 150 KW, που λαμβάνει ταχύτητα περιστροφής του ρότορα 40 rpm για να αναπτύξει ταχύτητα περιστροφής του άξονα της γεννήτριας 1000rpm, το κιβώτιο ταχυτήτων θα πρέπει να έχει

συνολική σχέση μετάδοσης 40/1000 δηλαδή 1:25. Για την επίτευξη αυτής της σχέσης μετάδοσης θα πρέπει να γίνει χρήση κιβώτιου ταχυτήτων δύο φάσεων [20].



Σχήμα 4.4 Σχηματική απεικόνιση του κιβωτίου ταχυτήτων Flender SZAK.

4.2.2. Η χρήση των κιβωτίων ταχυτήτων.

Τα γρανάζια του κιβωτίου ταχυτήτων σε μία ανεμογεννήτρια, συνδέουν τον άξονα χαμηλής ταχύτητας με τον άξονα υψηλής ταχύτητας και αυξάνουν την ταχύτητα περιστροφής από περίπου 30 έως 60 περιστροφές το λεπτό (rpm = περιστροφή ανά λεπτό) σε 1500 έως 1800 περιστροφές το λεπτό, που είναι η ταχύτητα περιστροφής που οι περισσότερες ανεμογεννήτριες απαιτούν ώστε να παραγάγουν ηλεκτρισμό. Συνεπώς, η ισχύς που εξάγεται από την περιστροφή της ανεμογεννήτριας μεταφέρεται στην γεννήτρια μέσω του κύριου άξονα, του κιβωτίου ταχυτήτων και του άξονα υψηλής ταχύτητας. Το πρόβλημα το οποίο αναπτύσσεται στην απευθείας σύνδεση της ανεμογεννήτριας με το δίκτυο εξηγείται με το ακόλουθο παράδειγμα. Έστω μία συνήθης ανεμογεννήτρια με διάμετρο ρότορα 43 m, που συνδέεται στο δίκτυο των 50Hz. Στην περίπτωση σύνδεσης αυτής της γεννήτριας απευθείας στο δίκτυο θα παρουσιαζόταν μία εξαιρετικά υψηλή ταχύτητα περιστροφής μεταξύ των 1000 με 3000 rpm. Αυτό συνεπάγεται η ταχύτητα του ακροπτερυγίου να είναι δύο φορές μεγαλύτερη από την ταχύτητα του ήχου. Μία άλλη περίπτωση θα ήταν η κατασκευή μίας πολυπολική γεννήτριας που να λειτουργούσε με χαμηλές στροφές. Αν συνδέονταν μία τέτοια γεννήτρια στο δίκτυο, θα έπρεπε να κατασκευαστεί μία γεννήτρια με 200 πόλους ώστε να αναπτυχθεί μία λογική ταχύτητα περιστροφής περίπου στα 30rpm. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι ότι η μάζα του ρότορα της γεννήτριας πρέπει να είναι περίπου ανάλογη με το ποσό της ροπής που διαχειρίζεται, έτσι μία απευθείας σύνδεση στο δίκτυο θα απαιτούσε μία δαπανηρή και πολύ βαριά κατασκευή. Έτσι η τεχνική η οποία χρησιμοποιείται έως σήμερα είναι μέσω

του κιβωτίου ταχυτήτων . Το κιβώτιο ταχυτήτων έχει την δυνατότητα μετατροπής της χαμηλής ταχύτητας περιστροφής όμως υψηλή ροπή που λαμβάνει από τα πτερύγια του ρότορα της ανεμογεννήτριας σε υψηλή ταχύτητα περιστροφής αλλά χαμηλής ροπής κατάλληλη για την σύνδεση της ανεμογεννήτριας. Τα κιβώτια ταχυτήτων έχουν σταθερή σχέση μετάδοσης μεταξύ της περιστροφής του ρότορα και της γεννήτριας. Για παράδειγμα για μηχανές των 600 ή 750 KW, η σχέση μετάδοσης τους είναι τυπικά γύρω στο 1:50. Το σχήμα 4.4 που ακολουθεί απεικονίζει ένα κιβώτιο ταχυτήτων για μία ανεμογεννήτρια του 1.5MW. Ωστόσο αξίζει να σημειωθεί ότι το εικονιζόμενο κιβώτιο ταχυτήτων αποτελεί μία ασυνήθιστη μορφή δεδομένου ότι έχει φλάντζες για δύο γεννήτριες στην πλευρά υψηλής ταχύτητας. Το πορτοκαλί κατασκευάσμα που φαίνεται στο κάτω μέρος είναι υδραυλικά δισκόφρενα έκτακτης ανάγκης, και στο βάθος της εικόνας φαίνεται το κάτω μέρος της ατράκτου για ένα στρόβιλο των 1.5MW [23].



Σχήμα 4.4 κιβώτιο ταχυτήτων για μία ανεμογεννήτρια του 1.5MW

4.2.3. Σχεδιασμός κιβωτίων ταχυτήτων.

Υπάρχουν πολλά θέματα προς εξέταση στον σχεδιασμό και στην επιλογή ενός κιβωτίου ταχυτήτων . Αυτά περιλαμβάνουν:

- *Το είδος του κιβωτίου ταχυτήτων (παράλληλου τύπου ή πλανητικού τύπου),*
- *Τον λόγο των ταχυτήτων (σχέση μετάδοσης), Αριθμό των σταδίων-φάσεων,*
- *Το βάρος και το κόστος,*
- *Λίπανση,*
- *Συνέπειες της διακοπτόμενης λειτουργίας,*
- *Θόρυβος.*

Η σχέση μετάδοσης ενός κιβωτίου ταχυτήτων είναι άμεσα συνδεδεμένη με την επιθυμητή ταχύτητα περιστροφής του ρότορα, και με την ταχύτητα της γεννήτριας. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, η ταχύτητα του ρότορα εξαρτάται κυρίως από αεροδυναμικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα. Ωστόσο η ταχύτητα της γεννήτριας στις περισσότερες περιπτώσεις είναι 1800rpm για δίκτυα των 60Hz, και 1500rpm για δίκτυα των 50Hz. Για παράδειγμα μία ανεμογεννήτρια όπου ο ρότορας της έχει σχεδιαστεί να λειτουργεί στις

60rpm, για να συνδεθεί με μία γεννήτρια η οποία θέλει 1800rpm, θα χρειαστεί ένα κιβώτιο ταχυτήτων με σχέση μετάδοσης 30:1. Ο αριθμός των φάσεων σε ένα κιβώτιο ταχυτήτων γενικότερα αποτελεί το δεύτερο στοιχείο που λαμβάνει υπόψιν ένας σχεδιαστής ανεμογεννητριών και αυτό διότι ο αριθμός των φάσεων στο κιβώτιο ταχυτήτων επιδρά στην πολυπλοκότητα του συστήματος, στο μέγεθος, στο βάρος, καθώς και στο κόστος της όλης κατασκευής. Γενικότερα καμία φάση δεν μπορεί να προσδώσει λόγο ταχυτήτων μεγαλύτερο από 6:1. Για αυτό τον λόγο τοποθετούνται περισσότερες από μία φάσεις εν σειρά ώστε το αποτέλεσμα να προέρχεται από το άθροισμα των επιμέρους φάσεων. Το μέγεθος ενός κιβωτίου ταχυτήτων αυξάνεται δραματικά με την αύξηση της ονομαστικής ισχύος της Α/Γ. Έτσι το βάρος ενός κιβωτίου ταχυτήτων βαθμονομείται σύμφωνα με την κυβική ακτίνα του (r^3), όπως ακριβώς γίνεται και με το βάρος του ρότορα. Για αυτό το λόγο η χρήση του πλανητικού κιβωτίου ταχυτήτων είναι πιο ευρεία, λόγω του πλεονεκτήματος του μειωμένου βάρους της διάταξης, παρόλα αυτά όμως παρουσιάζει αυξημένο κόστος λόγω της πολυπλοκότητας της διάταξης. Τα φορτία τα οποία υπόκεινται ένα κιβώτιο ταχυτήτων σχετίζονται άμεσα με τα φορτία που επιβάλλει ο ρότορας. Τέτοια μπορεί να είναι η ροπή του κύριου άξονα, το βάρος του ρότορα, καθώς και διαφορετικά δυναμικά φορτία εξαρτώμενα από το μέγεθος της συσχέτισης του κιβωτίου ταχυτήτων με τον κύριο άξονα και τα έδρανα. Φορτία επίσης μπορεί να προέρχονται και από την μεριά της γεννήτριας, τα οποία δημιουργούνται είτε κατά την εκκίνηση της, είτε κατά την κανονική λειτουργία της ή από κάθε είδους μηχανικού φρένου που τοποθετείται στην πλευρά υψηλής ταχύτητας του κιβωτίου ταχυτήτων. Βέβαια μετά το πέρας ενός προκαθορισμένου χρονικού διαστήματος αρχίζουν και οι φθορές στα οδοντωτά γρανάζια του κιβωτίου ταχυτήτων καθώς και στις τάπες του λαδιού. Ακόμα η λίπανση αποτελεί ένα ακόμα πιο σοβαρό θέμα για την σωστή λειτουργία του κιβωτίου ταχυτήτων. Τα λάδια πρέπει να επιλέγονται με σωστά κριτήρια ώστε να μειώνουν τις φθορές στα δόντια των γραναζιών αλλά και να λειτουργούν σωστά σε κάθε εξωτερική συνθήκη περιβάλλοντος όπου λειτουργεί μία Α/Γ. Ωστόσο σε κάποιες περιπτώσεις ίσως είναι απαραίτητο να παρέχεται φιλτράρισμα ή ενεργή ψύξη του λαδιού, καθώς επίσης και ανά τακτά χρονικά διαστήματα λήψεις δειγμάτων ώστε να αξιολογείται η κατάσταση στην οποία βρίσκεται το λάδι για να αποτραπούν οι τυχόν φθορές σε γρανάζια. Όταν η Α/Γ βρίσκεται εκτός λειτουργίας, υπάρχει η πιθανότητα διαρροής του λαδιού έξω από τα γρανάζια και τα έδρανα, που όμως έχει σαν αποτέλεσμα τη μη σωστή λίπανση των γραναζιών του κιβωτίου ταχυτήτων όπου κατά την εκκίνηση του ίσως δημιουργηθούν σοβαρά προβλήματα. Ακόμα σε περιόδους ψύχους το λάδι μπορεί να έχει αρκετά υψηλό ιξώδες μέχρι να ζεσταθεί το κιβώτιο ταχυτήτων και να μην λιπαίνει σωστά τα μηχανικά του μέρη, έτσι για αυτό το λόγο στις σημερινές Α/Γ τοποθετούνται ειδικοί θερμοστές ελαίου [21].

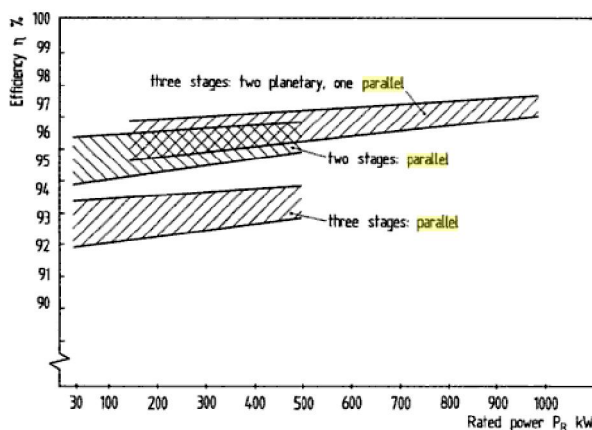
4.2.4. Η απόδοση και η εκπομπή θορύβου ενός κιβωτίου ταχυτήτων.

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας τα σημερινά κιβώτια ταχυτήτων σχεδιάζονται ώστε να παράγουν τον λιγότερο δυνατό θόρυβο και μικρές ενεργειακές απώλειες. Ωστόσο κρίνεται απαραίτητο η μελέτη αυτών των απωλειών. Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενη ενότητα η κύρια αιτία απώλειας ισχύος οφείλεται στην διαρροή λαδιού από τα γρανάζια του

κιβωτίου ταχυτήτων, πρόβλημα το οποίο εκδηλώνεται περισσότερο ως θερμότητα και λιγότερο ως θόρυβος. Η αύξηση της θερμότητας μπορεί να αποτελέσει σημαντικό πρόβλημα κυρίως σε πολλών φάσεων πλανητικού τύπου κιβώτια ταχυτήτων. Για αυτό τον λόγο στον σχεδιασμό των μοντέρνων κιβωτίων ταχυτήτων εγκαθίστανται ειδικά ψυκτικά μέσα λαδιού. Ο βαθμός απόδοσης εξαρτάται κυρίως από τον λόγο ταχυτήτων, το είδος των γραναζιών, και τον τύπο του λιπαντικού λαδιού. Αναφορικά με τις απώλειες μεταξύ των δύο τύπων κιβωτίου ταχυτήτων αυτές είναι οι εξής:

- ❖ **Κιβώτια ταχυτήτων παράλληλων αξόνων:** Περίπου 2% απώλειες ισχύος ανά φάση,
- ❖ **Κιβώτια ταχυτήτων τύπου planetary:** Περίπου 1% απώλειες ισχύος ανά φάση.

