



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

"Μοντελοποίηση ανεμογεννήτριας για τη σύνδεση της σε ηλεκτρικό δίκτυο (Wind turbine modeling for grid connection)"

ΚΑΡΑΝΤΩΝΙΔΗΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Σχοινάς Νικόλαος, Καθηγητής

ΠΑΤΡΑ 2023

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή
Πάτρα, 14/12/2023

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Σχοινάς Νικόλαος, Καθηγητής
2. Δροσόπουλος Αναστάσιος, Καθηγητής
3. Χαραλαμπίκος Βασίλειος, Καθηγητής

Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητή

Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης έχω αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά ειδικά για τη συγκεκριμένη εργασία.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Καραντωνίδη Ευάγγελου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιοδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναφέρεται στην ανάλυση της δομής μιας ανεμογεννήτριας και έπειτα στην μοντελοποίηση και προσομοίωση λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας με επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδότησης για διασύνδεση της σε δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Η εργασία αυτή αποτελείται από πέντε κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στις έννοιες του ανέμου οι οποίες είναι βασικές στην παραγωγή ενέργειας από τον άνεμο, καθώς και αναφέρεται ανά τα χρόνια στους τρόπους εκμετάλλευσης του ανέμου και τέλος γίνεται αναφορά στα αιολικά πάρκα που υπάρχουν στην Ελλάδα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των ειδών των ανεμογεννητριών που υπάρχουν και γίνεται περιγραφή των στοιχείων από τα οποία αποτελούνται με μεγάλη έμφαση να έχει δοθεί στην ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα η οποία είναι και πιο συνηθέστερη. Γίνεται αναφορά και σε έναν νέο τύπο ανεμογεννήτριας η οποία είναι σε πειραματικό στάδιο.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των εγκαταστάσεων των αιολικών πάρκων που υπάρχουν δηλαδή των χερσαίων των παραθαλάσσιων και των υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Θα περιγραφούν οι τοποθεσίες στις οποίες επιτρέπεται και γίνεται η τοποθέτηση των ανεμογεννητριών και θα γίνει περιγραφή οι τρόποι με τους οποίους συνδέεται το κάθε πάρκο με το δίκτυο.

Στο τέταρτο κεφάλαιο θα γίνει αναλυτική περιγραφή των διπλά τροφοδοτούμενων επαγωγικών γεννητριών πως συνδέονται με τα κυκλώματα οδήγησης τους γίνεται επίσης περιγραφή και των κυκλωμάτων οδήγησης των μηχανών αυτών.

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή της μελέτης και της διαδικασίας της μοντελοποίησης του ηλεκτρικού μέρους μιας ανεμογεννήτριας της τάξης των 2MW στην επέκταση Simulink της Matlab. Στο ίδιο κεφάλαιο υπάρχουν και τα αποτελέσματα από τα πειράματα σε συνθήκες λειτουργίας την ανεμογεννήτριας καθώς και τα συμπεράσματα και οι παρατηρήσεις για αυτά.

ABSTRACT

The current thesis is focused on the analysis of the structure of a wind turbine and then on the modeling and simulation of the operation of a wind turbine with a doubly fed induction generator for grid integration.

This thesis consists of five chapters.

In the first chapter, an introduction to the concepts related to wind, which are fundamental in energy production from wind, is provided. It also discusses the methods of harnessing wind energy over the years and mentions the wind farms in Greece.

In the second chapter, various types of wind turbines are described, with a particular emphasis on horizontal axis wind turbines, which are the most common. It also references a new type of wind turbine that is in the experimental stage.

The third chapter describes the installations of wind farms, including onshore, offshore, and nearshore wind parks. It covers the locations where wind turbines can be placed and the methods by which each park is connected to the grid.

The fourth chapter provides a detailed description of doubly fed induction generators and how they are connected to their control circuits. It also discusses the control circuits of these machines.

In the fifth and final chapter, the study and the modeling process of the electrical part of a 2MW wind turbine extension using Simulink in Matlab are described. The chapter includes the results of experiments under operational conditions of the wind turbine, as well as conclusions and observations on the results.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Νικόλαο Σχοινά, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε., χωρίς του οποίου την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση δε θα ήταν δυνατό να πραγματοποιηθεί η συγκεκριμένη Εργασία.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	IV
ABSTRACT	V
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	VI
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	VII
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	IX
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Η ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	1
1.2 ΑΝΕΜΟΣ	2
1.3 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ	4
1.4 ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ BETZ.....	6
1.5 ΔΙΑΝΟΜΗ WEINBULL	7
1.6 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΟ ΠΑΡΕΛΘΟΝ	8
1.7 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΟ ΠΑΡΩΝ	9
1.8 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ.....	10
2. ΕΙΔΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	12
2.1 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ	13
2.1.1 ΜΕΡΗ ΑΠΟ ΤΑ ΟΠΟΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΙΤΑΙ ΜΙΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ	14
2.1.2 Η ΑΤΡΑΚΤΟΣ.....	15
2.1.2 ΚΥΡΙΟ ΠΛΑΙΣΙΟ	16
2.1.3 ΠΛΗΜΝΗ (HUB).....	17
2.1.3.1 ΑΚΑΜΠΤΕΣ ΠΛΗΜΝΕΣ	18
2.1.3.2 ΚΛΙΝΟΜΕΝΕΣ ΠΛΗΜΝΕΣ (TEETERING HUBS)	19
2.1.3.3 ΠΛΗΜΝΗ ΓΙΑ ΑΡΘΡΩΤΑ ΠΤΕΡΥΓΙΑ.....	20
2.1.4 ΠΤΕΡΥΓΙΑ.....	21
2.1.5 ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ (YAW SYSTEM).....	23
2.1.6 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΙΣΧΥΟΣ	25
2.1.7 ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ.....	28
2.1.8 ΤΟ ΚΙΒΩΤΙΟ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ	29
2.1.9 ΗΛΕΚΤΡΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	31
2.1.10 ΜΗΧΑΝΙΚΟ ΦΡΕΝΟ.....	38
2.1.11 ΠΥΡΓΟΣ ΚΑΙ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ.....	39
2.2 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΑΞΟΝΑ.....	41
2.2.1 SAVONIUS	42
2.2.2 Darrieus	43
2.2.3 ΠΑΡΑΛΛΑΓΕΣ ΤΩΝ DARRIEUS ΚΑΙ SAVONIUS.....	43
2.3 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ VORTEX.....	44
3 ΕΙΔΗ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ.....	46
3.1 ΧΕΡΣΑΙΟ ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ	49
3.2 ΠΑΡΑΚΤΙΟ ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ	52
3.3 ΥΠΕΡΑΚΤΙΟ ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ	53
4. ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ (DFIM).....	55

4.1 ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ (DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR – DFIG).....	55
4.2 Η ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΣΕ ΥΠΕΡΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΚΑΙ ΣΕ ΥΠΟΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΣΤΡΟΦΕΣ.....	58
4.3 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ DC-AC	63
4.3.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΑΛΜΟΔΟΤΗΣΗΣ ΕΠΙΛΕΚΤΙΚΗ ΑΠΑΛΕΙΦΗ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ	64
4.3.2 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΟΣ ΧΩΡΟΥ	65
4.4 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ AC-DC	67
4.5 ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ.....	68
5. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	69
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	84
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	85

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Τρόποι εκμετάλλυσης αιολικής ενέργειας. (https://theconversation.com/wind-power-affects-climate-cooling-and-warming-regions-around-farms-studies-claim-22988) ,(https://en.wikipedia.org/wiki/Felucca).....	1
Εικόνα 2: Διάγραμμα καταστάσεων του αέρα και η αντίστοιχη συμπεριφορά του. (https://ei.lehigh.edu/learners/energy/wind1.html)	3
Εικόνα 3: Επίδραση της μορφολογίας του εδάφους στην ταχύτητα του ανέμου. (https://openclass.teiwm.gr/modules/document/file.php/ME-ID107/%CE%95%CE%BD%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B1%20%20%CE%95%CF%80%CE%B5%CE%BE)	5
Εικόνα 4: Μεταβολή της πίεσης με το ύψος. (https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/ENV304/8.%20%CE%91%CE%B9%CE%BF%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CF%8C%20%CE%94%CF%85%CE%BD%CE%B1%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CF%8C.pdf)	5
Εικόνα 5: Σχηματική αναπαράσταση μιας ροής ρευστού μέσω μιας φτερωτής. (https://en.wikipedia.org/wiki/Betz%27s_law)	6
Εικόνα 6: Μια τυπική κατανομή Weinbull. (https://wind-data.ch/tools/weibull.php?lng=en)	7
Εικόνα 7: Μηχανή ανέμου στην αρχαιότητα. (https://en.wikipedia.org/wiki/File:Perzsa_malom.svg).....	8
Εικόνα 8: Ανεμόμυλοι. (https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_wind_power)	8
Εικόνα 9: Συγκριση μεγέθους ανεμογεννητριών. (https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_wind_power).....	9
Εικόνα 10: Χάρτης με τα αιολικά πάρκα στην Ελλάδα. (https://eletaen.gr/).....	10
Εικόνα 11: Μερικά από τα είδη ανεμογεννητριών. (https://www.researchgate.net/figure/The-major-wind-turbine-types-including-the-propeller-type-horizontal-axis-wind-turbine_fig3_263161316).....	12
Εικόνα 12: Τύποι ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα. (https://www.elprocus.com/horizontal-axis-wind-turbine/)	14
Εικόνα 13: Μέρη μιας τυπικής ανεμογεννήτριας. (https://forum.nautilia.gr/showthread.php?34578-%C8%DC%EB%E1%F3%F3%E1-%EA%E1%E9-%E5%ED%DD%F1%E3%E5%E9%E1).....	14
Εικόνα 14: Η άτρακτος της ανεμογεννήτριας της Vestas V236-15MW. (https://www.vestas.com/en/media/images).....	15
Εικόνα 15: Διαφορές στα πτερύγια της κάθε πλήμνης. (https://www.semanticscholar.org/paper/A-General-Description-and-Comparison-of-Horizontal-%C3%93skarsd%C3%B3ttir/f01a18ae95c69cb8cdb0f843a0c4941ad2de95c9)	17
Εικόνα 16: Άκαμπτη πλήμνη. (https://www.mdpi.com/1996-1073/15/9/3340).....	18
Εικόνα 17: Ανεμογεννήτρια με κλινόμενη πλήμνη. (https://www.linkedin.com/pulse/importance-fundamentals-martin-jakubowski?trk=article-ssr-frontend-pulse_more-articles_related-content-card).....	19
Εικόνα 18: Πλήμνη για αρθρωτά πτερύγια. (https://www.researchgate.net/figure/Wind-turbine-schematic-showing-degrees-of-freedom-and-geometric-parameters_fig1_252366155)	20

Εικόνα 19: Αντικεραυνικές προστασίες πτερυγίων. (https://www.researchgate.net/figure/Lightning-protection-systems-for-wind-turbine-blades-IEC-61400-24_fig1_237463514).....	22
Εικόνα 20: Μηχανισμός προσανατολισμού. (https://www.semanticscholar.org/paper/Indirect-estimation-of-the-Yaw-Angle-misalignment-a-Tsioumas-Karakasis/5fbb35a3d7cffe3034dc8218a3685dd3b6f35d97/figure/0).....	24
Εικόνα 21: Σχέδιο με τις θέσεις που μπορεί να πάρει το πτερύγιο μέσω pitch control. (https://www.researchgate.net/figure/Pitch-angle-b-and-rotational-speed-rpm-versus-wind-speed-for-a-2-MW-turbine-The_fig5_221911660).....	26
Εικόνα 22: Διαφορά μεταξύ ανεμογεννητριών με ρύθμιση γωνίας και παθητικής επιβράδυνσης. (https://www.researchgate.net/figure/Power-curves-of-fixed-pitch-and-variable-pitch-wind-turbines_fig2_266681666).....	27
Εικόνα 23: Κιβώτιο ταχυτήτων παράλληλου άξονα. (https://grabcad.com/library/wind-turbine-gearbox-1).....	30
Εικόνα 24: Πλανητικό κιβώτιο ταχυτήτων. (https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/we.1521).....	30
Εικόνα 25: Σύστημα ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών. (https://www.researchgate.net/figure/A-Wind-Turbine-with-a-Squirrel-Cage-Induction-Generator-5_fig3_245535586).....	31
Εικόνα 26: Συνδεσμολογία των τυλιγμάτων του στάτη σε 4-πολική διάταξη και έπειτα σε 8-πολική.....	32
Εικόνα 27: Σύνδεση των γεννητριών σε ανεμογεννήτρια 2 ταχυτήτων.....	32
Εικόνα 28: Σύνδεση της γεννήτριας δακτυλιοφόρου δρομέα με εξωτερικό φορτίο δρομέα.....	33
Εικόνα 29: Γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού με μετατροπείς ισχύος πλήρως ελεγχόμενους.	34
Εικόνα 30: Διάγραμμα με την διασύνδεση της γεννήτριας DFIM. (https://en.wikipedia.org/wiki/Doubly_fed_electric_machine).....	35
Εικόνα 31: Διατάξεις σύγχρονων γεννητριών.....	36
Εικόνα 32: Γεννήτρια συνεχούς ρεύματος. (https://www.electricaleasy.com/2022/09/construction-and-working-of-dc-generator.html).....	37
Εικόνα 33: Σύστημα κιβωτίου ταχυτήτων δρομέα και δισκόφρενου ανεμογεννήτριας. (https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Gearbox,_Rotor_Shaft_and_Disk_Brake_Assembly_for_Turbine_No_3_-_geograph.org.uk_-_758164.jpg).....	38
Εικόνα 34: Είδη πύργων ανεμογεννήτριας. (http://www.steelwindtower.com/wind-turbine-tower-comparison-pros-and-cons-explained/).....	40
Εικόνα 35: Ανεμογεννήτριες τύπου Savonius. a) Απλός τρίπτερος. b) Ελικοειδής τρίπτερος. c) Πύργος με πολλές πτερωτές για εκμετάλλευση ανέμου σε πολλά ύψη. (https://www.researchgate.net/figure/a-Savonius-turbines-with-Straight-bucket-19-b-Helical-bucket-c-Multi-stage_fig1_332676704).....	42
Εικόνα 36: Ανεμογεννήτρια Darrieus και παραλλαγές της. a) Darrieus b) H - Rotor c) Darrieus ελικοειδής. (https://www.quora.com/What-is-a-vertical-wind-turbine).....	43
Εικόνα 37: Σχέδιο της κατασκευής με τις θέσεις λειτουργίας. (https://vortexbladeless.com/technology/#papers).....	45
Εικόνα 38: Σχέδιο με την αλληλεπίδραση των μαγνητών και των τυλιγμάτων. (https://vortexbladeless.com/technology/#papers).....	45
Εικόνα 39: Αιολικό πάρκο στην Αργολίδα. (https://zogaris.blogspot.com/2017/12/wind-turbines-in-protected-areas-mount.html).....	50

Εικόνα 40: Αιολικό πάρκο σε πεδιάδα στο Roscoe, Texas. (https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%B9%CE%BF%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CF%8C_%CF%80%CE%AC%CF%81%CE%BA%CE%BF)	51
Εικόνα 41: Είδη θεμελίων ανεμογεννητριών στην θάλασσα. (https://www.researchgate.net/figure/Types-of-offshore-wind-turbine-foundations-reproduced-from-ref-102-source-Principle_fig4_266086383)	52
Εικόνα 42: Οι συνδέσεις μέσω DC δικτύου. (https://eepower.com/technical-articles/dc-dc-power-converter-for-offshore-wind-farm-integration/)	54
Εικόνα 43: Η διασύνδεση ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου. (https://northsearegion.eu/northsee/e-energy/existing-offshore-linear-energy-infrastructure-and-grid-connections/)	54
Εικόνα 44: Συνδεσμολογία της μηχανής και διάγραμμα ταχύτητας γεννήτριας και ταχύτητας ανέμου. (https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0309524X19877525)	56
Εικόνα 45: Τα είδη των φίλτρων. (Βιβλίο 3)	57
Εικόνα 46: Παράδειγμα με χαρακτηριστικές ισχύος - ταχύτητας σε μια γεννήτρια DFIG.(Βιβλίο 3)	58
Εικόνα 47: Ροή της ισχύος σε μια DFIG σε υπερσύγχρονες και υποσύγχρονες στροφές.(Βιβλίο 3)	59
Εικόνα 48: το ισοδύναμο κύκλωμα της μηχανής μαζί με τον μετατροπέα από την πλευρά του δρομέα (RSC). (Βιβλίο 3)	60
Εικόνα 49: Ροή της ισχύος σε υπερσύγχρονες και υποσύγχρονες στροφές.(Βιβλίο 3)	62
Εικόνα 50: Σχηματικό του μετατροπέα πηγής ρεύματος. (Βιβλίο 3)	63
Εικόνα 51: Παλμοδότηση μιας φάσης. (Βιβλίο 3)	64
Εικόνα 52: Καταστάσεις των διακόπτων και τα διανύσματα τους. (Βιβλίο 3)	65
Εικόνα 53: Διάγραμμα χώρου διανυσμάτων. (Βιβλίο 3)	66
Εικόνα 54: Μετατροπέας AC-DC. (Βιβλίο 3)	67
Εικόνα 55: Γωνία συντελεστή ισχύος χωρισμένη σε τεταρτημόρια. (Βιβλίο 3)	68
Εικόνα 56: Το κύκλωμα εξομοίωσης	69
Εικόνα 57: Ταχύτητα ανέμου σε σχέση με τον χρόνο.	70
Εικόνα 58: Στροφές την ανεμογεννήτριας σε σχέση με τον χρόνο.	70
Εικόνα 59: Μεταβολή της γωνίας των πτερυγίων σε σχέση με τον χρόνο.	71
Εικόνα 60: Η ενεργός ισχύς στην έξοδο της ανεμογεννήτριας.	72
Εικόνα 61: Η άεργος ισχύς στην έξοδο της ανεμογεννήτριας.	73
Εικόνα 62: Η ενεργός ισχύς στην αρχή και στο τέλος της γραμμής μεταφοράς.	74
Εικόνα 63: Η άεργος ισχύς στην αρχή και στο τέλος της γραμμής μεταφοράς.	75
Εικόνα 64: Σφάλμα μεταξύ δύο φάσεων.	76
Εικόνα 65: Ενεργός ισχύς της γεννήτριας με πολικό σφάλμα.	77
Εικόνα 66: Σταθερές ασφαλείας της ανεμογεννήτριας.	77
Εικόνα 67: Άνεργος ισχύς της γεννήτριας με πολικό σφάλμα.	78
Εικόνα 68: Η ενεργός ισχύς στην αρχή και στο τέλος της γραμμής μεταφοράς σε δοκιμή πολικού βραχυκυκλώματος.	78
Εικόνα 69: Η άεργος ισχύς στην αρχή και στο τέλος της γραμμής μεταφοράς σε δοκιμή πολικού βραχυκυκλώματος.	79
Εικόνα 70: Ενεργός ισχύς της γεννήτριας με φασικό σφάλμα.	81
Εικόνα 71: Άνεργος ισχύς της γεννήτριας με φασικό σφάλμα.	81
Εικόνα 72: Η ενεργός ισχύς στην αρχή και στο τέλος της γραμμής μεταφοράς σε δοκιμή φασικού βραχυκυκλώματος.	82

Εικόνα 73: Η άεργος ισχύς στην αρχή και στο τέλος της γραμμής μεταφοράς σε δοκιμή φασικού βραχυκυκλώματος. 82

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Η ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Αιολική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση του ανέμου. Η ενέργεια αυτή χαρακτηρίζεται "ήπια μορφή ενέργειας" και περιλαμβάνεται στις "καθαρές" πηγές, όπως συνηθίζονται να λέγονται οι πηγές ενέργειας που δεν εκπέμπουν ή δεν προκαλούν ρύπους. Έχει πολύ μικρότερο αντίκτυπο στο περιβάλλον σε σχέση με την καύση ορυκτών καυσίμων.

Είναι ένα «καύσιμο» το οποίο είναι άφθονο υπάρχει σχεδόν παντού, είναι δωρεάν και υπάρχουν πολλοί τρόποι να το εκμεταλλευτεί κανείς.

Λόγω του ότι υπάρχει παντού δεν μπορεί να στερηθεί από κανέναν αντίθετα με τα ορυκτά καύσιμα.

Η βασική ιδέα είναι η μετατροπή της κινητικής ενέργειας των εν κινήσει αέριων σωμάτων σε μηχανική με τη χρήση πτερυγίων και έπειτα σε ότι χρειάζεται η εκάστοτε εφαρμογή.



Εικόνα 1: Τρόποι εκμετάλλευσης αιολικής ενέργειας. (<https://theconversation.com/wind-power-affects-climate-cooling-and-warming-regions-around-farms-studies-claim-22988>) , (<https://en.wikipedia.org/wiki/Felucca>)

1.2 ANEMΟΣ

Άνεμο ονομάζουμε όποια αναίσθητη «οριζόντια κίνηση» του αέρα, όποια αισθητή «κατακόρυφη κίνηση» του αέρα ονομάζεται ρεύμα, αν είναι από κάτω προς τα επάνω λέγεται ανοδικό ρεύμα, ενώ αν είναι από επάνω προς τα κάτω λέγεται καθοδικό ρεύμα.

Αιτία της δημιουργίας του ανέμου είναι ότι οι αέριες μάζες της ατμόσφαιρας που περιβάλλουν την Γη βρίσκονται σε συνεχή «οριζόντια» και «κατακόρυφη» κίνηση.