Γενικότερα ισχύει ότι κιβώτια ταχυτήτων της τάξης των MW, έχουν πολύ καλύτερο βαθμό απόδοσης από ότι κιβώτια ταχυτήτων μικρότερης τάξης ισχύος. Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η διακύμανση της απόδοσης ενός κιβωτίου ταχυτήτων εξαρτώμενη από τον τύπο του κιβωτίου ταχυτήτων και από την ισχύ της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 4.7 απόδοσης ενός κιβωτίου ταχυτήτων εξαρτώμενη από τον τύπο του κιβωτίου ταχυτήτων και από την ισχύ της ανεμογεννήτριας.

Καθώς η απόδοση ενός κιβωτίου ταχυτήτων εξαρτάται από τον αριθμό των φάσεων των γραναζιών, έτσι για ανεμογεννήτριες μικρού έως μεσαίου μεγέθους χρησιμοποιούνται κιβώτια ταχυτήτων δύο φάσεων. Ένα κιβώτιο ταχυτήτων δύο φάσεων συνδυαζόμενο με κάποια επιπλέον εξαρτήματα και με μία πολύπολική γεννήτρια λειτουργεί σε χαμηλότερη ταχύτητα από ότι ένα κιβώτιο ταχυτήτων τριών φάσεων με μία διπολική γεννήτρια.

Η επίδραση του θορύβου ενός κιβωτίου ταχυτήτων εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την ποιότητα κατασκευής του. Η κακή πολλές φορές ποιότητα σχεδιασμού και κατασκευής είναι η αιτία που συνήθως φέρουν τα ανεπιθύμητα αποτελέσματα του θορύβου. Οι κατασκευαστές πάντως εκφράζουν τα επίπεδα πίεσης του ήχου με μετρήσεις οι οποίες γίνονται σε απόσταση 1m, από το σημείο δοκιμής σύμφωνα με το πρότυπο DIN. Έτσι από πειραματικές μετρήσεις εξάγονται τα παρακάτω αποτελέσματα.

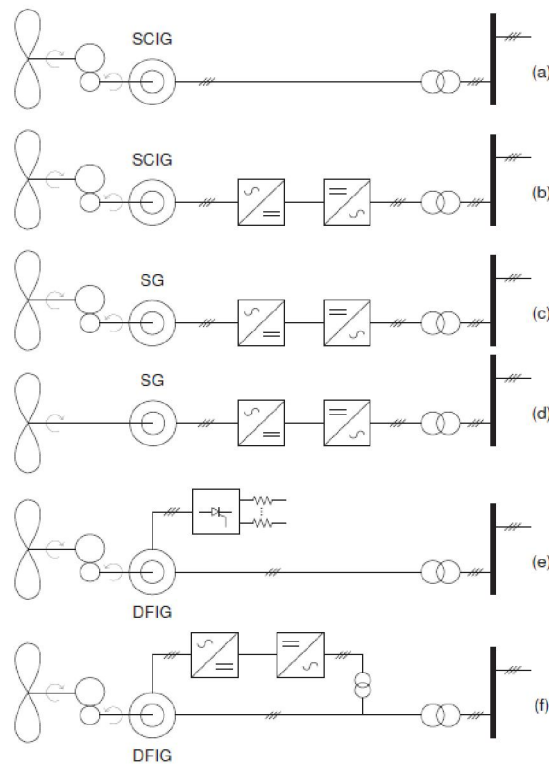
Μικρό κιβώτιο ταχυτήτων παράλληλων αξόνων	Πάνω από 100Kw	75-80 dB(A)
Μεσαίου μεγέθους παράλληλων αξόνων	Πάνω από 1000Kw	80-85 dB(A)
Μεγάλο κιβώτιο ταχυτήτων ανεξαρτήτως είδους	Πάνω από 3000Kw.	100-105 dB(A)

Ωστόσο, οι κατασκευαστές ανεμογεννητριών για να εμποδίσουν αυτήν την μεταφορά του ήχου, κατασκευάζουν ηχώ-απορροφητικούς ατράκτους από ειδικά ελαστικά υλικά [21].

4.3. Η χρήση των ηλεκτρονικών μετατροπέων.

Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες που λειτουργούν με σταθερό αριθμό στροφών συνδέονται απευθείας στο δίκτυο. Ωστόσο η ανάλυση που έγινε σε προηγούμενο κεφάλαιο έδειξε ότι η λειτουργία της ανεμογεννήτριας υπό μεταβλητή ταχύτητα παρέχει περισσότερα πλεονεκτήματα σε σχέση με την λειτουργία με σταθερή ταχύτητα. Με την λειτουργία της ανεμογεννήτριας σε μεταβλητές στροφές επιτυγχάνεται η λειτουργία της με μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή κάθε φορά και συνεπώς βέλτιστο λόγο ακροπεριγίου (δηλαδή ο ρότορας να ακολουθεί με ελεγχόμενο τρόπο τις μεταβολές του ανέμου). Έτσι επιτυγχάνεται η βελτίωση της ποιότητας της παραγόμενης ισχύος, μείωση του εκπεμπόμενου θορύβου αλλά και μείωση των καταπονήσεων των μηχανικών μερών της ανεμογεννήτριας. Ωστόσο η απευθείας σύνδεση της Α/Γ ανεμογεννήτρια στο δίκτυο συνεπάγεται ότι η ταχύτητα του ρότορα καθορίζεται άμεσα από την συχνότητα του δικτύου. Για αυτό το λόγω τίθεται η ανάγκη απομόνωσης της γεννήτριας από το δίκτυο, πράγμα το οποίο γίνεται μέσω των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος.

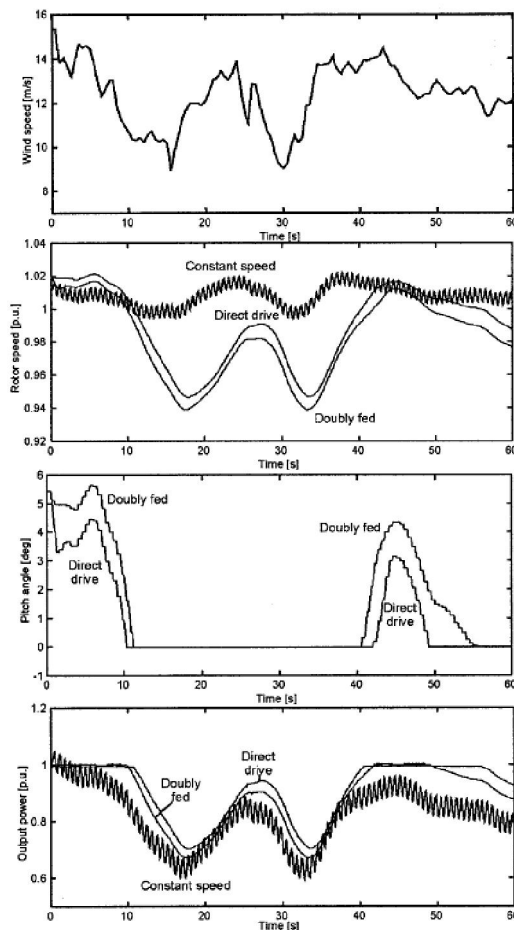
Στο σχήμα 4.8, παρουσιάζονται οι πιο συνήθεις τοπολογίες σύνδεσης γεννητριών στο ηλεκτρικό δίκτυο.



Σχήμα 4.8 Συνήθεις τοπολογίες σύνδεσης γεννητριών στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζονται έξι διατάξεις σύνδεσης Α/Γ, στο δίκτυο. Στην τοπολογία (a), απεικονίζεται η διάταξη μίας σταθερής ταχύτητας γεννήτριας βραχυκυκλωμένου κλωβού (ή λεγόμενη Δανέζικου τύπου Α/Γ) συνδεδεμένη απευθείας στο δίκτυο. Παρόλο που αυτή η διάταξη σύνδεσης αποτελεί την πιο οικονομική αλλά και εύρωστη λύση εντούτοις όμως παρουσιάζει το μειονέκτημα της έλλειψης ενεργού ελέγχου της γεννήτριας. Η τοπολογία (b), διαφέρει στο ότι η γεννήτρια λειτουργεί εδώ με μεταβλητές στροφές, και για αυτό το λόγω είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο μέσω μετατροπών ισχύος. Οι μετατροπείς ισχύος καταφέρνουν να απομονώσουν την συχνότητα που παράγει η γεννήτρια από την συχνότητα του δικτύου επιτρέποντας έτσι την λειτουργία της γεννήτριας υπό μεταβλητές στροφές. Με αυτό τον τρόπο η Α/Γ εκμεταλλεύεται καλύτερα την κινητική ενέργεια που προσλαμβάνει από τον άνεμο αφού λειτουργεί πάντα στο σημείο της καμπύλης όπου παρέχει την μέγιστη αεροδυναμική απόδοση. Το μειονέκτημα όμως που εμφανίζει αυτή η διάταξη έγκειται στο επιπλέον κόστος των μετατροπών, καθώς και την έγχυση ανώτερων αρμονικών στο δίκτυο πράγμα το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα την χαμηλή ποιότητα ισχύος που εκχύνεται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Μία παρόμοια διάταξη απεικονίζεται και στην τοπολογία (c) έχοντας αντικαταστήσει την επαγωγική γεννήτρια με μία υψηλής ταχύτητας σύγχρονη γεννήτρια. Στο διάγραμμα (d) απεικονίζεται η απευθείας σύνδεση μίας σύγχρονης γεννήτριας στο δίκτυο (direct drive). Οι τελευταίες δύο διατάξεις εμπεριέχουν τον ίδιο τύπο γεννήτριας (γεννήτρια διπλής τροφοδότησης D-FIG), με την διαφορά ότι στην διάταξη του σχήματος (e), η ταχύτητα της γεννήτριας δύναται να αυξηθεί κατά 20% πάνω από την σύγχρονη,

μεταβάλλοντας την αντίσταση του ηλεκτρονικού μετατροπέα. Κλείνοντας στο διάγραμμα (f), η doubly fed γεννήτρια συνδέεται στο δίκτυο μέσω ηλεκτρονικού μετατροπέα τύπου Back-to-Back. Το πρόβλημα το οποίο δημιουργείται κατά την σύνδεση μίας ανεμογεννήτριας στο δίκτυο έγκειται στην στοχαστική φύση του ανέμου. Όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα ο άνεμος παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις και ριπές στο χρόνο. Συνεπώς, αυτές τις έντονες διακυμάνσεις μία ανεμογεννήτρια που λειτουργεί υπό σταθερές στροφές δεν μπορεί να τις αποσβέσει. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα αφενός την μεγαλύτερη καταπόνηση των μηχανικών μερών της ανεμογεννήτριας (αφού η Α/Γ αδυνατεί να αποσβέσει τις επιπλέον ταλαντώσεις του μηχανικού συστήματος), αφετέρου την κακής ποιότητας παραγόμενης ισχύος αφού η λειτουργία της ανεμογεννήτριας παρουσιάζει έντονη διακύμανση στην ροπή και την ισχύ εξόδου της. Τα προβλήματα αυτά έρχονται να ομαλοποιηθούν με την λειτουργία της ανεμογεννήτριας σε μεταβλητές στροφές. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται αποτελέσματα προσομοιώσεων (ταχύτητα του ρότορα, ισχύς εξόδου, μεταβολή της γωνίας του βήματος της έλικας) που σχετίζονται με την σύγκριση τριών τοπολογιών. Η σύγκριση γίνεται μεταξύ 1) ανεμογεννήτριας η οποία συνδέεται απευθείας στο ηλεκτρικό δίκτυο, δηλαδή με την απαλοιφή του κιβωτίου ταχυτήτων (Direct Drive), ακόμα 2) μίας ανεμογεννήτριας σταθερής ταχύτητας και 3) μίας επαγωγικής γεννήτριας διπλής τροφοδότησης [6,22].



Σχήμα 4.9 Προσομοίωση τριών καταστάσεων λειτουργίας μίας Α/Γ.

Από τα αποτελέσματα της παραπάνω προσομοίωσης γίνεται φανερό ότι στην λειτουργία της ανεμογεννήτριας υπό σταθερές στροφές παρουσιάζεται μία πολύ έντονη βραχύχρονη μεταβολή της ισχύος. Μία τέτοια μεταβολή θα αποτελούσε πρόβλημα για την σύνδεση στο δίκτυο. Αντίθετα στην λειτουργία της ανεμογεννήτριας υπό μεταβλητές στροφές η διακύμανση της ισχύος εξόδου είναι πολύ πιο μικρότερη, αφού κατά την λειτουργία αυτή ο ρότορας και η αδράνεια του συστήματος λειτουργούν ως συσσωρευτές κινητικής ενέργειας. Ωστόσο αναφορικά με την λειτουργία του ελέγχου του βήματος των πτερυγίων, από το διάγραμμα λειτουργίας είναι ξεκάθαρο ότι στις περιόδους υψηλής ταχύτητας του ανέμου ο ελεγκτής του βήματος των πτερυγίων αυξάνει την γωνία κλίσης ενώ σε περιόδους όπου η ταχύτητα του ανέμου πέσει κάτω από την ονομαστική ταχύτητα της Α/Γ, η γωνία του βήματος των πτερυγίων γίνεται μηδέν έτσι ώστε ο ρότορας να απορροφά την μέγιστη κινητική ταχύτητα του ανέμου.

4.4.Περίληψη-Συμπεράσματα.