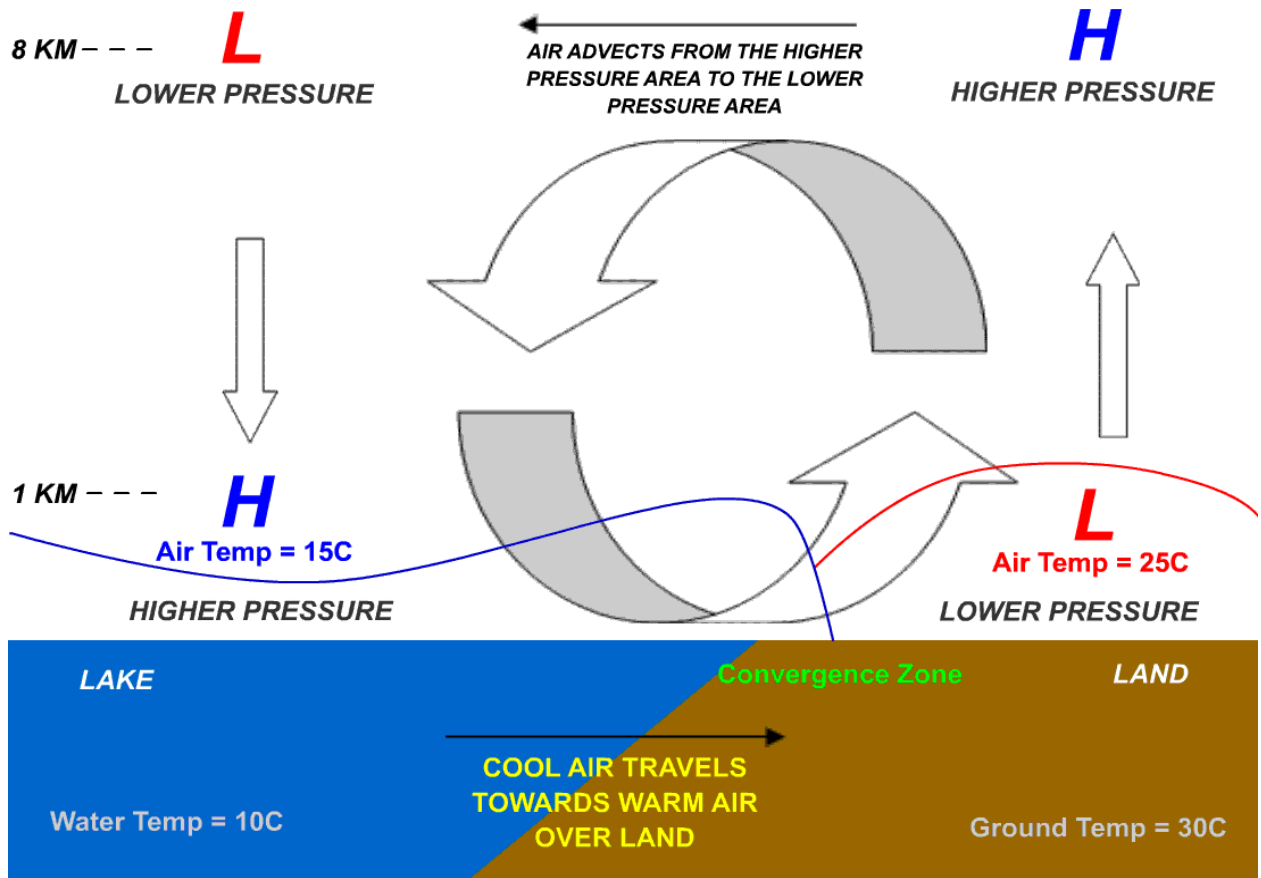
Η αιτία που αυτές οι αέριες μάζες βρίσκονται σε συνεχή κίνηση είναι η θερμοκρασία. Όταν τα αέρια ζεσταίνονται τα άτομα και τα μόρια που τα απαρτίζουν κινούνται πιο γρήγορα, απλώνονται και ανεβαίνουν. Για αυτό και ο ατμός που βγαίνει από μια κατσαρόλα με βραστό νερό πηγαίνει προς τα επάνω. Αντίθετα, όταν ο αέρας είναι κρύος τα μόρια κινούνται αργά και βρίσκονται πιο κοντά μεταξύ τους. Ο ήλιος ζεσταίνει τον αέρα αλλά το κάνει άνισα. Επειδή ο ήλιος χτυπά διαφορετικά μέρη της γης σε διαφορετικές γωνίες και επειδή η Γη έχει ωκεανούς, βουνά και άλλα χαρακτηριστικά, ορισμένα μέρη είναι θερμότερα από άλλα. Έτσι δημιουργούνται θύλακες ζεστού και κρύου αέρα.

Από την στιγμή που τα αέρια συμπεριφέρονται διαφορετικά σε διαφορετικές θερμοκρασίες δημιουργούνται και θύλακες χαμηλής και υψηλής πίεσης. Η πίεση εξαρτάται από την θερμοκρασία, έτσι όταν έχουμε υψηλή θερμοκρασία έχουμε και χαμηλή πίεση δηλαδή τα μόρια του αέρα είναι πιο αραιά μεταξύ τους. Αφού δημιουργηθούν αυτές οι συνθήκες τα αέρια μετακινούνται από περιοχές υψηλής πίεσης σε περιοχές χαμηλής πίεσης. Όσο μεγαλύτερη είναι διάφορα ανάμεσα στις πιέσεις τόσο πιο γρήγορα ο αέρας μετακινείται. Αυτή η μετακίνηση αερίων είναι ο άνεμος που εμείς καταλαβαίνουμε.

Το φαινόμενο της διάχυσης (diffusion) είναι ο λόγος που τα μόρια αερίων μετακινούνται από περιοχές υψηλής πίεσης σε περιοχές χαμηλής. Η διάχυση είναι η “καθαρή” κίνηση του οτιδήποτε (άτομα, ιόντα, μόρια, ενέργεια), γενικά από μια περιοχή υψηλής συγκέντρωσης σε μια περιοχή χαμηλότερης συγκέντρωσης με σκοπό την εξισορρόπηση τους.

Τα κύματα Rossby είναι ακόμα μια παράμετρος από την οποία εξαρτάται η ταχύτητα των ανέμων. Είναι ισχυροί άνεμοι στην άνω τροπόσφαιρα.

Αυτά λειτουργούν σε παγκόσμια κλίμακα και μετακινούνται από την Δύση στην Ανατολή. Τα κύματα Rossby είναι από μόνα τους μια διαφορετική ταχύτητα από αυτή που βιώνουμε εμείς στην κάτω τροπόσφαιρα. Οι καιρικές συνθήκες αποτελούν ρόλο κλειδί στην ταχύτητα του ανέμου καθώς ο σχηματισμός τυφώνων, μουσώνων και κυκλώνων μπορούν να επηρεάσουν δραστικά την ένταση του ανέμου.



Εικόνα 2: Διάγραμμα καταστάσεων του αέρα και η αντίστοιχη συμπεριφορά του. (<https://ei.lehigh.edu/learners/energy/wind1.html>)

Η διεύθυνση του άνεμου μεταβάλλεται με τον χρόνο και χαρακτηρίζεται από το σημείο του ορίζοντα απ' όπου πνέει ο άνεμος και όχι προς τα που πνέει ο άνεμος. Εκφράζεται δε είτε σε μοίρες (αρχής γενομένης από τον γήινο μαγνητικό Βορρά), είτε με σύμβολα ανεμολογίου. Οι άνεμοι χαρακτηρίζονται με πολλά ονόματα ανάλογα τον τόπο, την ένταση και την διεύθυνση τους. Στην Ελλάδα οι άνεμοι ανάλογα με την διεύθυνση προέλευσης τους φέρουν δυο ονόματα ένα επίσημο και ένα κοινό.

1.3 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ

Η ταχύτητα ή αλλιώς η ένταση του ανέμου έχει μονάδα τα μέτρα ανά δευτερόλεπτο (m/s). Εξαρτάται από τη διαφορά πίεσης δυο σημείων, όσο μεγαλύτερη είναι διαφορά στα σημεία χαμηλής και υψηλής πίεσης τόσο πιο μεγαλύτερη ένταση θα έχει ο άνεμος που δημιουργείται.

Η ισχύς που παρέχει ο άνεμος στην ανεμογεννήτρια είναι ανάλογος του κύβου της ταχύτητας του ανέμου, όπως παρουσιάζεται παρακάτω. Είναι λοιπόν απαραίτητο να γνωρίζουμε με λεπτομέρεια τον άνεμο και τα χαρακτηριστικά του για να μπορούμε να υπολογίσουμε την απόδοση της ανεμογεννήτριας με ακρίβεια. Είναι κοινώς γνωστό ότι μεγάλες ταχύτητες ανέμων απαντώνται στις κορυφές των λόφων, σε εκτιθέμενες από τον άνεμο ακτές και στα πελάγη. Χρειάζεται να γίνουν γνωστές διάφορες παράμετροι του ανέμου, όπως η μέση ταχύτητα, η κατεύθυνση, οι μεταβολές γύρω από τη μέση ταχύτητα σε μικρό χρονικό διάστημα (θύελλες), οι ημερήσιες, εποχιακές και ετήσιες μεταβολές και οι μεταβολές ανάλογα με το ύψος του εδάφους.

$$W = \frac{1}{2} * (\rho AV^3)$$

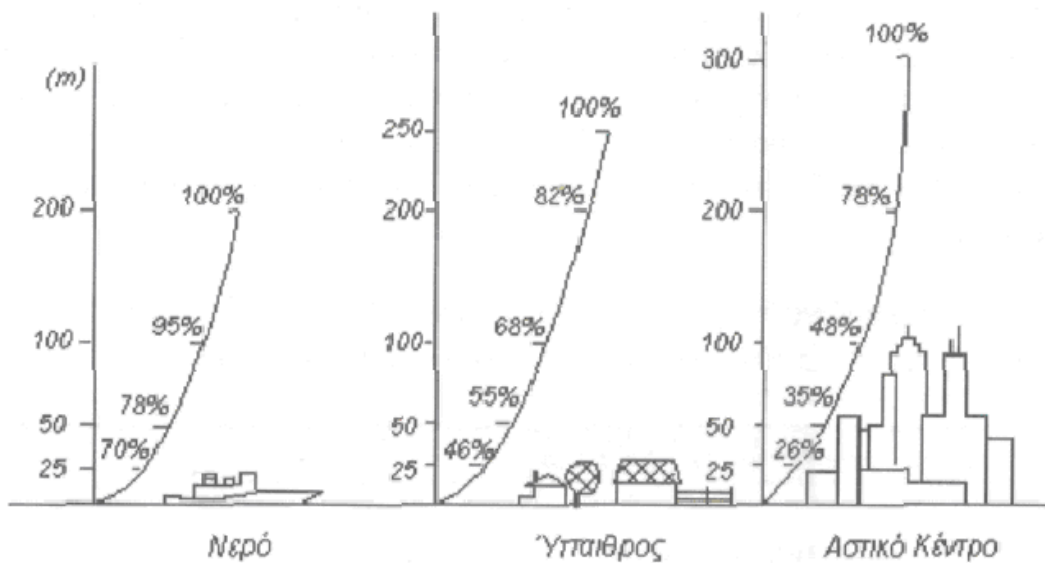
- Οπου ρ είναι η πυκνότητα του αέρα
- V η ταχύτητα του ανέμου
- και A η επιφάνεια μέσω της οποίας ρέει

Οι παράμετροι αυτές είναι διαφορετικές για κάθε τόπο και μπορούν να προσδιοριστούν με ικανό αριθμό επακριβών μετρήσεων, για μεγάλη χρονική περίοδο, σε έναν ορισμένο τόπο. Οι παράμετροι αυτές χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της απόδοσης και των οικονομικών ενός αιολικού σταθμού παραγωγής ενέργειας.