Στο κεφάλαιο αυτό έγινε ανάλυση των μέσων μετάδοσης κίνησης που χρησιμοποιούνται σε ανεμογεννήτριες. Τα περισσότερα συστήματα ανεμογεννητριών σήμερα χρησιμοποιούν κιβώτιο ταχυτήτων, για να αυξήσουν την σχέση μετάδοσης μεταξύ του άξονα χαμηλής ταχύτητας και του άξονα υψηλής ταχύτητας και ακόμα χρησιμοποιούν τις ηλεκτρονικές διατάξεις ισχύος για την κατάλληλη διαμόρφωση της συχνότητας αλλά και της τάσης που εξάγεται από την ανεμογεννήτρια, ώστε να μπορεί να συνδεθεί με το δίκτυο χωρίς προβλήματα. Παρά όλα αυτά όμως, αυτές οι διατάξεις εμφανίζουν αρκετά μειονεκτήματα. Το κιβώτιο ταχυτήτων αποτελεί ένα ακριβό και βαρύ εξάρτημα της ανεμογεννήτριας και οι μηχανικοί ερευνούν προς την κατεύθυνση ανεμογεννητριών «άμεσης ώθησης» (direct-drive) οι οποίες λειτουργούν σε χαμηλότερες ταχύτητες περιστροφής και δεν χρειάζονται κιβώτιο ταχυτήτων. Έκτος όμως ότι το κιβώτιο ταχυτήτων αποτελεί ένα βαρύ εξάρτημα της ανεμογεννήτριας αλλά και ακριβό, είναι και το υπ' αριθμό ένα εξάρτημα της ανεμογεννήτριας το οποίο υπόκειται στις συχνότερες βλάβες. Από την άλλη μεριά οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς εμφανίζουν το πρόβλημα της εισαγωγής των αρμονικών στο δίκτυο λόγω της διακοπτικής λειτουργίας των στοιχείων τους.

Κεφάλαιο 5

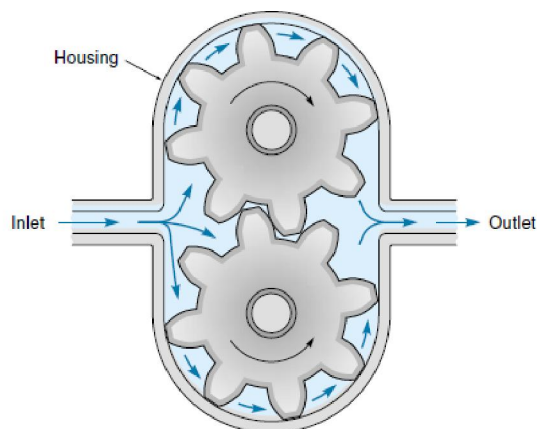
5. Υδραυλική Μετάδοση Ισχύος Για Ανεμογεννήτριες

5.1.Εισαγωγή

Τα υδραυλικά συστήματα μετάδοσης ισχύος είναι ένας διατάξεις που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση της κίνησης και για μεταφορά ισχύος μεταξύ 2 βαθμίδων. Ένα υδραυλικό σύστημα απαρτίζεται από ένα σύνολο εξαρτημάτων (αντλίες, κινητήρες, βαλβίδες, συσσωρευτές κ.α.), που συνεργαζόμενα παράγουν έργο. Τα εξαρτήματα αυτά είναι διαχειρίζονται ένα ρευστό υπό πίεση, το οποίο ονομάζεται εργαζόμενο μέσο. Τα υδραυλικά συστήματα ως τεχνολογία δημιουργήθηκαν πριν μερικές δεκαετίες. Στην παρούσα εργασία μελετάται η χρήση υδραυλικού συστήματος για τη μετάδοση της ισχύος από την πτερωτή της ανεμογεννήτριας προς την ηλεκτρική μηχανή. Πιο συγκεκριμένα, θα μελετηθεί η χρήση μιας καινοτόμου τεχνολογίας ελέγχου του συστήματος υδραυλικής μετάδοσης ισχύος, η οποία βασίζεται στον έλεγχο των υδραυλικών βαλβίδων σε πραγματικό χρόνο από μικροεπεξεργαστή. Η προτεινόμενη μέθοδος, σχεδιασμένη από την εταιρία Artemis Intelligent Power βελτιώνει τα χαρακτηριστικά των συμβατικών υδραυλικών συστημάτων μετάδοσης ισχύος και δίνει τη δυνατότητα χρησιμοποίησής τους σε ανεμογεννήτριες. Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα μέρη από τα οποία αποτελείται ένα τέτοιο σύστημα και θα εξεταστούν τα κατασκευαστικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά τους.

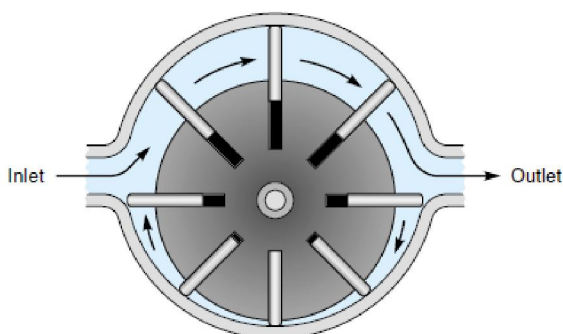
5.2.Υδραυλικές αντλίες.

Σε ένα ενεργό υδραυλικό σύστημα, η αντλία χρησιμοποιείται για να δημιουργήσει υδροστατική πίεση. Η εικόνα που ακολουθεί απεικονίζει ένα είδος αντλίας που ονομάζεται **gear pump** αποτελούμενη από δύο γρανάζια μέσα σε ένα κλειστό περίβλημα (housing). Καθώς τα γρανάζια περιστρέφονται, το υγρό μεταφέρεται σε έναν μικρό χώρο ανάμεσα στα δόντια των γραναζιών και στο τοίχωμα (πάνω και από κάτω) διοχετεύοντας το προς την έξοδο. Αυτός ο τύπος αντλίας είναι γνωστός ως αντλία θετικής μετατόπισης, επειδή για κάθε μία περιστροφή των γραναζιών αντλείται ένας σταθερός όγκος υγρού κάθε φορά [23].



Σχήμα 4.12 Αντλία με γρανάζια (gear pump).

Ένα άλλο είδος αντλίας είναι η **vane pump**, είναι μία αντλία αποτελούμενη από έναν ρότορα ο οποίος είναι έκκεντρα προσαρμοσμένος σε ένα πλαίσιο (housing) το οποίο περιέχει έμβολα με ελατήρια. Το κάθε ελατήριο σπρώχνει προς τα έξω το αντίστοιχο έμβολο εγκλωβίζοντας σε χώρους το υγρό .

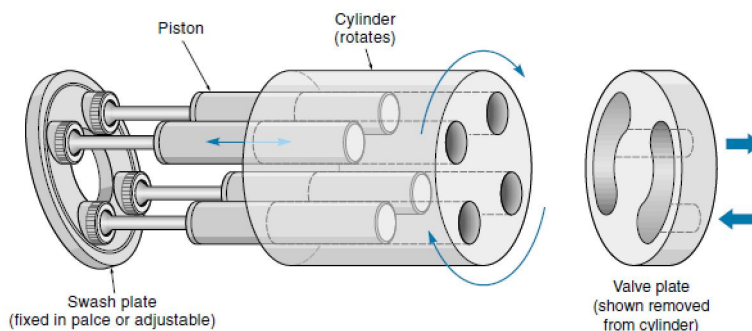


Σχήμα 4.13 Εμβολοφόρος αντλία (Vane pump).

Όπως είναι φανερό από το παραπάνω σχήμα στο επάνω μισό της αντλίας υπάρχει μεγαλύτερη συσσώρευση υγρού μεταξύ των βαλβίδων από ότι στο κάτω μισό της αντλίας, έτσι δημιουργείται μία συνολική μεταφορά του υγρού από την είσοδο προς την έξοδο περιστρέφοντας την αντλία δεξιόστροφα. Σε μερικούς τύπους αντλιών η θέση του κέντρου του ρότορα προσαρμόζεται, με αποτέλεσμα όσο πιο έκκεντρα είναι τοποθετημένη η θέση του ρότορα (ως προς το κέντρο του εξωτερικού περιβλήματος) τόσο περισσότερο υγρό αντλείται. Μία τέτοιου είδους αντλία ονομάζεται **variable displacement pump** (μετατόπιση το κέντρο του ρότορα ως προς το κέντρο του εξωτερικού περιβλήματος).

Ένα τρίτο είδος αντλίας είναι η **axial piston pump**, δηλαδή αξονική αντλία που χρησιμοποιεί μικρά έμβολα που κινούνται εμπρός και πίσω ώστε να αντλήσουν και να συμπιέσουν το υγρό . Όπως φαίνεται και από το σχήμα που ακολουθεί η αντλία αποτελείται από έναν περιστρεφόμενο κύλινδρο και μία μεταλλική επιφάνεια (swash plate) τοποθετημένη υπό γωνία προς τον άξονα κίνησης των εμβόλων, η οποία δεν περιστρέφεται. Ο κύλινδρος αποτελείται από έναν αριθμό μικρών εμβόλων που κάνουν την

ενεργή άντληση και τα οποία έμβολα είναι προσαρμοσμένα σε μία επιφάνεια η οποία περιστρέφεται ως προς την επιφάνεια swash plate [23].



Σχήμα 4.14 Αξονική αντλία με πιστόνια (axial piston pump).

Επειδή η επιφάνεια swash plate σχηματίζει γωνία κλίσης ως προς τον κύλινδρο κάθε πιστόνι είναι αναγκασμένο να κινείται μέσα και έξω με κάθε περιστροφή του κυλίνδρου αντλώντας και συμπιέζοντας υγρό. Όταν η επιφάνεια της swash plate είναι τελείως κάθετη στον άξονα περιστροφής του κυλίνδρου, τα πιστόνια δεν μπορούν να κινηθούν ενώ αντίθετα όσο πιο μεγάλη κλίση έχει η επιφάνεια swash plate τόσο μεγαλύτερη ποσότητα υγρού μεταφέρεται στα πιστόνια. Έτσι μεταβάλλοντας την γωνία κλίσης του swash plate, μεταβάλλεται και η ποσότητα του υγρού που αντλείται ανά περιστροφή και αυτό είναι το displacement σε αυτή την περίπτωση. Η τεχνολογία Digital Displacement δίνει δυνατότητα ενεργού ελέγχου χρονισμού των βαλβίδων, ούτως ώστε η ίδια ακριβώς κατασκευή να μπορεί να δουλέψει και ως αντλία και ως κινητήρας.

5.3.Υδραυλικοί κινητήρες.

Οι υδραυλικοί κινητήρες είναι εξαρτήματα που παρέχουν περιστροφική κίνηση, ως αποτέλεσμα μιας υδραυλικής δράσεως. Οι περισσότεροι υδραυλικοί κινητήρες είναι όμοιοι με τις υδραυλικές αντλίες. Αντί να συμπιέζουν το ρευστό όπως οι αντλίες, δέχονται ρευστό υπό πίεση το οποίο τους αναγκάζει να περιστρέφονται και να αποδίδουν ροπή στρέψεως στον άξονα τους. Οι περισσότεροι υδραυλικοί κινητήρες έχουν την δυνατότητα περιστροφής και προς τις δύο κατευθύνσεις ενώ οι αποστραγγίξεις τους είναι εξωτερικές. Οι υδραυλικοί κινητήρες χαρακτηρίζονται σύμφωνα με τον κυβισμό τους (παροχή σε cm^3 ανά πλήρη περιστροφή), την ικανότητα για απόδοση ροπής στρέψης και τη μέγιστη πίεση στην οποία μπορούν να λειτουργήσουν. Χαρακτηρίζονται επίσης ως βραδύστροφοι και πολύστροφοι. Πολύστροφοι χαρακτηρίζονται αυτοί που περιστρέφονται στην περιοχή των 6000rpm-3000rpm. Μπορεί να είναι οδοντωτοί, πτερυγιοφόροι ή εμβολοφόροι. Ως βραδύστροφοι χαρακτηρίζονται αυτοί που περιστρέφονται από κλάσμα της στροφής ανά λεπτό έως 300-400rpm. Για ορισμένες ειδικές εφαρμογές κατασκευάζονται κινητήρες πολύ

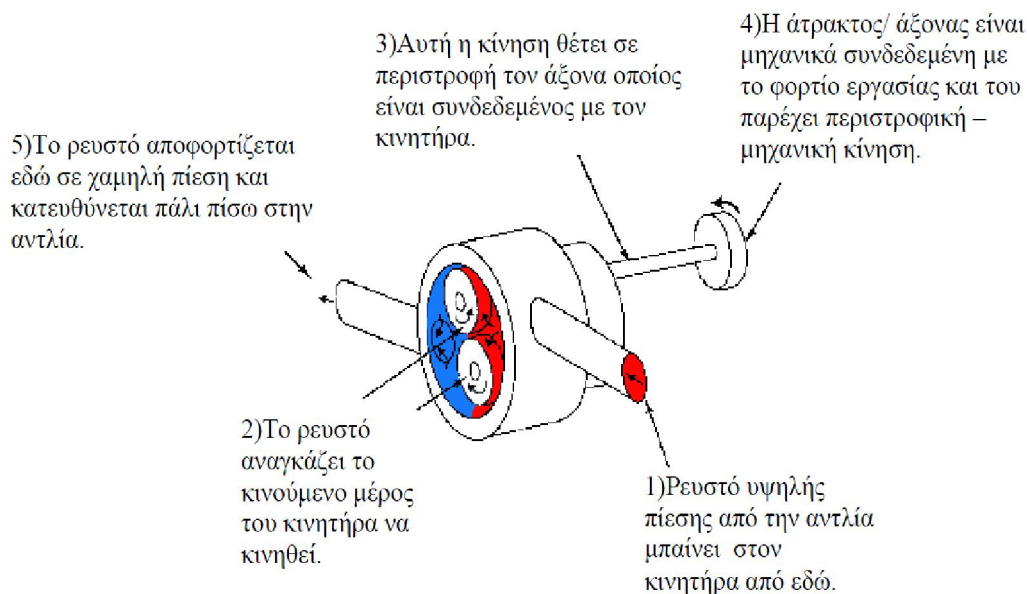
υψηλών στροφών όπως για π.χ. για αεροπορικές εφαρμογές υπάρχουν κινητήρες ικανότητας 10.000rpm.