Η ροή του ανέμου σε μικροκλίμακα επηρεάζεται από τοπικά εμπόδια όπως κτήρια, δέντρα και φύση του εδάφους πχ από το αν υπάρχουν οργωμένα χωράφια ή αν τα χωράφια περιέχουν φυτά. Περιοχές με νερό, όπως λίμνες ή θάλασσα επηρεάζουν επίσης αυτή τη ροή. Η τριβή του ανέμου με την εκάστοτε επιφάνεια εδάφους προκαλεί διακυμάνσεις στη ροή του, οπότε η ταχύτητά του μεταβάλλεται ανάλογα με τον τόπο και το χρόνο

Τέλος η ενέργεια του ανέμου εξαρτάται όπως είδαμε από τον παραπάνω τύπο ότι εξαρτάται και από την πυκνότητα του αέρα η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη με το υψόμετρο, το οποίο σημαίνει ότι μπορεί σε μεγάλο υψόμετρο να έχουμε ταχύτερους ανέμους αλλά είναι πιο αραιοί.

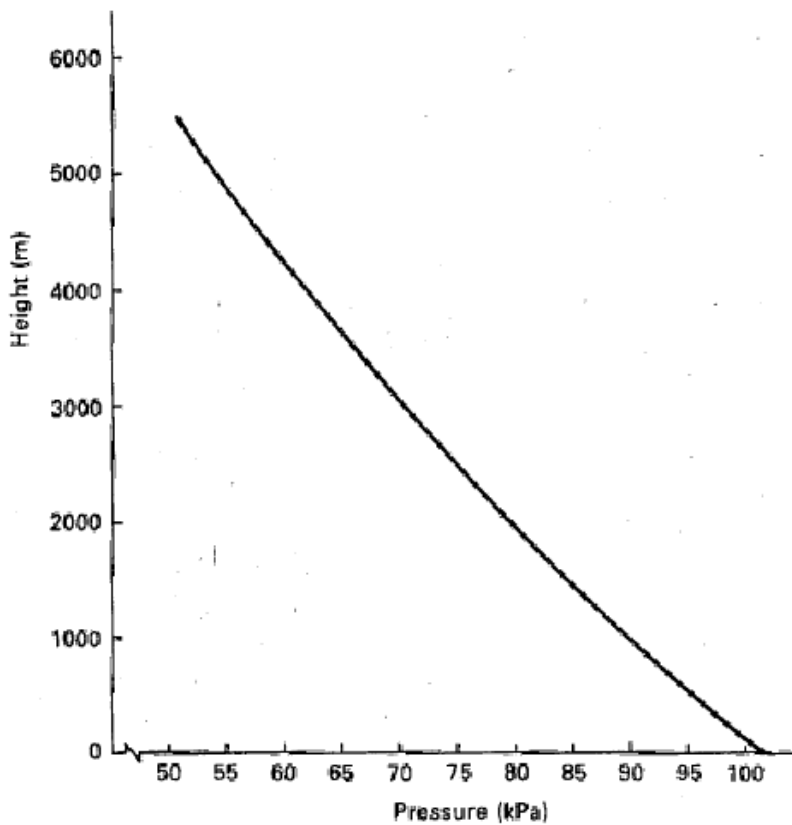
Για τον υπολογισμό της ταχύτητας του ανέμου και της πυκνότητας, χρειάζονται μετρήσεις στην περιοχή για εκτεταμένο χρονικό διάστημα από μετεωρολογικούς σταθμούς, έπειτα να γίνει στατιστική ανάλυση και να υπολογιστούν η μέση ταχύτητα και πυκνότητα.



Εικόνα 3: Επίδραση της μορφολογίας του εδάφους στην ταχύτητα του ανέμου.

(<https://openclass.teiwm.gr/modules/document/file.php/ME-ID107/%CE%95%CE%BD%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B1%206%20%CE%95%CF%80%CE%B5%CE%BE%CE%B5%CF%81%CE%B3%CE%B1%CF%83%CE%AF%CE%B1%20%26%20%>)

(<https://openclass.teiwm.gr/modules/document/file.php/ME-ID107/%CE%95%CE%BD%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B1%206%20%CE%95%CF%80%CE%B5%CE%BE%CE%B5%CF%81%CE%B3%CE%B1%CF%83%CE%AF%CE%B1%20%26%20%>)



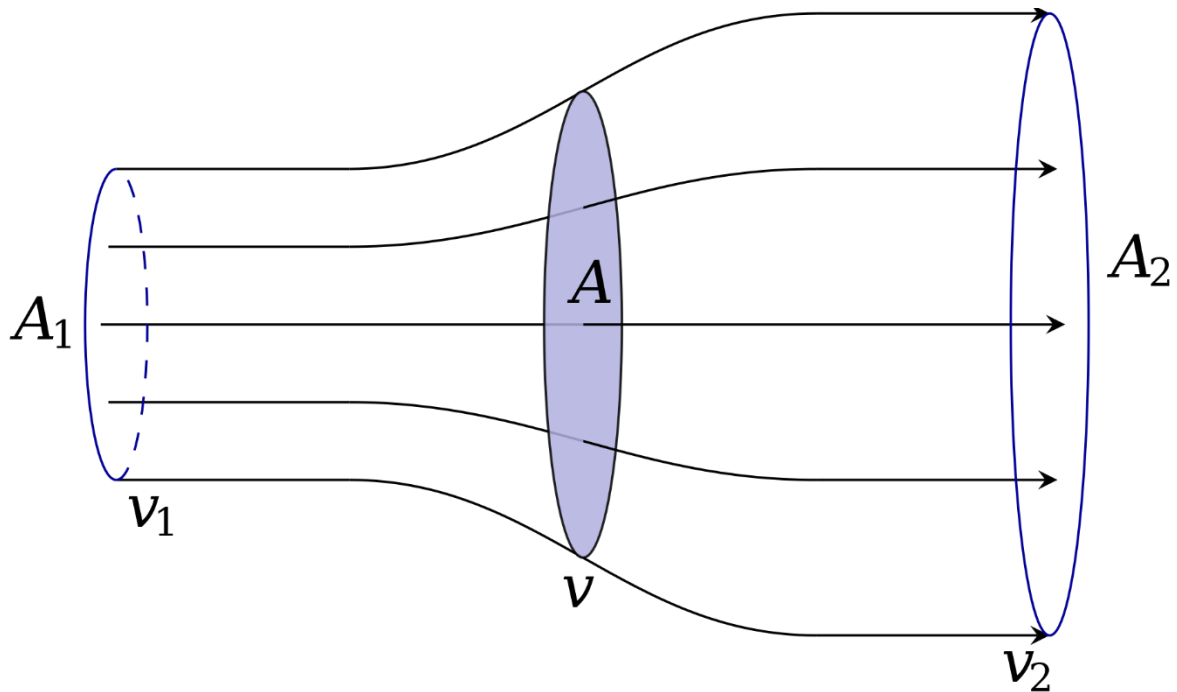
Εικόνα 4: Μεταβολή της πίεσης με το ύψος.

(<https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/ENV304/8.%20%CE%91%CE%B9%CE%BF%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CF%8C%20%CE%94%CF%85%CE%BD%CE%B1%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CF%8C.pdf>)

1.4 ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ BETZ

Ο νόμος του Betz αποδεικνύει ότι η μέγιστη ισχύ που μπορεί να εξαχθεί από τον άνεμο, ανεξάρτητα από το σχεδιασμό μιας ανεμογεννήτριας. Εκδόθηκε το 1919 από τον Γερμανό φυσικό Άλμπερτ Μπέτς. Σύμφωνα με το νόμο του Betz, καμία ανεμογεννήτρια δεν μπορεί να εκμεταλλευτεί περισσότερο από το $16/27$ (59,3%) της κινητικής ενέργειας του ανέμου. Ο συντελεστής $16/27$ (0,593) είναι γνωστός ως συντελεστής Betz. Οι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά δίκτυα επιτυγχάνουν το 75 – 80% του ορίου Betz όταν βρίσκονται σε μέγιστη απόδοση.

Οι ανεμογεννήτριες λειτουργούν με το να επιβραδύνουν τον διερχόμενο άνεμο με σκοπό την εξαγωγή ενέργειας. Εάν μια ανεμογεννήτρια ήταν 100% αποδοτική, τότε όλος ο άνεμος θα έπρεπε να σταματάει όταν έρχεται σε επαφή με την ανεμογεννήτρια, κάτι που δεν είναι δυνατό. Προκείμενου να σταματήσει εντελώς ο άνεμος, ο αέρας δεν θα απομακρυνόταν από το πίσω μέρος της ανεμογεννήτριας, κάτι που θα εμπόδιζε την είσοδο περαιτέρω αέρα και θα προκαλούσε διακοπή της περιστροφής της ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 5: Σχηματική αναπαράσταση μιας ροής ρευστού μέσω μιας φτερωτής. (https://en.wikipedia.org/wiki/Betz%27s_law)

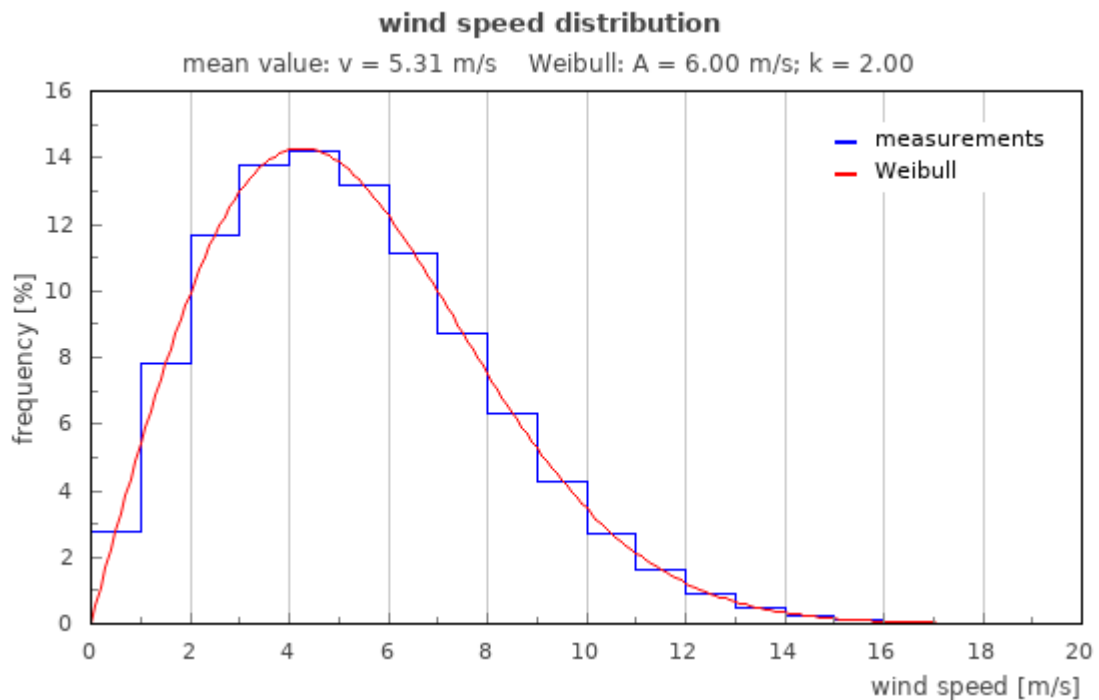
1.5 ΔΙΑΝΟΜΗ WEINBULL

Η διακύμανση του ανέμου σε μια τυπική τοποθεσία περιγράφεται συνήθως χρησιμοποιώντας τη λεγόμενη κατανομή Weibull.