Οι υδραυλικοί κινητήρες παρουσιάζουν εξαιρετικά πλεονεκτήματα:

- Έχουν μικρό όγκο σε σχέση με την αποδιδόμενη ισχύ,
- Εκκινούν ακαριαία, και αντιστρέφουν την φορά περιστροφής τους,
- Έχουν δυνατότητα συνεχούς μεταβολής των στροφών τους,
- Καλύπτουν μεγάλο φάσμα αποδόσεων.

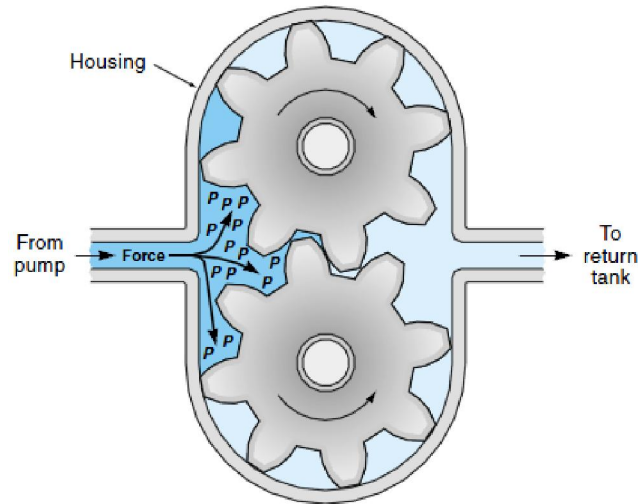
Υπάρχουν κινητήρες σταθερού και μεταβαλλόμενου κυβισμού όπως και οι αντλίες. Οι κινητήρες σταθερού κυβισμού αποδίδουν σταθερή ροπή στρέψεως ανάλογη προς την πίεση του ρευστού, και οι στροφές τους μεταβάλλονται με την μεταβολή της παροχής. Οι κινητήρες μεταβαλλόμενου κυβισμού αποδίδουν μεταβαλλόμενη ροπή στρέψεως, ανάλογη προς την πίεση του ρευστού και τον κυβισμό τους.

Στο παρακάτω σχήμα γίνεται κατανοητή η λειτουργία του υδραυλικού κινητήρα.



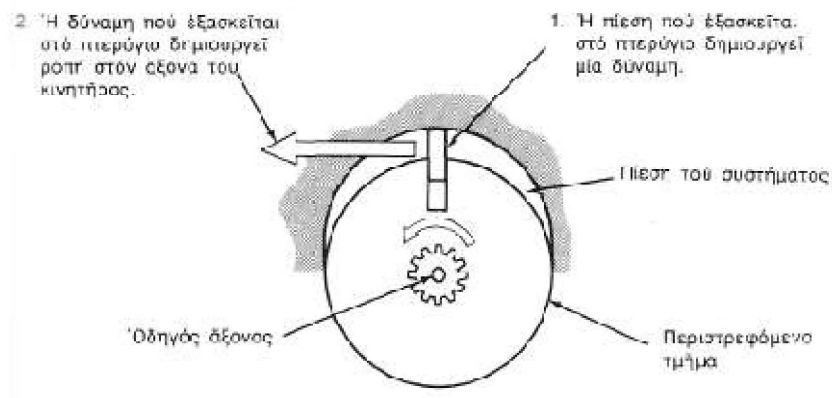
Σχήμα 4.15 Χαρακτηριστική λειτουργία ενός τυπικού υδραυλικού κινητήρα.

Οδοντωτοί υδραυλικοί κινητήρες: Ένας οδοντωτός κινητήρας αναπτύσσει ροπή στρέψεως με την εφαρμογή πιέσεως στην επιφάνεια των οδόντων. Είναι κατασκευής όμοιας προς την οδοντωτή υδραυλική αντλία. Αποτελείται από δύο οδοντωτούς τροχούς οι οποίοι συμπλέκονται και περιστρέφονται μαζί (σχ.4.16). Η φορά περιστροφής είναι αντιστρέψιμη με την αντιστροφή της παροχής του ρευστού. Ο κυβισμός του κινητήρα είναι σταθερός και ισούται με τον όγκο που εγκλωβίζεται μεταξύ των οδόντων και των τοιχωμάτων του κινητήρα.



Σχήμα 4.16 Οδοντωτός κινητήρας.

Πτερυγιοφόροι υδραυλικοί κινητήρες: Ένας οδοντωτός κινητήρας αναπτύσσει ροπή στρέψεως με την εφαρμογή πίεσεως στην επιφάνεια των οδόντων. Η κατασκευή είναι ίδια με την πτερυγιοφόρου αντλίας. Τα πτερύγια κινούνται ελεύθερα στις υποδοχές του περιστρεφόμενου τμήματος και εφάπτονται στην εσωτερική επιφάνεια του δακτυλίου. Η επαφή είναι τέτοια ώστε η πίεση να συγκρατείται στους χώρους που δημιουργείται.



Σχήμα 4.17 Αρχή λειτουργίας του πτερυγιοφόρου κινητήρα.

Κινητήρες αξονικών εμβόλων: Η κατασκευή των κινητήρων αυτών είναι πανομοιότυπη με την κατασκευή εμβολοφόρων αξονικών αντλιών που παρουσιάστηκε σε προηγούμενη παράγραφο. Ο άξονας του κινητήρα και οι άξονες των εμβόλων είναι παράλληλοι, ενώ η πίεση στα άκρα των εμβόλων δημιουργεί μία δύναμη αντιστάσεως στην υπό κλήση πλάκα.

Κινητήρες ακτινικών εμβόλων: Οι κινητήρες αυτοί αποτελούνται από έναν αριθμό εμβόλων που παλινδρομούν, δεχόμενοι ρευστό υπό πίεση.

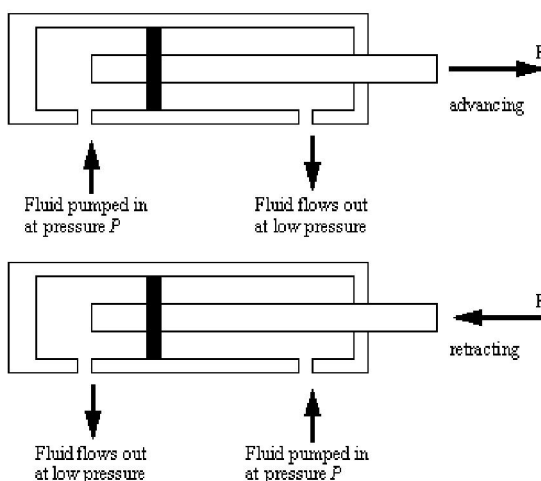
5.4.Υδραυλικοί κύλινδροι.

Οι υδραυλικοί κύλινδροι είναι τα στοιχεία που μας παρέχουν γραμμική κίνηση. Το αποτέλεσμα μιας υδραυλικής δράσης σε έναν κύλινδρο είναι η ευθύγραμμη κίνηση του εμβόλου του ή εφαρμογή κάποιας δύναμης και η παραγωγή έργου.

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες κυλίνδρων:

1. **Οι κύλινδροι απλής ενέργειας και,**
2. **Οι κύλινδροι διπλής ενέργειας.**

Κύλινδροι απλής ενέργειας: Ένας κύλινδρος απλής ενέργειας είναι ο κύλινδρος που διαθέτει μόνο μία είσοδο ρευστού από την οποία το ίδιο ρευστό επιστρέφει. Το ρευστό ωθεί έξω το έμβολο του κυλίνδρου. Η απλούστερη μορφή ενός κυλίνδρου απλής ενέργειας είναι αυτή όπου το έμβολο είναι ταυτοχρόνως και βάκτρο. Ο κύλινδρος αυτός έχει μόνο ένα θάλαμο όπου το ρευστό εισέρχεται και εξέρχεται διαδοχικά και ασκεί δύναμη προς μία κατεύθυνση. Το έμβολο εξέρχεται με την εφαρμογή της πίεσης και επιστρέφει με την εφαρμογή μιας εξωτερικής δυνάμεως, συνήθως του ίδιου του βάρους του, με την προϋπόθεση βέβαιον ότι είναι τοποθετημένος κατακόρυφα. Οι κύλινδροι αυτοί χρησιμοποιούνται ευρέως σε πρέσες. Μία άλλη μορφή κυλίνδρου απλής ενέργειας είναι αυτή του τηλεσκοπικού κυλίνδρου. Ο κύλινδρος αυτός χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου το μήκος του κυλίνδρου σε θέση ηρεμίας πρέπει να είναι πολύ μικρότερο από το μήκος του σε θέση δράσεως. Το έμβολο είναι πτυσσόμενο με 4 έως 5 πτυχές κατά μέγιστο.



For Force:

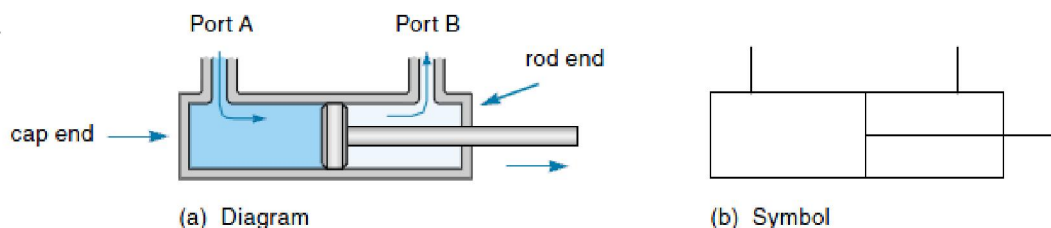
$$P = \frac{F}{A} \quad F = PA$$

where,

P = the pressure of the hydraulic fluid
 A = the area of the piston
 F = the force available from the piston rod

Σχήμα 4.18 κύλινδρος απλής ενέργειας.

Κύλινδροι διπλής ενέργειας: Οι κύλινδροι διπλής ενέργειας δέχονται ρευστό από τα δύο άκρα τους και μπορούν να δράσουν και προς τις δύο κατευθύνσεις. Είναι η πιο διαδεδομένη μορφή υδραυλικού κυλίνδρου. Ένα χαρακτηριστικό των κυλίνδρων αυτών, είναι ότι η κεφαλή του εμβόλου παρουσιάζει άνισες επιφάνειες στις δύο πλευρές, εφόσον η μία πλευρά του κυλίνδρου παρουσιάζει διαφορετικό κυβισμό. Τα αποτελέσματα είναι ότι κατά την παλινδρόμηση του κυλίνδρου εξασκούνται διαφορετικές δυνάμεις λόγω της πίεσεως του ρευστού, ενώ η ταχύτητα του κυλίνδρου κατά την εμπρός κίνηση είναι μικρότερη από την ταχύτητα επιστροφής εφόσον η παροχή του ρευστού είναι η ίδια. Στην περίπτωση όπου το χαρακτηριστικό αυτό είναι μειονέκτημα, χρησιμοποιούνται κύλινδροι με διαμπερές βάκτρο, ώστε οι εκατέρωθεν επιφάνειες του εμβόλου και οι όγκοι των δύο πλευρών του να εξισωθούν. Ένας κύλινδρος αποτελείται από το σώμα, το έμβολο, το βάκτρο, τα παράπλευρα καλύμματα και τους δακτυλίους στεγανότητας. Το σώμα των κυλίνδρων κατασκευάζεται από χαλύβδινο σωλήνα χωρίς ραφή με κατεργασία ακρίβειας στο εσωτερικό. Το έμβολο, το οποίο συνήθως είναι από χυτοσίδηρο ή χαλύβδινο διαθέτει δακτυλίους στεγανότητας, ώστε να εξασφαλίζεται η στεγανότητα της υπό πίεση πλευράς. Οι οπές του κυλίνδρου βρίσκονται στα παράπλευρα καλύμματα τα οποία προσαρμόζονται στο σώμα ή κοχλιώνονται μεταξύ τους. Οι κύλινδροι επιλέγονται αναλόγως προς τις απαιτούμενες πιέσεις, δυνάμεις και ταχύτητες. Συνήθως είναι τυποποιημένοι αλλά η ποικιλία των εφαρμογών επιβάλλει συχνά την κατασκευή κυλίνδρων ειδικά για συγκεκριμένες εφαρμογές.



Σχήμα 4.19 Κύλινδρος διπλής ενέργειας. Αριστερά το διάγραμμα του, Δεξιά η συμβολική του αναπαράσταση.

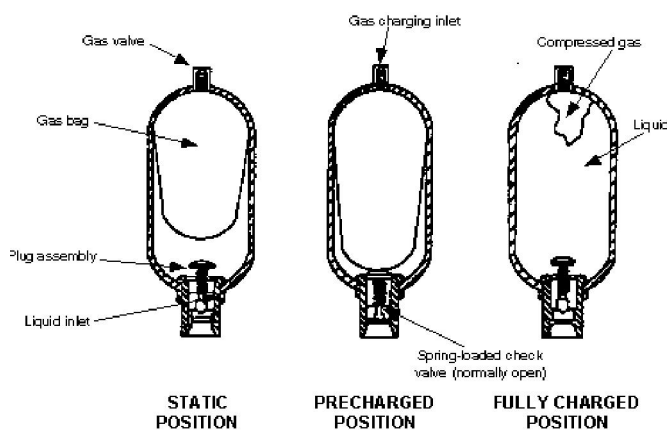
5.5.Συσσωρευτές υδραυλικής ενέργειας.

Οι συσσωρευτές υδραυλικής ενέργειας χρησιμοποιούνται στα υδραυλικά συστήματα μετάδοσης κίνησης για δύο κυρίως σκοπούς: 1) Για να συσσωρεύσουν (αποθηκεύσουν) ποσότητα πεπιεσμένου υγρού, δηλαδή να συσσωρεύσουν υδραυλική ενέργεια και 2) Για να απορροφήσουν τα εκάστοτε κρουστικά φορτία τα οποία παράγονται στο σύστημα με το απότομο κλείσιμο μίας βαλβίδας (υδραυλικό πλήγμα), ή την αντίδραση του φορτίου. Στην πρώτη περίπτωση ο συσσωρευτής υδραυλικής ενέργειας δρα όπως ο σφόνδυλος των μηχανών, ο οποίος αποθηκεύει ενέργεια όταν το φορτίο της μηχανής είναι μικρό, και αποδίδει αυτήν την ενέργεια όταν αυξάνει το φορτίο της μηχανής. Αν και η περίπτωση αυτή

είναι η πλέον συνήθης εφαρμογή των συσσωρευτών υδραυλικής ενέργειας, εντούτοις η χρήση τους επεκτείνεται σε πολλές άλλες εφαρμογές, όπως για την ταχεία πέδηση περιστροφικού κινητήρα, σε διατάξεις ανεμογεννητριών κ.α. Η φόρτιση του συσσωρευτή γίνεται όπως ακριβώς και του ηλεκτρικού συσσωρευτή (της κοινής μπαταρίας) απαιτείται δηλαδή μία πηγή ενέργειας. Στην προκειμένη περίπτωση μία υδραυλική αντλία (η οποία παίρνει κίνηση από τον άνεμο). Μία σχετικά μικρή αντλία έχει την δυνατότητα να τροφοδοτήσει με λάδι υπό πίεση έναν ή περισσότερους εν σειρά συσσωρευτές, ούτως ώστε αυτοί στην περίπτωση μεγάλης ζήτησης να αποδώσουν την αποθηκευμένη ενέργεια για να καλύψουν την μικρή παροχή της αντλίας. Η αντλία πάλι σε περίπτωση περίσσειας παραγόμενης ισχύος, συσσωρεύει λάδι στους υδραυλικούς συσσωρευτές, το οποίο όπως περιγράφηκε και πιο πάνω την κατάλληλη χρονική στιγμή θα χρειαστεί να αποδοθεί στο σύστημα ως συμπληρωματική παροχή και σε χρόνο σημαντικά μικρότερο από εκείνον τον οποίο η αντλία θα ήταν σε θέση να αποδώσει την ίδια παροχή.

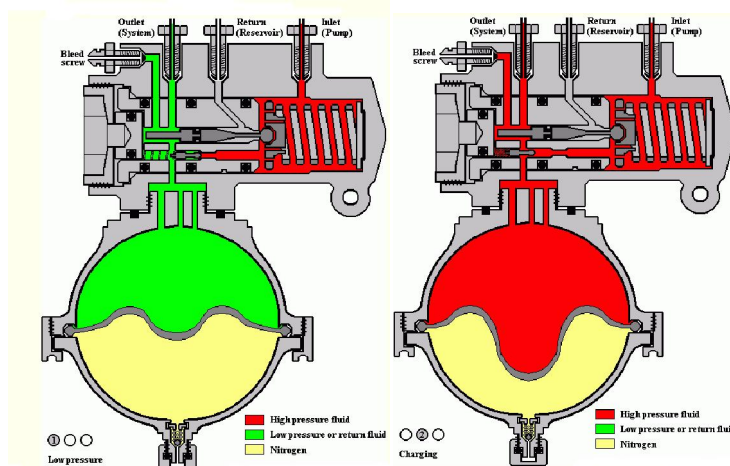
Συσσωρευτές ασκού.

Ο συσσωρευτής ασκού αποτελείται από έναν κύλινδρο με ημισφαιρικούς πυθμένες (για μεγαλύτερη αντοχή της πίεσης), όπου στο εσωτερικό του κυλίνδρου υπάρχει ένας ελαστικός ασκός. Ο ασκός αυτός πριν την είσοδο του ελαίου στο συσσωρευτή είναι γεμάτος από αέριο και καλύπτει όλο το εσωτερικό χώρο του συσσωρευτή. Στο κάτω μέρος του συσσωρευτή και ακριβώς στην είσοδο του λαδιού υπάρχει μία βαλβίδα η οποία έχει σαν σκοπό να εμποδίσει τον ασκό να εισέλθει στην οπή εισαγωγής και ενδεχομένως να καταστραφεί. Όταν το λάδι αρχίσει να εισέρχεται στον κύλινδρο εκτοπίζει τον ασκό με το αέριο συμπιέζοντας το. Η συμπίεση του αερίου και κατά ακολούθως του λαδιού συνεχίζεται μέχρις ότου η αναπτυσσόμενη πίεση (αέρος- λαδιού), να φτάσει την επιθυμητή τιμή της. Την κατάλληλη στιγμή η εκτόνωση του ασκού θα ωθήσει το λάδι προς το σύστημα, όπως ακριβώς θα έκανε μία αντλία στιγμιαίας παροχής. Ο τύπος αυτός του συσσωρευτή πλεονεκτεί από τους άλλους στο γεγονός ότι παρουσιάζει μικρή αδράνεια, που σημαίνει ταχεία αντίδραση είτε στην φόρτιση αυτού, είτε στην αποφόρτιση του. Σημαντικό όμως μειονέκτημα αυτού είναι ότι ο ελαστικός ασκός υπόκεινται σε φθορά και μάλιστα σε χημική αλλοίωση οφειλόμενη κυρίως στην χρησιμοποίηση ακατάλληλων ελαίων διατρέχοντας έτσι τον κίνδυνο ρήξης αυτού.



Σχήμα 4.15 Συσσωρευτής ασκού.

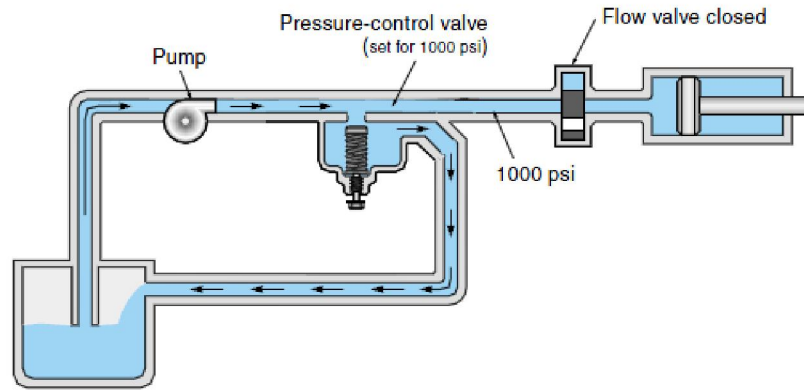
Μία παραλλαγή του συσσωρευτή τύπου ασκού είναι ο συσσωρευτής τύπου διαφράγματος που απεικονίζεται πιο κάτω. Η λειτουργία αυτού του συσσωρευτή είναι παρόμοια και με τον προηγούμενο, όμως διαφοροποιείται ως προς το σχέδιο. Ο συσσωρευτής διαφράγματος είναι σφαιρικού σχήματος και σχεδόν μέχρι το μέσον διαχωρίζει τους χώρους του υγρού και του αερίου με μία μεμβράνη. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται συσσωρευτής μεμβράνης, και οι δύο καταστάσεις φόρτισης και αποφόρτισης.



Σχήμα 4.16 Συσσωρευτής μεμβράνης. Δεξιά: Κατάσταση φόρτισης, Αριστερά: Κατάσταση αποφόρτισης.

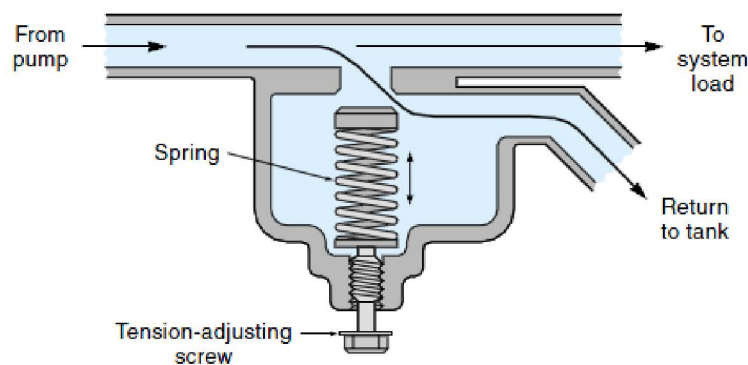
5.6.Βαλβίδες ελέγχου πίεσης.

Μία βαλβίδα ελέγχου πίεσης είναι μία σπειροειδής βαλβίδα, η οποία είναι ικανή να διατηρήσει μια σταθερή πίεση σε ένα σύστημα, ανεξάρτητα από την ταχύτητα της ροής. Αυτό είναι σημαντικό διότι οι περισσότερες αντλίες (όπως για παράδειγμα η αντλία με γρανάζια), είναι αντλία σταθερής μετατόπισης (constant displacement), διότι κάθε φορά ένας σταθερός όγκος υγρού εισάγεται μέσα στην αντλία με κάθε περιστροφή του άξονα της αντλίας. Εάν η αντλία ήταν συνδεδεμένη απευθείας στον κύλινδρο, θα έπρεπε να ξεκινά και να σταματά κάθε φορά που το πιστόνι θα μετακινούταν σε νέα θέση. Όταν μία βαλβίδα ελέγχου τοποθετηθεί στο σύστημα, η αντλία μπορεί να παραμείνει ενεργή όλο το χρονικό διάστημα και έτσι όταν η πίεση του υγρού υπερβεί το προκαθορισμένο όριο η βαλβίδα ανοίγει και το πλεόνασμα του υγρού απλά επιστρέφει στην δεξαμενή.



Σχήμα 4.17 Μία βαλβίδα ανακούφισης κυκλοφορεί το πλεόνασμα του υγρού στην δεξαμενή.

Με άλλα λόγια όταν το πιστόνι δεν κινείται, το υγρό απλά κινείται από την δεξαμενή μέσα στην αντλία μέσα στις βαλβίδες και ξανά πάλι πίσω στην δεξαμενή. Εάν η βαλβίδα ελέγχου πίεσης ανοίγει στις 1000psi, τότε η πίεση στο εσωτερικό του υδραυλικού συστήματος ποτέ δεν θα ξεπεράσει τις 1000psi. Η εικόνα που ακολουθεί δείχνει το εσωτερικό μιας απλής βαλβίδας πίεσης. Παρατηρούμε από την εικόνα ότι το πέρασμα από την αντλία στο φορτίο είναι πάντα ανοιχτό.



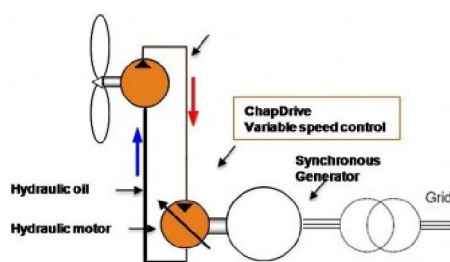
Σχήμα 4.18 Το εσωτερικό μιας βαλβίδας ελέγχου πίεσης.

5.7.Υδροστατικοί μεταφορείς κίνησης.

Γενικά κάθε διάταξη ικανή να προσαρμόσει την ροπή και τις στροφές ενός κινητήρα, σε ροπή και στροφές ανταποκρινόμενος πλήρως προς τις απαιτήσεις του φορτίου, δύναται να ονομαστεί γενικά μεταφορέας κίνησης. Υπό τον όρο υδροστατικός μεταφορέας κίνησης εννοείται ένα υδραυλικό σύστημα στο οποίο το υγρό έχει παθητικό ρόλο, σαν είδος μεταφορέα πίεσης. Υπό την ευρεία έννοια κάθε υδραυλικό σύστημα μπορεί να θεωρηθεί σαν υδροστατικός μεταφορέας κίνησης. Ο ορισμός καθίσταται ταυτόσημος με τη φύση του υδραυλικού συστήματος ενέργειας του οποίου το μέσον είναι το υγρό υπό πίεση. Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα στα συστήματα μετάδοσης κίνησης των οχημάτων, ο κύριος μεταφορέας κίνησης είναι το κιβώτιο ταχυτήτων. Εάν απλώς αντικατασταθεί το κιβώτιο ταχυτήτων με μία αντλία και ένα υδραυλικό κινητήρα και αυτά ενωθούν υδραυλικά μεταξύ τους, η συνολική διάταξη αποτελεί έναν υδραυλικό μεταφορέα κίνησης.