Είναι πολύ σημαντικό για την αιολική βιομηχανία να μπορεί να περιγράψει τη διακύμανση των ταχυτήτων του ανέμου.

Εάν μετρήσουμε τις ταχύτητες του ανέμου κατά διάρκεια ενός έτους σε μια περιοχή, θα παρατηρήσουμε ότι οι ισχυροί άνεμοι είναι σπάνιοι, ενώ οι μέτριες και χαμηλής έντασης αρκετά συνηθισμένοι, αυτή η διακύμανση μπορεί να περιγραφεί από την κατανομή Weibull.

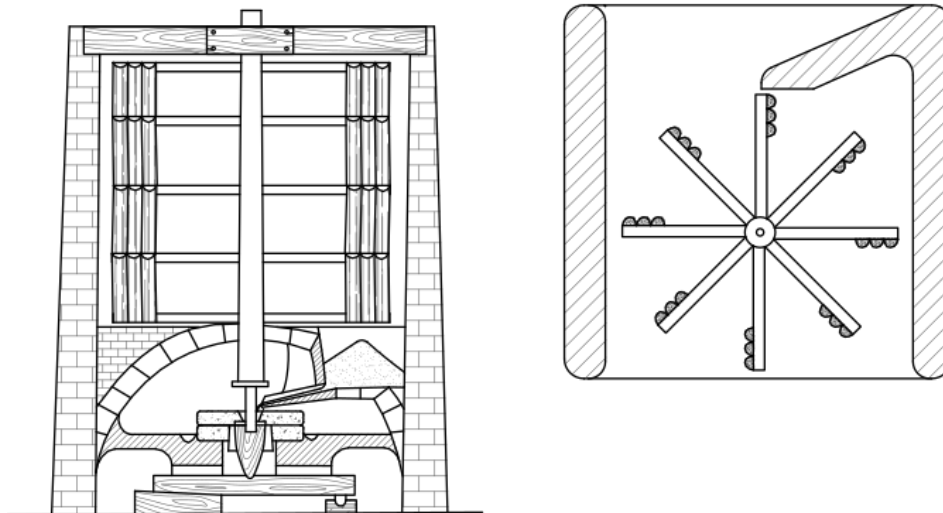
Για να οριστεί μια καλή κατανομή Weibull θα πρέπει να γίνουν μετρήσεις στην τοποθεσία που μελετάμε για μεγάλα χρονικά διαστήματα της τάξης των 2 με 3 ετών έτσι ώστε να έχουμε μια καλή εικόνα για το δυναμικό της περιοχής.



Εικόνα 6: Μια τυπική κατανομή Weibull. (<https://wind-data.ch/tools/weibull.php?lng=en>)

1.6 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΟ ΠΑΡΕΛΘΟΝ

Ο άνθρωπος εκμεταλλεύεται από την αρχαιότητα την δύναμη του ανέμου, με τη χρήση ιστίων στα πλοία τους για μπορούν να ταξιδεύουν όμως η κοντινότερη κατασκευή σε ανεμογεννήτρια ήταν οι μηχανές ανέμου οι οποίες εκτιμώνται ότι έχουν κατασκευαστεί τον 9^ο αιώνα μ.Χ. στην Μεσοποταμία, αυτές οι μηχανές μετέτρεπαν την κινητική ενέργεια του αέρα σε μηχανική για άντληση νερού και κατασκευαστικά ήταν σαν τις κάθετες ανεμογεννήτριες του σήμερα. Ήταν ξύλινες και τα πτερύγια ήταν από πανί.



Εικόνα 7: Μηχανή ανέμου στην αρχαιότητα. (https://en.wikipedia.org/wiki/File:Perzsa_malom.svg)

Η κατασκευή των πρώτων μηχανών αέρα οριζοντίου άξονα κατασκευάστηκαν κατά τα τέλη του μεσαίωνα κατά τον 12^ο αιώνα στην Ευρώπη.



Εικόνα 8: Ανεμόμυλοι. (https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_wind_power)

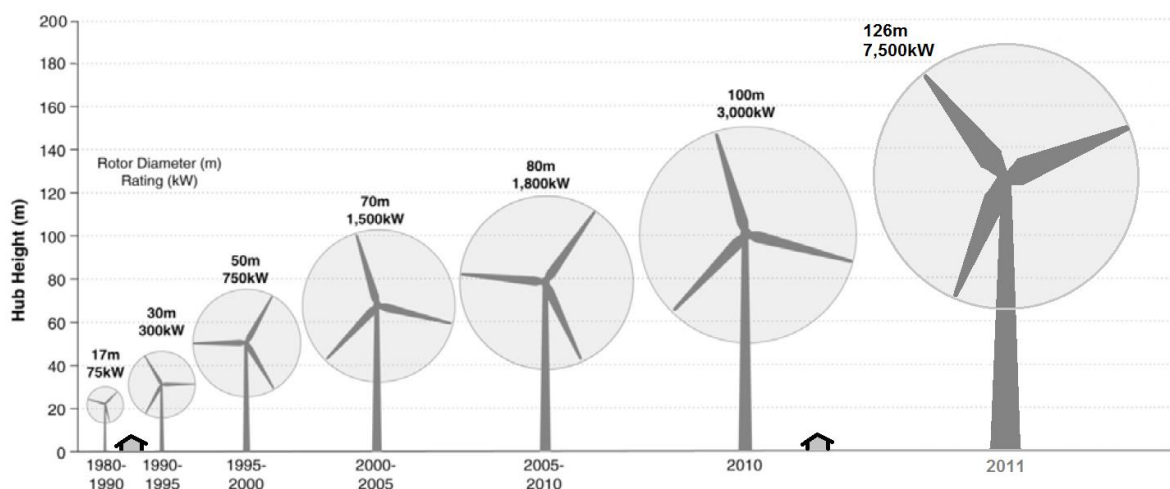
Η πρώτη ανεμογεννήτρια κατασκευαστή το 1887 στην Γλασκόβη από τον James Blyth. Ήταν μια κάθετη ανεμογεννήτρια και είχε πτερύγια από πανί.

Την επόμενη χρονιά στη Αμερική κατασκεύασε την πρώτη ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα η οποία είχε δυναμό για να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα και τροφοδοτούσε μπαταρίες, κινητήρες, λαμπτήρες πυρακτώσεως και 3 λαμπτήρες τόξου.

1.7 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΟ ΠΑΡΩΝ

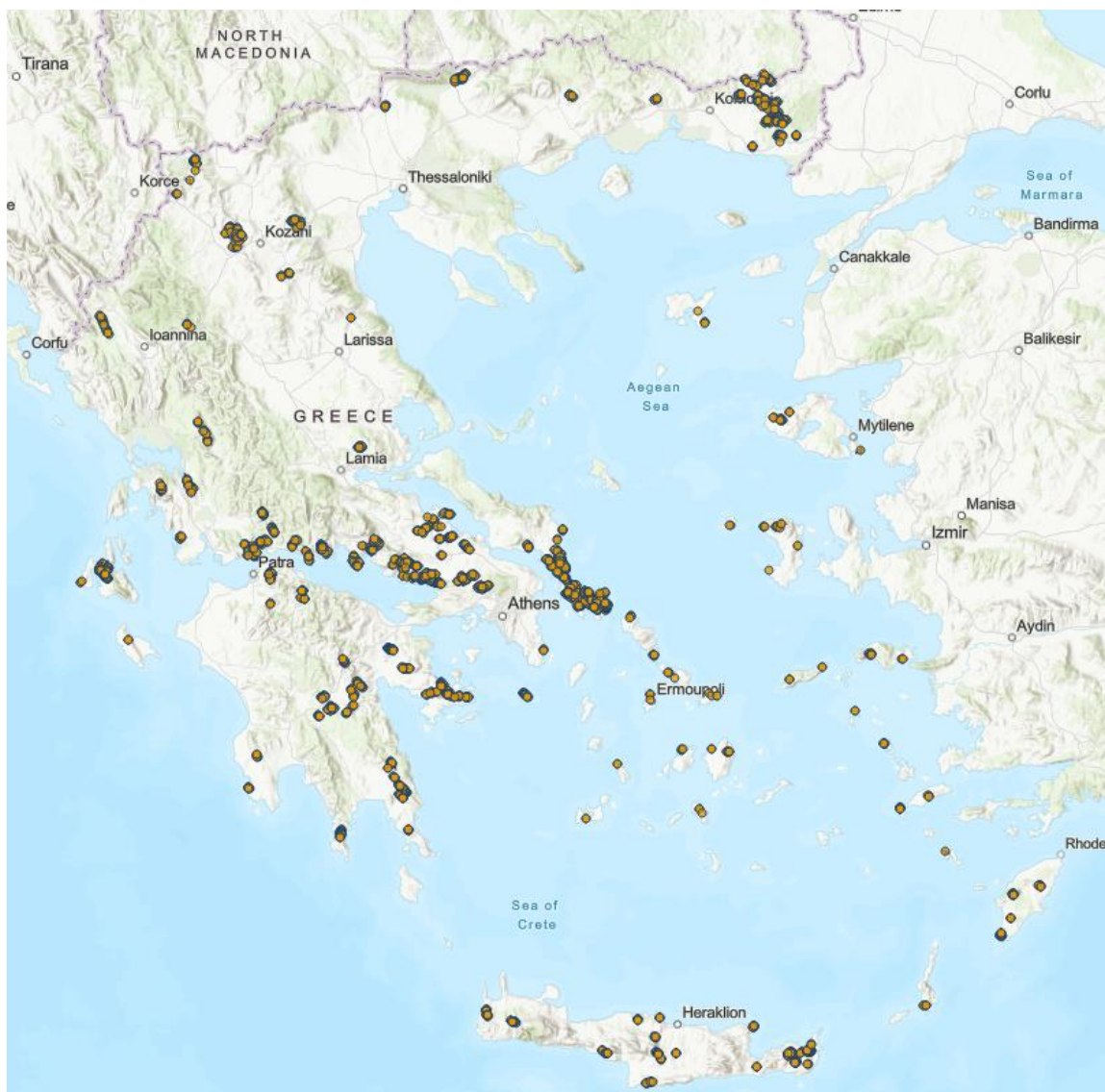
Στο παρών η αιολική ενέργεια χρησιμοποιείται κατά κόρον για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι μια πολύ διαδεδομένη μέθοδος στις ανανεώσιμες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας λόγω του ότι έχει καλή απόδοση μπορούν να το χρησιμοποιήσουν όλοι ακόμα και εκτός του ηλεκτρικού δικτύου.

Η ανεμογεννήτρια για να φτάσει στις αποδόσεις ως μέσο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που έχει σήμερα ξεκίνησε να εξελίσσεται κυρίως μετά από το 1973 με την πετρελαϊκή κρίση.



Εικόνα 9: Συγκριση μεγέθους ανεμογεννητριών. (https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_wind_power)

1.8 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ



Εικόνα 10: Χάρτης με τα αιολικά πάρκα στην Ελλάδα. (<https://eletaen.gr/>)

Στην Ελλάδα λαμβάνει μέρος της ενέργειας της από αιολικά πάρκα από το 1987 με την εγκατάσταση των πρώτων ανεμογεννητριών.

Αυτή τη στιγμή μπορεί και παράγει 4681,4 MW και για το έτος 2022 πέτυχε τις 10,7TWh με αυτούς τους αριθμούς να ανεβαίνουν κάθε χρόνο λόγω του ότι κατασκευάζονται νέα αιολικά πάρκα καθώς και αναβαθμίζονται τα παλιά.

Τα μεγαλύτερα αιολικά πάρκα είναι το «Αιολικό Πάρκο Παναχαϊκού» αποτελείται από δύο επιμέρους αιολικά πάρκα με τις ονομασίες «Παναχαϊκό Ι» και «Παναχαϊκό ΙΙ» τα οποία βρίσκονται στο Παναχαϊκό όρος στο νομό Αχαΐας,

Το αιολικό πάρκο «Παναχαϊκό Ι» εγκαινιάστηκε το 2006 απαρτιζόμενο από 41 τρίπτερες ανεμογεννήτριες, μοντέλου Vestas V52, με συνολική δυναμικότητα έκαστης 850 kW. Το αρχικό αιολικό πάρκο «Παναχαϊκό Ι» θεωρείται το μεγαλύτερο αιολικό πάρκο στην Ελλάδα. Το αιολικό πάρκο «Παναχαϊκό ΙΙ» εγκαινιάστηκε το 2009. Τα «Παναχαϊκό Ι» και «Παναχαϊκό ΙΙ» απαρτίζονται πλέον συνολικά από 57 ανεμογεννήτριες συνολικής ισχύος 48,5 MW με ανεμογεννήτριες τύπων Vestas και Siemens-Gamesa.

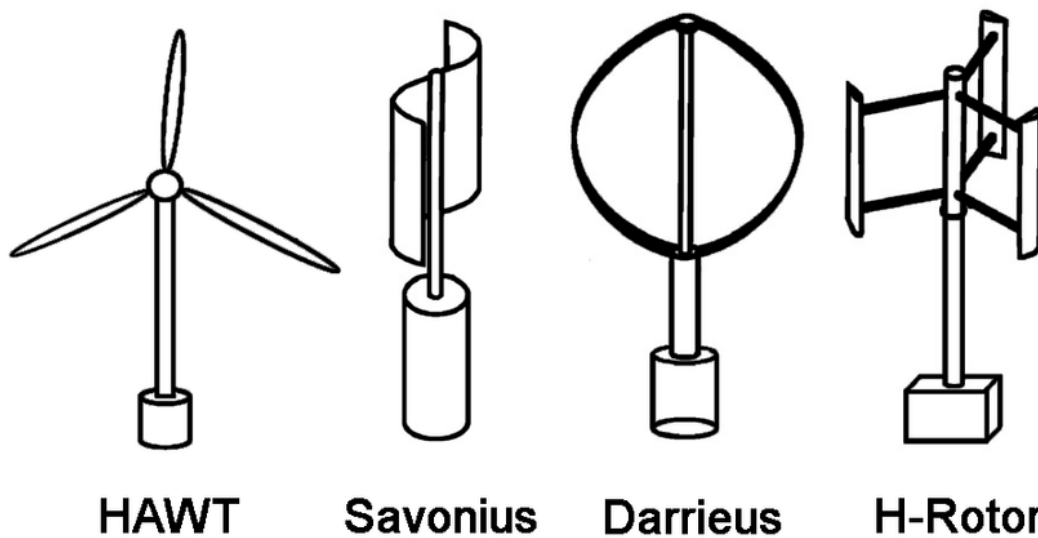
Το αιολικό πάρκο «Παναχαϊκό Ι» έχει συνολική ισχύ 34,85 MW ενώ το «Παναχαϊκό ΙΙ» έχει συνολική ισχύ 13,6 MW. Υπολογίζεται ότι παρέχει κάθε χρόνο 90.000 MWh, που τις χρησιμοποιεί η ΔΕΗ για να καλύπτει τις ανάγκες 25.000 περίπου σπιτιών της περιοχής της Πάτρας (5-7% των αναγκών της πόλης σε ηλεκτρικό ρεύμα).

Ένα νέο αιολικό πάρκο κατασκευάζεται στο Παναχαϊκό όρος με 8 νέες ανεμογεννήτριες ισχύος 39 μεγαβάτ στη θέση Πλακουτσόβουνο – Μαλούρα – Κοκκινόβραχος των Δήμων Αιγιαλείας και Ερυμάνθου. Αναμένεται να ολοκληρωθεί η κατασκευή τους έως το 2024.

2. ΕΙΔΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Οι ανεμογεννήτριες σαν κατασκευή υπάρχουν σε πολλές παραλλαγές, κάθε μια με τα υπέρ και τα κατά της.

Οι δυο κύριες παραλλαγές είναι οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα και οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα.



Εικόνα 11: Μερικά από τα είδη ανεμογεννητριών. (https://www.researchgate.net/figure/The-major-wind-turbine-types-including-the-propeller-type-horizontalaxis-wind-turbine_fig3_263161316)

2.1 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ

Είναι από τις πιο συνηθισμένες ανεμογεννήτριες που έχουν εγκατασταθεί στον κόσμο λόγω των εξής πλεονεκτημάτων τους :

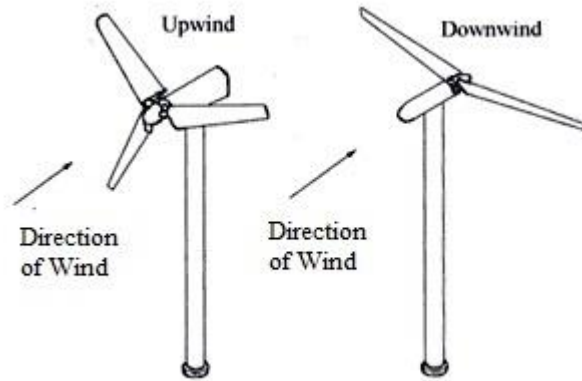
- Μεγάλη παραγωγή σε ισχύ, αναλόγως που θα γίνει η εγκατάσταση και το πόσο μεγάλη είναι η ανεμογεννήτρια μπορεί να παράγει από 2 έως 8 MW.
- Υψηλές αποδόσεις, για κάθε μετατροπή ενέργειας υπάρχουν πάντα απώλειες, αυτού του τύπου ανεμογεννήτριες στη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική έχουν βαθμό απόδοσης μεταξύ 40% και 50% .
- Έχουν μεγάλη αξιοπιστία, λόγω του ότι η επιστήμη ασχολείται με τις ανεμογεννήτριες για δεκαετίες, έχουν εξελιχθεί με αποτέλεσμα να έχουν σχεδιάσει τις ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου να είναι αξιόπιστες.
- Υψηλή ταχύτητα ανέμου λειτουργείας, λόγω του ύψους που αναρτάται ο δρομέας με τα πτερύγια μπορεί και εκμεταλλεύεται ανέμους με μεγαλύτερη ταχύτητα και σε μεγαλύτερο ύψος που έχουν σχετικά σταθερή ταχύτητα.

Τα αρνητικά που έχουν είναι:

- Ότι η μεταφορά για την εγκατάσταση τους καθώς και η εγκατάσταση τους είναι δύσκολη λόγω του ότι τα κομμάτια από τα οποία αποτελείται είναι μεγάλα.
- Η δύσκολη συντήρηση των συγκριμένων ανεμογεννητριών, λόγω του ύψους που βρίσκονται όλοι οι μηχανισμοί της τάξης των 80 μέτρων μπορεί να γίνει ιδιαίτερα επικίνδυνη η εργασία ειδικά αν υπάρχουν και ισχυροί άνεμοι.
- Είναι επικίνδυνες για την πανίδα και συγκεκριμένα για τα πτηνά που πετάνε κοντά σε αυτές.

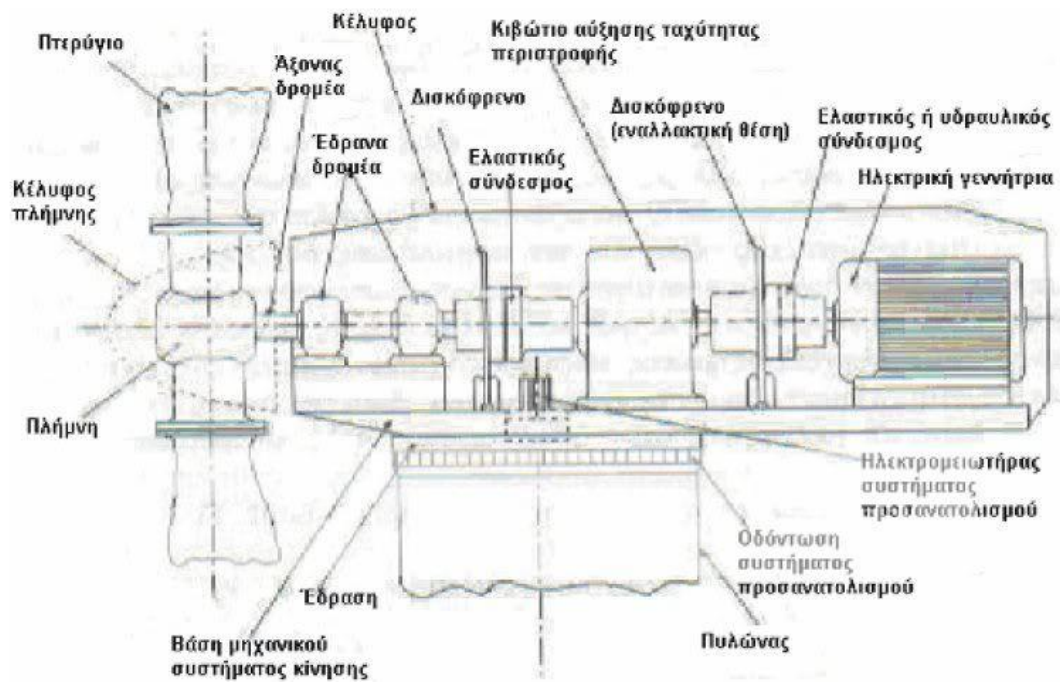
Οι διαφορές μεταξύ των ανεμογεννητριών αυτού του τύπου είναι το πόσο των πτερύγιων που έχουν, όπου ο επικρατέστερος αριθμός πτερυγίων είναι 3 λόγω του ότι προσφέρουν την μεγαλύτερη απόδοση.