5.7.1. Αντικαθιστώντας τα ηλεκτρονικά ισχύος με υδραυλικά συστήματα.

Τα κλασικά υδραυλικά συστήματα μεταφοράς τυπικά αποτελούνται από μία αντλία χαμηλής πίεσης η οποία συνδέεται απευθείας στον ρότορα της ανεμογεννήτριας, από ένα κύκλωμα υψηλής πίεσης όπου ίσως συμπεριλαμβάνει και έναν υδραυλικό συσσωρευτή και τέλος έναν κινητήρα υψηλής ταχύτητας που οδηγεί την γεννήτρια. Το σχήμα που ακολουθεί απεικονίζει ένα τέτοιο υδραυλικό σύστημα που χρησιμοποιείτε σε ανεμογεννήτριες [31].



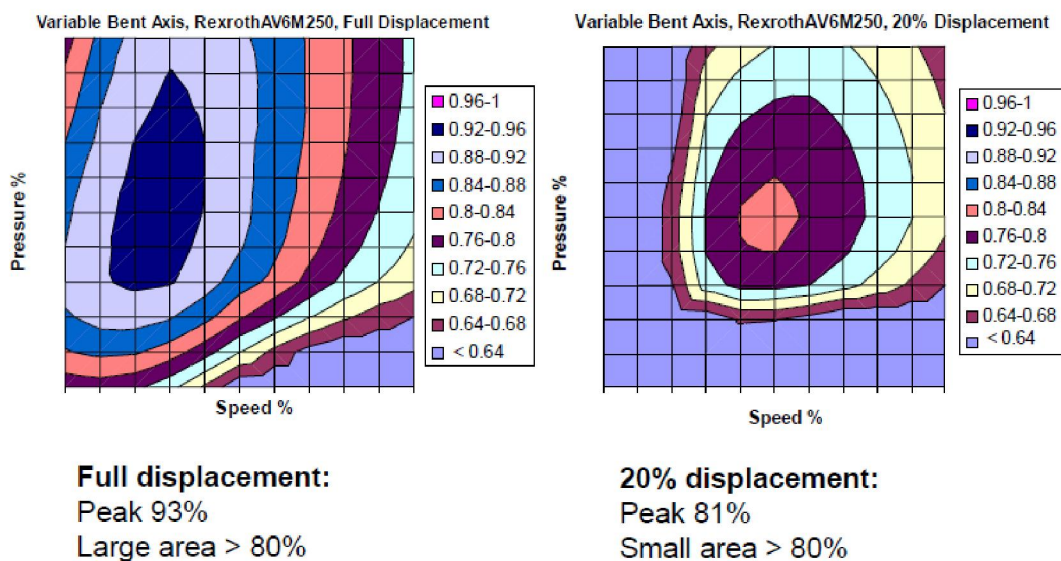
Σχήμα 4.5 Σύνδεση ανεμογεννήτριας μέσω υδραυλικών συστημάτων μετάδοσης κίνησης.

Οι ενεργειακές απώλειες που λαμβάνουν χώρα στα παλινδρομικά πιστόνια των υδραυλικών μηχανών είναι οι εξής [24].

1. **Απώλειες διάτμησης.** Καθώς ένα λεπτό στρώμα λαδιού ανάμεσα σε δύο μεταλλικά κινούμενα μέρη εξασφαλίζει ότι δεν υπάρχει επαφή μεταξύ των δύο μετάλλων, λαμβάνουν χώρα απώλειες ενέργειας λόγω τριβής, καθώς το λεπτό στρώμα λαδιού υποβάλλεται σε διάτμηση, άρα υπάρχουν τμήματα των επαφόμενων επιφανειών τα οποία δεν διαχωρίζονται από λιπαντικό έλαιο. Αυτό το είδος απώλειας τυπικά μπορεί να βρεθεί στην επαφή μεταξύ του πιστονιού και της επιφάνειας του στροφαλοφόρου άξονα.

2. **Απώλειες διαρροής.** Μεταξύ δυο κινούμενων μεταλλικών μερών δημιουργούνται κενά ανάμεσα τους , αυτά τα κενά επιτρέπουν ένα λεπτό στρώμα λαδιού να διαρρεύσει στο εσωτερικό μέρος του κυλίνδρου υψηλής πίεσης.
3. **Απώλειες συμπίεσης - Απώλειες ροής.** Οι απώλειες ροής οφείλονται στις επιπτώσεις που έχει το ιξώδες του υγρού και στις διαταραχές που δημιουργούνται όταν το ρευστό περνάει γύρω από ένα εμπόδιο.

Σε πολλές εφαρμογές μεταφοράς ισχύος ο σχεδιασμός πρέπει να αναλογιστεί για πολύ υψηλότερες αιχμές από την μέση παραγωγή ισχύος. Το αποτέλεσμα είναι ότι οι επαπτόμενες, κινούμενες επιφάνειες γίνονται μεγαλύτερες, άρα οι απώλειες λόγω των τριβών αυξάνονται. Οι μηχανικές απώλειες που αναπτύσσονται στις υδραυλικές μηχανές γενικότερα δεν διαβαθμίζονται προς τα κάτω. Έτσι και αν ακόμα η μέγιστη απόδοση των συμβατικών υδραυλικών μηχανών μπορεί να φτάσει το 95% , γενικότερα η πραγματική απόδοση της μηχανής σε λειτουργία είναι πολύ μικρότερη. Η εικόνα απεικονίζει τον βαθμό απόδοσης υπό πλήρες και υπό 20% φορτίο , σε μία συμβατική υδραυλική μηχανή.



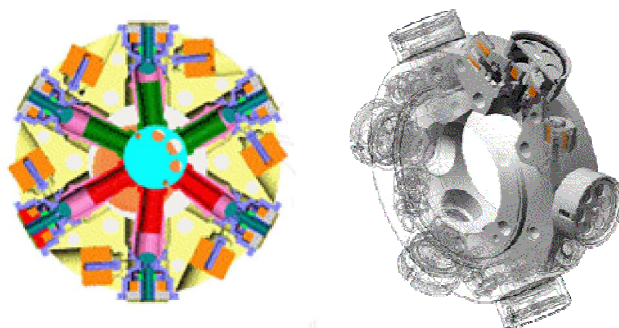
Σχήμα 4.6 Βαθμός απόδοσης των κλασικών υδραυλικών μηχανών σε πλήρες και υπό μερικό φορτίο.

Συνεπώς, το γεγονός το οποίο κατέστησε τα κλασικά υδραυλικά συστήματα απαγορευτικά για εφαρμογές αιολικών συστημάτων, ήταν ότι ενώ παρουσιάζουν μια καλή απόδοση όταν λειτουργούν υπό πλήρες φορτίο, όταν λειτουργούν υπό μερικό φορτίο η απόδοσή τους πέφτει σημαντικά. Για εφαρμογές αιολικών συστημάτων, αυτό σημαίνει ότι οι απώλειες στην μεταφορά είναι αναλογικά πολύ υψηλότερες όταν η ισχύς εισόδου από τον ρότορα της ανεμογεννήτριας είναι χαμηλότερη. Δεδομένου ότι μετάδοση πρέπει να έχει μέγεθος για πολύ μεγαλύτερα ποσά ισχύος από ότι τα μέσα επίπεδα λειτουργίας, η απόδοση υπό μερικό φορτίο είναι υψίστης σημασίας. Η τεχνολογία Digital Displacement, δίδει τη δυνατότητα μερικής απενεργοποίησης της υδραυλικής μηχανής υπό συνθήκες μερικού φορτίου, με αποτέλεσμα οι κινούμενες επιφάνειες να μειώνονται ανάλογα με το φορτίο. Συνεπώς, οι απώλειες του συστήματος σε συνθήκες μερικής φόρτισης μειώνονται δραστικά και έτσι επιτυγχάνεται αύξηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος.

5.7.2 Η τεχνολογία Digital Displacement.

Η πλειονότητα των μεγάλων μοντέρνων ανεμογεννητριών χρησιμοποιούν κιβώτια ταχυτήτων για να μετατρέψουν την χαμηλής ταχύτητας περιστροφής των πτερυγίων σε υψηλής ταχύτητας στον άξονα της γεννήτριας. Ωστόσο τα κιβώτια ταχυτήτων αποτελούν μία βαριά κατασκευή που είναι επιρρεπής σε βλάβες και που η αντικατάστασή τους είναι δαπανηρή. Η εναλλακτική μετάδοση κίνησης με ανεμογεννήτριες χρησιμοποιεί χαμηλής ταχύτητας ηλεκτρικές γεννήτριες που συνδέονται απευθείας στον άξονα της ανεμογεννήτριας (Direct Drive). Ωστόσο αυτές οι διατάξεις έχουν κόστος, βάρος και επιπλέον απαιτούν ηλεκτρονικούς μετατροπείς για την σύνδεσή τους στο δίκτυο, οι οποίοι θα πρέπει να έχουν ονομαστική ισχύ τουλάχιστον ίση με αυτή των γεννητριών. Το προτεινόμενο σύστημα χρησιμοποιεί υδραυλικές αντλίες και κινητήρες βασισμένες στην τεχνολογία Digital Displacement. Η Artemis Intelligent Power έχει αναπτύξει ένα πρότυπο σύστημα υδραυλικής μετάδοσης για ανεμογεννήτριες των 1.5 MW, το οποίο διαπιστώνεται ότι είναι μία αξιόπιστη και λιγότερο δαπανηρή λύση σε σχέση με τις προηγούμενες τεχνικές που αναφέρθηκαν πιο πάνω [27,28,29].

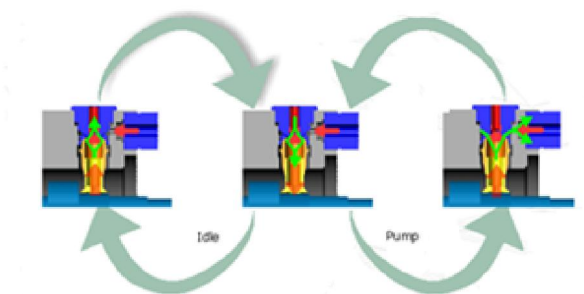
Το βασικό εξάρτημα της τεχνολογίας Digital Displacement είναι μια υδραυλική εμβολοφόρος αντλία με ενεργά ελεγχόμενες βαλβίδες διανομής οι οποίες ρυθμίζουν τη ροή ενός ρευστού εντός και εκτός μιας σειράς κυλίνδρων, που διατάσσονται ακτινικά, γύρω από το έκεντρο του στροφαλοφόρου άξονα (Σχ. 4.7). Οι βαλβίδες ελέγχονται από ένα ηλεκτρομαγνητικό μάνδαλο ώστε να ανοιγοκλείνουν με την περιστροφή του άξονα ενώ το πηνίο του κάθε μανδάλου συνδέεται απευθείας με ένα μικροεπεξεργαστή παρέχοντας έτσι ψηφιακά ελεγχόμενη ρύθμιση.



Σχήμα 4.7 Υδραυλική εμβολοφόρος αντλία έξι κυλίνδρων με την τεχνολογία της Digital Displacement.

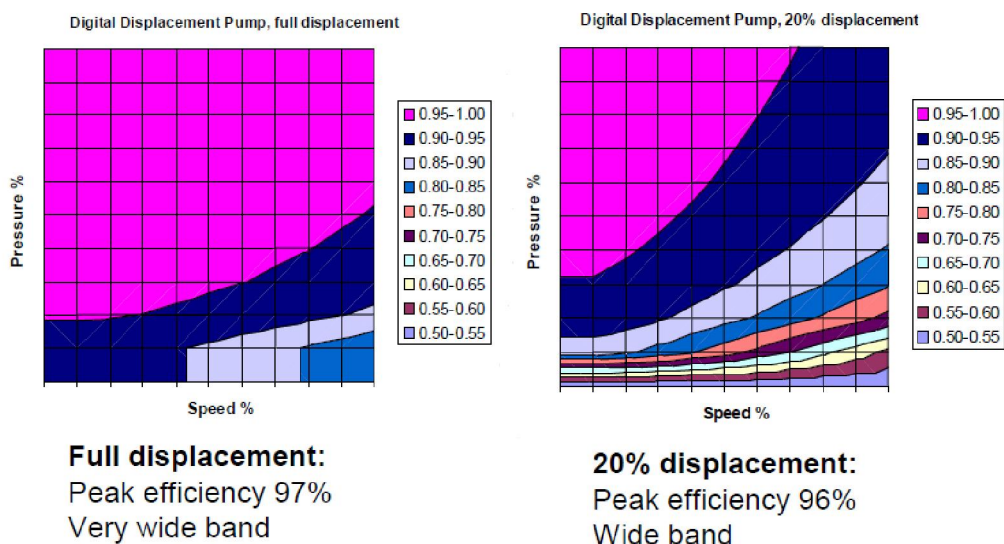
Σε κάθε κύλινδρο αντιστοιχούν δύο ενεργές βαλβίδες διανομής, στο σημείο χαμηλής και υψηλής πίεσης αντίστοιχα. Όταν το σύστημα είναι ανενεργό, (Σχ. 4.8 αριστερά), το ρευστό ρέει εντός και εκτός της βαλβίδας χαμηλής πίεσης. Η βαλβίδα υψηλής παραμένει κλειστή και απομονώνει τον κύλινδρο από το υψηλής πίεσης ρευστό. Όταν το σύστημα ενεργοποιείται, η βαλβίδα χαμηλής πίεσης κλείνει και το υψηλής πίεσης ρευστό προωθείται στον τομέα υψηλής πίεσης. Το αποτέλεσμα της ταχείας μεταγωγής της

βαλβίδας είναι ότι καθώς περιστρέφεται ο στροφαλοφόρος άξονας ο κάθε κύλινδρος εναλλάσσει τη λειτουργία του ως υδραυλική εμβολοφόρος αντλία ή κινητήρας. Ο έλεγχος της ακολουθίας λειτουργιών του κυλίνδρου (αντλία / κινητήρας) επιτρέπει στο σύστημα να αντλεί και να απορροφά υψηλής πίεσης ρευστό ενώ παράλληλα αυτή η κυκλοφορία του ρευστού βοηθά στην περιστροφή του άξονα [27].