Μία ακόμη διαφορά που έχουν είναι αν θα είναι upwind ή downwind, το οποίο συμβολίζει αν θα είναι ο δρομέας με τα πτερύγια στην μπροστινή πλευρά της ατράκτου ή στην πίσω αντίστοιχα. Από πλευράς πρακτικών διαφορών είναι ότι, πιο αποδοτική είναι η upwind ανεμογεννήτρια λόγω του ότι δεν υπάρχει κάποιο εμπόδιο μπροστά από τα πτερύγια, ενώ η downwind ανεμογεννήτρια είναι πιο οικονομική επειδή δεν χρειάζεται μηχανισμό προσανατολισμού της ατράκτου λόγω της άνωσης που παρουσιάζουν τα πτερύγια από τον αέρα.



Εικόνα 12: Τύποι ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα. (<https://www.elprocus.com/horizontal-axis-wind-turbine/>)

2.1.1 ΜΕΡΗ ΑΠΟ ΤΑ ΟΠΟΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΙΤΑΙ ΜΙΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ



Εικόνα 13: Μέρη μιας τυπικής ανεμογεννήτριας. (<https://forum.nautilia.gr/showthread.php?34578-%C8%DC%EB%E1%F3%F3%E1-%EA%E1%E9-%E5%ED%DD%F1%E3%E5%E9%E1>)

2.1.2 Η ΑΤΡΑΚΤΟΣ

Η άτρακτος μιας ανεμογεννήτριας είναι το στοιχείο που μέσα του υπάρχει όλος ο εξοπλισμός για την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική δηλαδή όλο τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό, εδράζεται πάνω από τον πύργο και είναι συνδεδεμένο με τον δρομέα.

Το υλικό κατασκευής της ατράκτου είναι ελαφρύ, όπως η υαλοίνα και προστατεύει τα εσωτερικά στοιχεία από το περιβάλλον. Στη κορυφή της είναι εγκατεστημένα το ανεμόμετρο, ο ανεμοδείκτης για να παρέχουν τις μετεωρολογικές μετρήσεις στο σύστημα και το αλεξικέραυνο για προστασία από κεραυνούς.

Έχει επαρκή χώρο παραμονής και εργασίας για συντήρηση και επισκευές, διαθέτει, είσοδο αέρα για τη ψύξη που οδηγείται, μέσω αεραγωγών, με σιγαστήρες από έναν ανεμιστήρα και εξέρχεται από το πίσω τμήμα του θαλάμου, πάλι μέσω αεραγωγών.



Εικόνα 14: Η άτρακτος της ανεμογεννήτριας της Vestas V236-15MW. (<https://www.vestas.com/en/media/images>)

2.1.2 ΚΥΡΙΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Το κύριο πλαίσιο είναι το στοιχείο στο οποίο είναι συνδεδεμένος όλος ο εξοπλισμός, το κιβώτιο ταχυτήτων, η γεννήτρια, τα φρένα κλπ. Είναι μια στιβαρή και άκαμπτη δομή που φιλοξενεί αυτά τα εξαρτήματα.

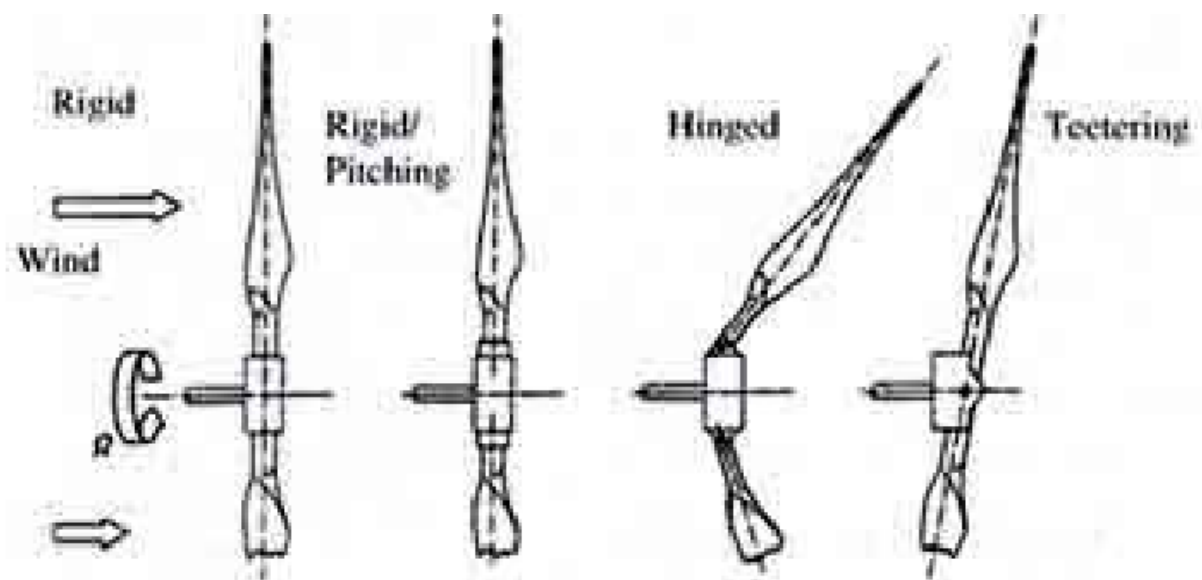
Όσον αφορά τους τύπους κύριου πλαισίου, αυτοί χωρίζονται σε δύο. Στην πρώτη περίπτωση το κύριο πλαίσιο είναι ένα εντελώς ξεχωριστό εξάρτημα ενώ στην δεύτερη περίπτωση είναι μέρος του ενσωματωμένου κιβωτίου ταχυτήτων. Όταν το κύριο πλαίσιο (όταν αυτό είναι ξεχωριστό) είναι ένα άκαμπτο εξάρτημα που δημιουργείτε μέσω χύτευσης ή συγκόλλησης. Οπές και άλλα σημεία στερέωσης παρέχονται σε κατάλληλες θέσεις για προσθήκη εξαρτημάτων. Όταν το κύριο πλαίσιο αποτελεί κομμάτι του ενσωματωμένου κιβωτίου ταχυτήτων τότε η θήκη είναι φτιαγμένη τόσο παχιά όσο χρειάζεται για να μπορεί να αντέχει τα απαιτούμενα φορτία. Όπως και με το ξεχωριστό κύριο πλαίσιο, παρέχονται σημεία στερέωσης για την ασφάλιση των άλλων αντικειμένων. Το κύριο πλαίσιο πρέπει να μεταδίδει τα φορτία από την πλήμνη και όλα τα φορτία αντίδρασης από την γεννήτρια και τα φρένα στον πύργο. Πρέπει επίσης να είναι αρκετά σταθερό και άκαμπτο ώστε να μην επιτρέπει καμιά σχετική κίνηση μεταξύ των ρουλεμάν στήριξης της πλήμνης, του κιβωτίου ταχυτήτων, τη γεννήτρια και το φρένο.

2.1.3 ΠΛΗΜΝΗ (HUB)

Η πλήμνη της ανεμογεννήτριας είναι το εξάρτημα που συνδέει τα πτερύγια με τον κύριο άξονα και αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία μιας ανεμογεννήτριας. Η πλήμνη πρέπει να αντέχει και να μεταδίδει όλα τα φορτία που δημιουργούνται από τα πτερύγια. Κατασκευάζονται από χάλυβα είτε χυτό είτε με συγκόλληση. Οι πλήμνες διαφέρουν ανάλογα με την σχεδιαστική φιλοσοφία της ανεμογεννήτριας.

Υπάρχουν 3 τύποι πλημνών :

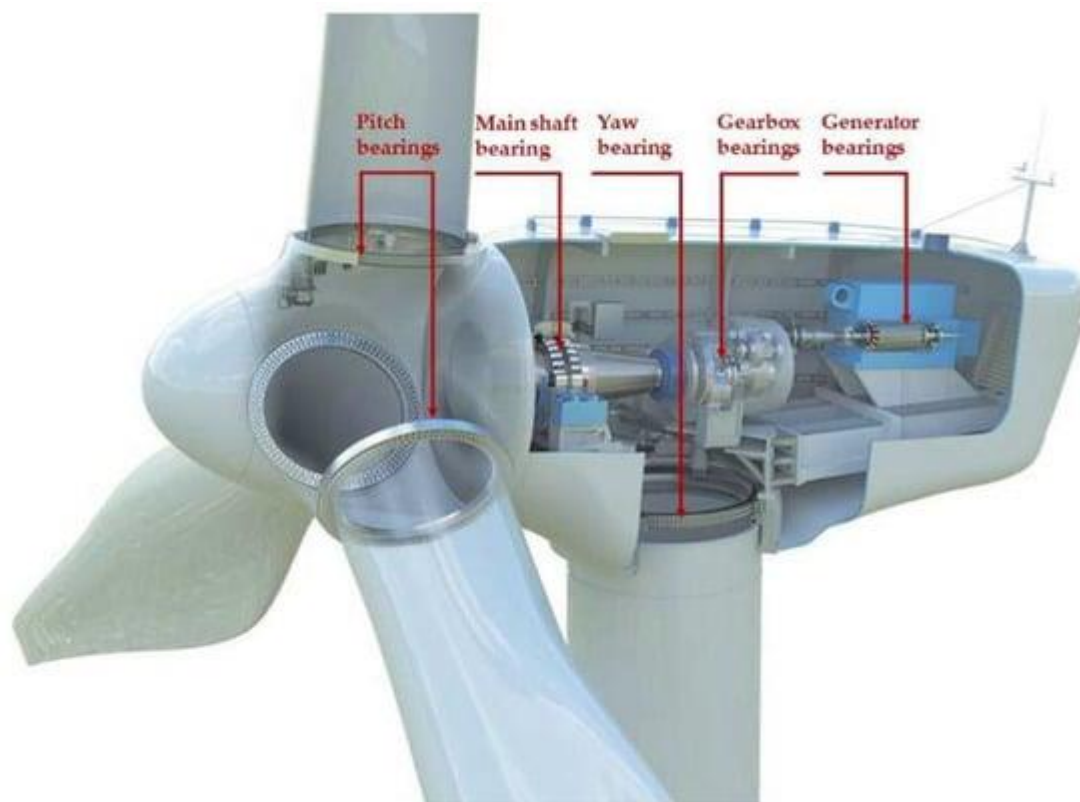
1. Άκαμπτες πλήμνες (Rigid hubs)
2. Κλινόμενες πλήμνες (Teetering hubs)
3. Πλήμνες για αρθρωτά πτερύγια (Hinged hubs)



Εικόνα 15: Διαφορές στα πτερύγια της κάθε πλήμνης. (<https://www.semanticscholar.org/paper/A-General-Description-and-Comparison-of-Horizontal-C3%93skarsd%C3%B3ttir/f01a18ae95c69cb8cdb0f843a0c4941ad2de95c9>)