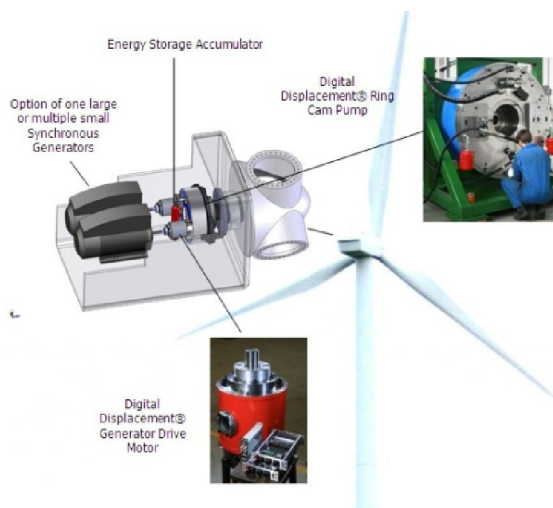
Σχήμα 4.8 Βαλβίδες της υδραυλικής αντλίας.

Το αποτέλεσμα του ελέγχου του χρονισμού των βαλβίδων και ως εκ τούτου του ελέγχου της ροής του υγρού στους κυλίνδρους έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση των απωλειών διαρροής, ωστόσο, ο έλεγχος του χρονισμού των βαλβίδων ηλεκτρονικά περιορίζει τον υψηλής συχνότητας θόρυβο που σχετίζεται με τις υπάρχουσες υδραυλικές αντλίες ή τους κινητήρες. Οι αντλίες και οι κινητήρες που εφαρμόζουν την τεχνολογία της Digital Displacement εμφανίζουν βαθμό απόδοσης περισσότερο από 90%, ακόμα και όταν λειτουργούν υπό μερικό φορτίο. Στην πραγματικότητα όπως είναι εμφανές και από τα διαγράμματα βαθμού απόδοσης που ακολουθούν μία ομοιόμορφη κατανομή της απόδοσης σε όλο το φάσμα φόρτισης.

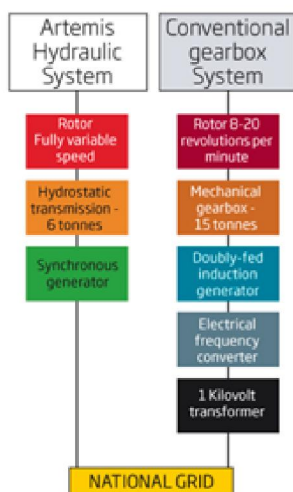


Σχήμα 4.9 Βαθμός απόδοσης της διάταξης Artemis Digital Displacement.

Σε εφαρμογές αιολικών συστημάτων όπου το μέσο φορτίο του συστήματος είναι το 30% της ισχύος αιχμής, η απόδοση ενός υδραυλικού συστήματος υπό μερικό φορτίο είναι κρίσιμο μέγεθος. Συνεπώς τα οφέλη από την χρήση μιας τέτοιας διάταξης σε ανεμογεννήτριες θα ήταν σημαντικά. Σε μία τυπική ανεμογεννήτρια ο κύρος άξονας της είναι μηχανικά συνδεδεμένος με ένα κιβώτιο ταχυτήτων και η έξοδος αυτού συνδέεται με τον άξονα της γεννήτριας. Ωστόσο είναι αποδεδειγμένο ότι αυτά τα συστήματα έχουν κάποιους περιορισμούς. Είναι σημαντικό ο μηχανικός δεσμός μεταξύ του ρότορα, του κιβωτίου ταχυτήτων και της γεννήτριας να είναι συμπαγής, ώστε η μηχανική δομή να είναι εγγενώς άκαμπτη. Αυτό προσθέτει αρκετό βάρος στην διάταξη. Επίσης κάθε απόκλιση που δημιουργείται αναπόφευκτα επιφέρει μηχανικές καταπονήσεις στο κιβώτιο ταχυτήτων πράγμα το οποίο οδηγεί στην φθορά και τελικά σε πολύ σοβαρότερα προβλήματα έως και της πλήρους καταστροφής του. Από την άλλη πλευρά, σε ένα υδραυλικό σύστημα μετάδοσης ισχύος η πτερωτή της ανεμογεννήτριας είναι συνδεδεμένη με μία υδραυλική αντλία χαμηλών στροφών (15-20 rpm), σχεδιασμένη με την τεχνολογία Digital Displacement. Η αντλία συμπιέζει υγρό (λάδι) σε αρκετά υψηλή πίεση ώστε να τροφοδοτήσει έναν υδραυλικό κινητήρα υψηλών στροφών (1.500 rpm). Οι ταχύτητες περιστροφής των 2 υδραυλικών μηχανών είναι ανεξάρτητες οι μία από την άλλη, και έτσι η ταχύτητα του κινητήρα (άρα και της ηλεκτρικής γεννήτριας) παραμένει σταθερή ακόμα και αν η ταχύτητα της υδραυλικής αντλίας μεταβάλλεται (λόγω της μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου). Αυτή η συνεχώς μεταβαλλόμενη σχέση μετάδοσης επιτρέπει στον ρότορα της ανεμογεννήτριας να λειτουργήσει με την βέλτιστη ταχύτητα και να εκμεταλλευτεί στο μέγιστο βαθμό την ενέργεια που είναι διαθέσιμη στον άνεμο, ενώ η σύγχρονη γεννήτρια που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να κινηθεί με μεγαλύτερη αλλά σταθερή ταχύτητα περιστροφής. Ένα ακόμα πλεονέκτημα, είναι ότι μέσω ενός τέτοιου συστήματος υδραυλικής μετάδοσης κίνησης η μη ύπαρξη κιβωτίου ταχυτήτων και ηλεκτρονικών μετατροπέων μειώνει το βάρος της διάταξης κατά 30-40% (η διάταξη ζυγίζει μόλις 6 τόνους αν σκεφτεί κανείς ότι ένα κοινό κιβώτιο ταχυτήτων ζυγίζει 15 τόνους!). Ακόμα χρησιμοποιώντας μία τέτοια διάταξη αποφεύγεται το πρόβλημα των ανεπιθύμητων διακυμάνσεων στην παραγωγή μίας ανεμογεννήτριας που προκαλείται λόγω της ριπής του ανέμου. Όταν οι ριπές του ανέμου προσθέτουν ένα επιπρόσθετο μηχανικό φορτίο στο κιβώτιο ταχυτήτων, στο σύστημα της AIP προστίθεται ένας υδραυλικός συσσωρευτής ο οποίος αποθηκεύει ενέργεια σε μορφή ελαίου υπό υψηλή πίεση, και την αποδίδει όποτε απαιτείται [25,28].



Σχήμα 4.10 Η διάταξη της Digital Displacement προσαρμοσμένη σε ανεμογεννήτρια.



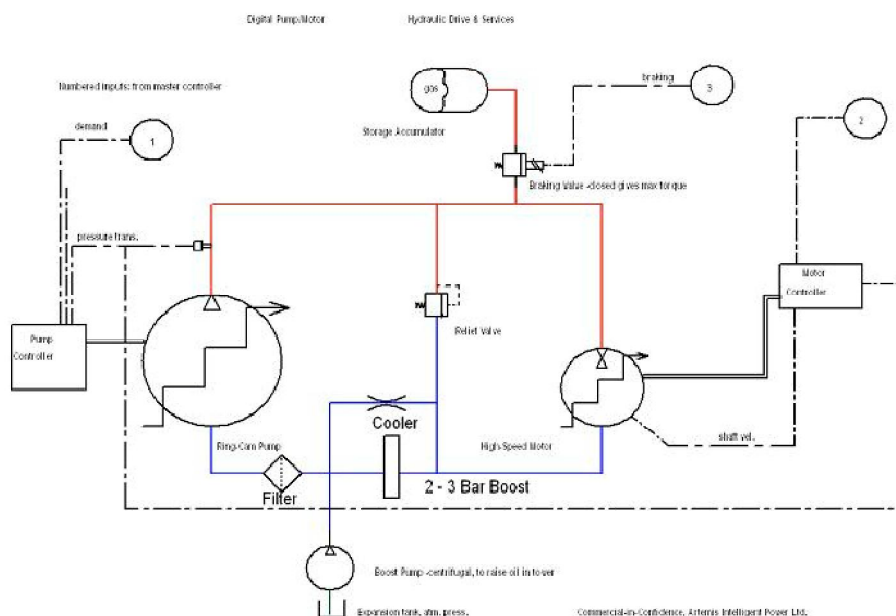
Σχήμα 4.11 Σύγκριση ανεμογεννήτριας με Digital Displacement και με κιβώτιο ταχυτήτων, συνδεδεμένη στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Επιπροσθέτως, από την μελέτη του σχήματος 4.11 συμπεραίνεται ένα ακόμα πλεονέκτημα της διάταξης που μελετήθηκε. Στις κλασικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται σήμερα υπάρχει ένας περιορισμός των στροφών, πιο συγκεκριμένα η Α/Γ θα αρχίζει η λειτουργία της από τις 8rpm και θα τίθεται εκτός στις 20rpm. Και φυσικά υπάρχει ο περιορισμός της ταχύτητας του ανέμου (4m/s-25m/s). Στην προτεινόμενη υδραυλική διάταξη μετάδοσης ισχύος δεν υπάρχει τέτοιος περιορισμός. Ο μόνος περιορισμός είναι τα όρια αντοχής των μηχανικών μερών της διάταξης.

Το σχήμα 4.12 αποτελεί το διάγραμμα λειτουργίας της διάταξης. Το λάδι ξεκινάει από μία δεξαμενή (βρίσκεται σε χαμηλή πίεση), περνά από έναν εναλλάκτη θερμότητας, και οδηγείται στην αντλία όπου πριν έχει περάσει από ένα φίλτρο για να φιλτραριστούν τυχόν ακαθαρσίες που περιέχει (ρινίσματα κ.λπ.). Στην αντλία περνάει λάδι χαμηλής πίεσης (μπλε κυκλοφορία), και εξάγεται από αυτήν λάδι σε υψηλή πίεση (κόκκινη κυκλοφορία), ένα

μέρος του οποίου πηγαίνει στην αντλία και το υπόλοιπο στον υδραυλικό κινητήρα. Ο υδραυλικός κινητήρας είναι μόνιμα, μηχανικά συνδεδεμένος με την ηλεκτρική γεννήτρια. Στο κύκλωμα επίσης υπάρχει μία βαλβίδα λίγο πριν τον συσσωρευτή, η οποία όταν κλείνει απαγορεύει την εισαγωγή λαδιού στον συσσωρευτή. Έτσι το λάδι ακολουθεί μία κυκλική πορεία χωρίς να συμπιέζεται και επειδή τα υγρά είναι ασυμπίεστα, έχει σαν αποτέλεσμα να παύει η λειτουργία της αντλίας και στην ουσία να φρενάρει το σύστημα [25].

Wind Turbine Schematic Circuit



Σχήμα 4.12 Σχηματική απεικόνιση της σύνδεσης της ανεμογεννήτριας με την διάταξη Digital Displacement.

5.8. Περίληψη-Συμπεράσματα.

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύθηκε η τεχνολογία της υδραυλικής μετάδοσης κίνησης. Στην πιο απλή του μορφή, ένα υδραυλικό σύστημα αποτελείται από μία ομάδα εξαρτημάτων όπως αντλίες, κύλινδροι, βαλβίδες, φίλτρα κ.α., ώστε συνεργαζόμενα να παράγουν έργο. Τα υδραυλικά συστήματα παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα μερικά από τα οποία είναι μεταβλητή ταχύτητα, μεγάλη ποικιλία ελέγχου, μικρός και περιορισμένος όγκος κ.α. Παρόλα αυτά, όταν εφαρμόστηκαν για πρώτη φορά σε συστήματα ανεμογεννητριών παρουσίαζαν ένα πολύ σημαντικό μειονέκτημα: αυτό του πολύ χαμηλού βαθμού απόδοσης όταν η Α/Γ λειτουργούσε υπό μερικό φορτίο. Όμως περίπου κατά το 1994 η Artemis Intelligent Power με μία καινοτόμο τεχνολογία που ανέπτυξε, κατάφερε να δημιουργήσει ένα σύστημα με αυξημένη απόδοση ακόμη και υπό μερική φόρτιση. Η προτεινόμενη διάταξη στηρίζεται σε μία ακτινικού τύπου εμβολοφόρο υδραυλική μηχανή με ηλεκτρονικά ελεγχόμενες βαλβίδες με βαθμό απόδοσης του συστήματος παραπάνω από το 90% σε όλο το φάσμα της λειτουργίας της.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα-Προοπτικές.

Είναι γνωστό, ότι τα τελευταία χρόνια υπάρχει μία ραγδαία αύξηση στη ζήτηση «καθαρής» ενέργειας, ώστε να μειωθεί κατά το δυνατόν η επιβάρυνση στο περιβάλλον. Η στρόφη προς τις ήπιες μορφές ενέργειας έδωσε ώθηση στην εξέλιξη των τεχνολογιών των συστημάτων μετατροπής της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική και στην εμπορευματοποίηση των ανεμογεννητριών. Δημιουργήθηκε λοιπόν η ανάγκη εκπόνησης εκτεταμένων ερευνών για βελτιστοποίηση των συστημάτων αυτών. Η μελέτη τους οδήγησε σε σημαντική αύξηση της αξιοπιστίας τους, παράλληλα με την αύξηση του μεγέθους και της ενεργειακής τους απόδοσης. Η ονομαστική ισχύς των ανεμογεννητριών έχει ξεπεράσει ήδη τα 3 MW φτάνοντας μέχρι και τα 5 MW, ενώ σήμερα οι πιο εμπορικές μηχανές έχουν ισχύ άνω του ενός MW. Τα προβλήματα που εμφανίζονται γενικά σε αυτά τα συστήματα σχετίζονται κυρίως με τη στοχαστική φύση της ενεργειακής πηγής τους που είναι ο άνεμος. Όπως είναι γνωστό ο άνεμος είναι μεταβαλλόμενος και φυσικά μη προβλέψιμος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα συνεχείς μεταβολές της παραγόμενης ισχύος των συστημάτων αυτών και συνεπώς συνεχείς διαταραχές στα ηλεκτρικά δίκτυα που συνδέονται, λόγω της συνεχούς διακύμανσης της τάσης και της συχνότητας, της απορρόφησης άεργου ισχύος και γενικότερα της ποιότητας της παραγόμενης ισχύος. Εξαιτίας αυτών στόχος όλων των ερευνητικών δραστηριοτήτων που πραγματοποιούνται τις τελευταίες δεκαετίες, είναι εκτός της βέλτιστης εκμετάλλευσης του αιολικού δυναμικού, η παραγωγή ηλεκτρικής με τα καλύτερα κατά το δυνατόν χαρακτηριστικά για τα ηλεκτρικά δίκτυα.

Η μέχρι σήμερα ερευνητική δραστηριότητα έδειξε ότι μόνο τα συστήματα μεταβλητών στροφών σταθερής συχνότητας οδηγούν σε βέλτιστη αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού. Τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν άλλα προβλήματα τα οποία σχετίζονται με το κόστος κατασκευής τους αλλά και με το φαινόμενο της έγχυσης αρμονικών στο δίκτυο λόγω της διακοπτικής λειτουργίας τους, αφού η εφαρμογή τους στηρίζεται στη χρήση ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος. Στην παρούσα πτυχιακή εργασία έγινε η ανάλυση και σύγκριση των μέσων μετάδοσης κίνησης που χρησιμοποιούν σήμερα οι ανεμογεννήτριες. Όπως αναφέρθηκε οι μοντέρνες ανεμογεννήτριες είτε ασύγχρονες είτε σύγχρονες (με εξαίρεση τις σύγχρονες πολυπολικές) χρησιμοποιούν κιβώτιο ταχυτήτων. Το κιβώτιο ταχυτήτων μέσω των σχέσεων μετάδοσης που έχει από τα γρανάζια, προσαρμόζει την ταχύτητα που προσλαμβάνει από τα πτερύγια του ρότορα (30-60rpm), κατάλληλη ώστε να τροφοδοτήσει την γεννήτρια η οποία είναι συνδεδεμένη στον ίδιο άξονα(1500-1800rpm). Ωστόσο αυτή η διάταξη εμφανίζει αρκετά μειονεκτήματα. Η εμπειρία έχει δείξει ότι το κιβώτιο ταχυτήτων αποτελεί μία κύρια πηγή λειτουργικών προβλημάτων για μία Α/Γ, καθώς αποτελεί μία διάταξη η οποία είναι επιρρεπή σε βλάβες, ακόμα το αυξημένο βάρος του και το κόστος συντήρησης είναι παράγοντες όπου πρέπει να αναφερθούν. Από τη άλλη πλευρά, για την σύνδεση της ανεμογεννήτριας με το δίκτυο χρησιμοποιούμε ηλεκτρονικούς μετατροπείς και

πιο συγκεκριμένα ένας 3φ ελεγχόμενος ή μη ανορθωτής που μετατρέπει τα εναλλασσόμενα ηλεκτρικά μεγέθη σε συνεχή, και ένας 3φ αντιστροφέας ο οποίος είναι συνδεδεμένος από την πλευρά του δικτύου, και που μετατρέπει τα συνεχή μεγέθη σε εναλλασσόμενα ίδιας συχνότητας με αυτής του δικτύου. Το κύριο μειονεκτήματα των συστημάτων αυτών όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, έγκειται κυρίως στην διακοπτική φύση των ηλεκτρονικών μετατροπών όπου εισάγουν ανώτερες αρμονικές στο δίκτυο. Συνεπώς, ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που αντιμετωπίζουμε κατά την σχεδίαση τέτοιων συστημάτων αιολικής ενέργειας είναι 1) Πώς μπορούμε να φτιάξουμε διατάξεις οι οποίες να εκμεταλλεύονται κατά το μεγαλύτερο δυνατό την ενέργεια που προσλαμβάνουμε από τα πτερύγια του ρότορα, 2) πώς θα κατασκευάσουμε διατάξεις οι οποίες να είναι «φιλικές» προς το δίκτυο.

Εκτός από την μελέτη και σύγκριση των συμβατικών μέσων μετάδοσης κίνησης, παρουσιάστηκε και ένας τρίτος τρόπος μετάδοσης κίνησης, μέσω υδραυλικών συστημάτων. Το υδραυλικό σύστημα είναι ένας μηχανισμός που χρησιμοποιείται για την μετάδοση κινήσεως και μεταφοράς ισχύος. Αποτελείται από ένα σύνολο εξαρτημάτων (αντλίες, κυλίνδρους κτλ.), που συνεργαζόμενα παράγουν έργο. Τα εξαρτήματα αυτά είναι υδραυλικές διατάξεις που χειρίζονται ένα ρευστό υπό πίεση, το οποίο ονομάζεται εργαζόμενο μέσο. Το ρευστό υπό πίεση είναι ένας από τους καλύτερους τρόπους μεταφοράς ισχύος και ελέγχου της κίνησης. Μπορεί να επιταχυνθεί και να επιβραδυνθεί με τέτοια ακρίβεια, ευκολία και ευελιξία που κανένα άλλο μέσο δεν προσφέρει. Η σημαντική ανάπτυξη της βιομηχανίας αιολικής ενέργειας κατέστησε αναγκαία την εύρεση κατάλληλων μηχανισμών οι οποίοι θα μετέτρεπαν την διαθέσιμη ισχύ σε ωφέλιμο έργο. Τα υδραυλικά συστήματα μετάδοσης ισχύος είναι μία από τις μεθόδους που εξετάστηκαν. Παλαιότερες έρευνες ήθελαν τα υδραυλικά συστήματα να είναι μεν αποδοτικά, όμως μόνο κατά την λειτουργία υπό πλήρες φορτίο, όπως παρουσιάστηκε και στην αντίστοιχη ανάλυση στο Κεφάλαιο 5, από τα διαγράμματα απόδοσης των κλασικών υδραυλικών συστημάτων. Η μέθοδος υδραυλικής μετάδοσης κίνησης που προτείνεται αποτελείται από μία εμβολοφόρο αντλία ακτινικού τύπου, από έναν υδραυλικό κινητήρα, και από έναν συσσωρευτή υδραυλικής ενέργειας, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους σε ένα κλειστού τύπου υδραυλικό κύκλωμα. Το ενδιαφέρον της διάταξης αυτής εστιάζεται στο ότι οι βαλβίδες της αντλίας ελέγχονται ψηφιακά μέσω ενός μικροεπεξεργαστή με αποτέλεσμα τις σημαντικά μεγαλύτερες δυνατότητες ελέγχου σε πραγματικό χρόνο, την αύξηση του βαθμού απόδοσης της διάταξης πάνω από 90% και τη βελτιστοποίηση της ποιότητας της παραγόμενης ισχύος. Η εταιρεία που σχεδίασε το σύστημα έχει λάβει επιχορηγήσεις από ερευνητικούς φορείς και από τη βιομηχανία με σκοπό την περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας, ώστε αυτή να καταστεί εμπορικά εκμεταλλεύσιμη.

Σε συνέχεια της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας, θα μπορούσαν να γίνουν τα παρακάτω:

- Προσομοίωση της λειτουργίας διάταξης στο περιβάλλον του προγράμματος *Matlab* υπό διάφορες συνθήκες
- Μελέτη των επιπτώσεων της χρήσης της τεχνολογίας στο ηλεκτρικό δίκτυο, Οικονομοτεχνική ανάλυση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από την σύγκριση με συμβατικούς τρόπους σύνδεσης ανεμογεννητριών στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Βιβλιογραφία.

- [1] 2009 European Statistics, *“Wind in Power ”*, European Wind Energy Association (EWEA).
- [2] Annual Report 2008 *“ Winning With European Wind”*, European Wind Energy Association (EWEA).
- [3] European Wind Energy Association (EWEA), *“The Facts, An analysis of Wind Energy in the EU-25”*, Executive Summary,.
- [4] J.Kabouris and N.Hatziargyriou, *“Wind Power in Greece - Current Situation, Future Developments and Prospects”*, in IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal, Canada, 18-22 June 2006.
- [5] J.F. Manwell, J.G. Mc Gowan, A.L. Rogers, *“Wind Energy Explained ”*, John Wiley & Sons, Press 2005.
- [6] Aristides E. Kiprakis, *“Increasing the capacity of distributed generation in electricity networks by intelligent generator control”*, University of Edinburgh, October 2005.
- [7] Κολοκυθάς Αναστάσιος, Φρέρης Νικόλαος, *“Τεχνο-οικονομική μελέτη αιολικού πάρκου”*, Πτυχιακή Εργασία ΑΤΕΙ Πάτρας, Μάϊος 2003.
- [8] Mika Rasila, *“Torque- and Speed Control of a Pitch Regulated Wind Turbine”*, Chalmers university of technology, Sweden 2003.
- [9] Isaac Y.F. Lun, Joseph C.Lam , *“A study of weibull Parameters using long-term wind observations”*, Renewable Energy 2000.
- [10] Μηνάς παπουτσάκης, *“Αξιοποίηση ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας σε δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας”*, Διπλωματική εργασία, Πάτρα 2009.
- [11] Stephen J. Chapman, *“Ηλεκτρικές Μηχανές DC-AC”*, Εκδόσεις Τζιόλα 2003
- [12] P.C. Krause, *“Analysis of electrical machinery”*, New York, McGraw Hill Book press 2002.
- [13] S.A Papathanassiou, M.P Papadopoulos, *“ Dynamic behavior of variable speed wind turbines under stochastic wind”* ,National technical university of Athens department of electrical and computer engineering , 1999.
- [14] M. G. Simoes, F.A. Farret, *‘Renewable Energy Systems, Design and Analysis with Induction Generator’*, CRC Press 2004.

- [15] J.G. Sloomweg, H. Polinder, W.L. Kling " *Dynamic Modelling of a Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator*", IEEE 2001.
- [16] Γ. Μπεργελές, "Ανεμοκινητήρες", εκδόσεις Συμεών.
- [17] Στάυρος Παπαθανασίου, "Συμβολή στην ανάλυση ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια για την επιλογή του ηλεκτρικού σχήματος", Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 1997.
- [18] R. Billinton, H. Chen, R. Ghajar: "A sequential technique for adequacy evaluation of generating systems including wind energy", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 11, No. 4, December 1996, pp. 727 - 734.
- [19] A. Ghorashi, S. S. Murthy, B. P. Singh, B. Singh: "Analysis of wind driven grid connected induction generators under unbalanced grid connections", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 9, No. 2, June 1994, pp. 217 - 223.
- [20] Bonus energy a/s info, "The wind turbine components and operation", 1999.
- [21] Eric Hau, "Wind turbines fundamentals, technologies, application, economics", 2nd edition, Springer.
- [22] J.G Sloomweg, H. Polinder, W.L. Kling, "Representing wind turbine electrical generating systems in fundamental frequency simulations", IEEE December 2003
- [23] Christopher T. Kilian, "Modern control technology: components and systems", 2nd edition, Delmar Thomson Learning .
- [24] G.S Payne, A.E Kiprakis, M. Ehsan, W.H.S Rampen, J.P Chick, A.R Wallace, " Efficiency and dynamic performance of Digital Displacement hydraulic transmission in tidal current energy converters", journal of POWER AND ENERGY, March 2007.
- [25] W. Rampen, " Gearless Transmissions for Large Wind Turbines – The history and Future of Hydraulic Drives", Artemis IP Ltd, Scotland.
- [26] A. Ghorashi, S. S. Murthy, B. P. Singh, B. Singh: "Analysis of wind driven grid connected induction generators under unbalanced grid connections", IEEE , June 1994,
- [27] www.artemiswind.com.
- [28] www.newscientist.com.
- [29] www.worldofrenewables.com.
- [30] www.ewea.com.
- [31] www.chapdrive.com.
- [32] <http://www.talentfactory.dk>