2.1.3.1 ΑΚΑΜΠΤΕΣ ΠΛΗΜΝΕΣ

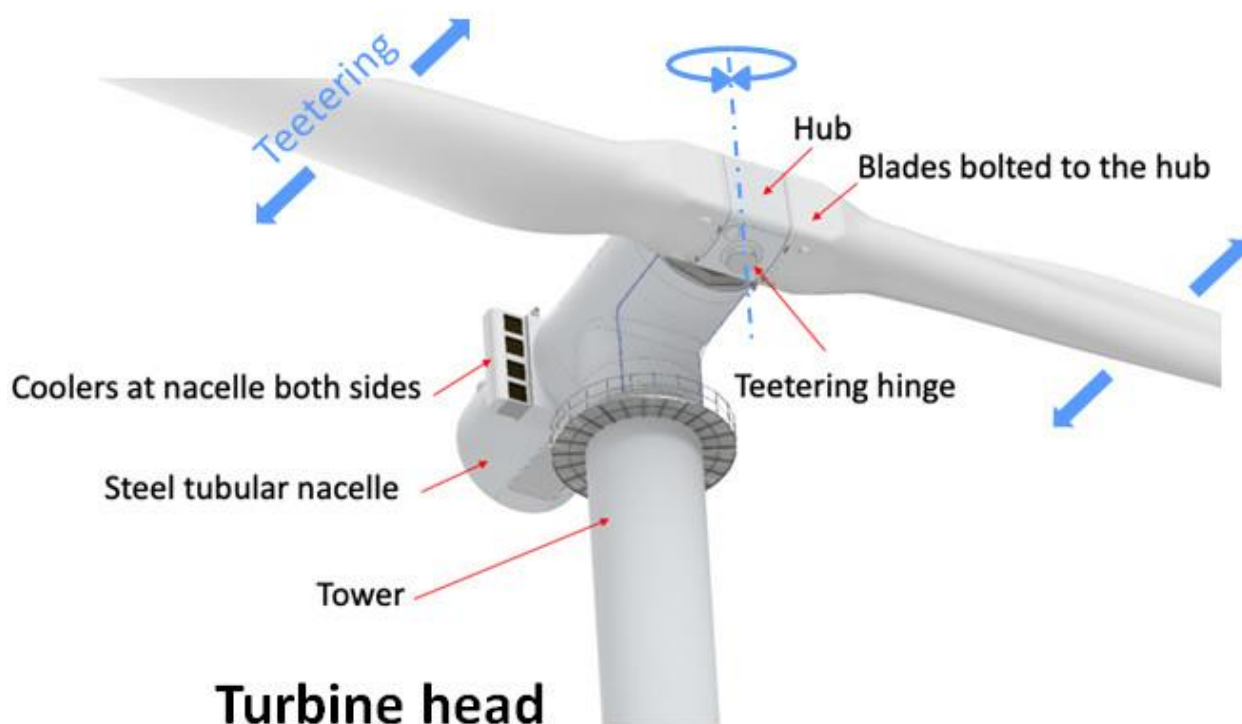
Οι άκαμπτες πλήμνες όπως υπονοεί και το όνομα τους, έχουν όλα τα κύρια μέρη τους καθορισμένα σε σχέση με τον κύριο άξονα. Είναι το πιο συνηθισμένο σχέδιο και είναι σχεδόν καθολικά για μηχανές με τρεις (ή περισσότερες) λεπίδες. Θα πρέπει να είναι αρκετά ισχυρή έτσι ώστε να αντέχει φορτία που μπορεί να εμφανιστούν λόγω αεροδυναμικής ή λόγω της περιστροφής (yaw system). Μια πλήμνη σε μια ανεμογεννήτρια με σύστημα ελέγχου κλίσης πτερυγίων (pitch control system) πρέπει να παρέχει ρουλεμάν για τις βάσεις των πτερυγίων, ένα μέσο για την ασφάλιση των πτερυγίων έναντι κάθε κίνησης εκτός από το pitching. Η πλήμνη πρέπει να στερεωθεί στον κύριο άξονα με τέτοιο τρόπο ώστε να μην περιστρέφεται ανεξέλεγκτα και να μην μπορεί να αποσπαστεί.



Εικόνα 16: Άκαμπτη πλήμνη. (<https://www.mdpi.com/1996-1073/15/9/3340>)

2.1.3.2 ΚΛΙΝΟΜΕΝΕΣ ΠΛΗΜΝΕΣ (TEETERING HUBS)

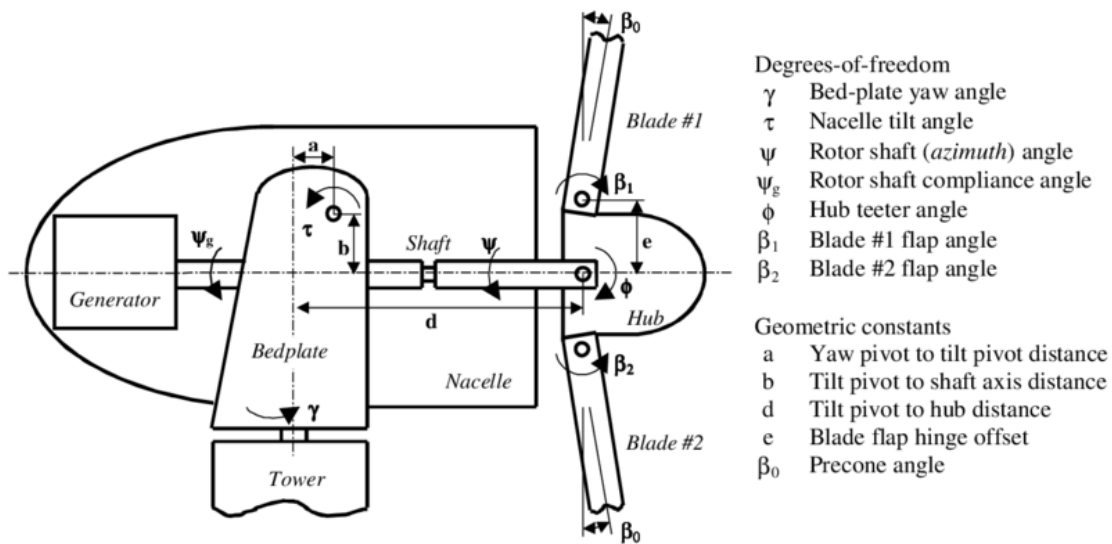
Αυτός ο τύπος πλήμνης χρησιμοποιείται σχεδόν σε όλες τις ανεμογεννήτριες με δυο πτερύγια. Αυτό οφείλετε στο γεγονός ότι μπορεί να μειώσει τα φορτία αεροδυναμικών ανισοροπιών καθώς και φορτία που δημιουργούνται λόγω της περιστροφής της πλήμνης ή του συστήματος προσανατολισμού (yaw system). Θεωρούνται αρκετά περίπλοκες σε σχέση με τις άκαμπτες πλήμνες. Αποτελούνται από τουλάχιστον δυο κύρια μέρη, το κύριο σώμα της πλήμνης και ένα ζευγάρι πείρους στήριξης μαζί με ρουλεμάν και αποσβεστήρες. Το κύριο σώμα της πλήμνης είναι κατασκευασμένο από χαλύβδινη συγκόλληση και σε κάθε άκρο υπάρχουν τα σημεία στερέωσης των πτερυγίων.



Εικόνα 17: Ανεμογεννήτρια με κλινόμενη πλήμνη. (<https://www.linkedin.com/pulse/importance-fundamentals-martin-jakubowski?trk=article-ssr-frontend-pulse-more-articles-related-content-card>)

2.1.3.3 ΠΛΗΜΝΗ ΓΙΑ ΑΡΘΡΩΤΑ ΠΤΕΡΥΓΙΑ

Μια αρθρωτή πλήμνη είναι ουσιαστικά μια άκαμπτη πλήμνη που οι βάσεις στις οποίες θα συνδεθούν τα πτερύγια έχουν αρθρώσεις οπότε τα πτερύγια μπορούν να μετακινούνται όλα μαζί συντονισμένα προς μια κατεύθυνση. Οι αρθρώσεις έχουν ρουλεμάν για μηχανικές αντοχές και αποσβέστηρες έτσι ώστε να μειωθούν οι δονήσεις, επίσης για να μην πέφτουν όταν δεν θα υπάρχει άνεμος θα πρέπει να έχουν ελατήρια ώστε να μένουν σε επιθυμητή θέση. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται κυρίως σε downwind ανεμογεννήτριες έτσι ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος να χτυπήσουν τα πτερύγια στον πύργο της ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 18: Πλήμνη για αρθρωτά πτερύγια. (https://www.researchgate.net/figure/Wind-turbine-schematic-showing-degrees-of-freedom-and-geometric-parameters_fig1_252366155)

2.1.4 ΠΤΕΡΥΓΙΑ

Από το σύνολο των στοιχείων που αποτελούν μια ανεμογεννήτρια, τα πτερύγια αποτελούν ένα από τα πιο θεμελιώδη στοιχεία του, αφού με αυτά μετατρέπεται η κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική που απαιτείται για να περιστρέψει την γεννήτρια και να έχουμε ως αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Κατά την σχεδίαση των πτερυγίων, δίνεται πολύ μεγάλη προσοχή στην αεροδυναμική επίδοση και την δομική αντοχή.

Μαζί με αυτά υπάρχει και η ανάγκη για μείωση της ενέργειας που απαιτεί μια ανεμογεννήτρια κατά την διάρκεια του κύκλου ζωής της. Πράγμα που σημαίνει ότι όχι μόνο το κόστος της ανεμογεννήτριας θα πρέπει να διατηρηθεί σε χαμηλά επίπεδα, αλλά το κόστος λειτουργίας και συντήρησης θα πρέπει να διατηρηθεί χαμηλά επίσης.

Μερικά ακόμη σημεία που δίνεται προσοχή είναι τα υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένο το πτερύγιο έτσι ώστε να είναι ανακυκλώσιμο, να υπάρχει η απαραίτητη αντοχή, να είναι ελαφρύ και να μπορεί να κάνει απόσβεση θορύβων κατά τη λειτουργία.

Το μήκος των πτερυγίων, σχετίζεται άμεσα με την σχεδιαστικά ονομαστική ισχύ και την ονομαστική ταχύτητα ανέμου. Κατά τον σχεδιασμό όταν το Tip Speed Ratio (TSR) είναι υψηλό οδηγεί σε πτερύγια μικρότερης στερεότητας άρα και μικρότερης επιφάνειας, που τα κάνει πιο ελαφριά και πιο οικονομικά.

Η υψηλή ταχύτητα της πλήμνης ωφελεί και το σύστημα μετάδοσης της κίνησης.

Από την άλλη πλευρά όταν έχουμε υψηλό TSR τότε έχουμε και δυνατό θόρυβο.

Επειδή τα πτερύγια είναι λεπτότερα, οι πιέσεις που εμφανίζονται σε αυτά τείνουν να είναι μεγαλύτερες. Λεπτότερα πτερύγια σημαίνει και μεγαλύτερη ευκαμψία, που μπορεί να αποτελέσει πλεονέκτημα αλλά τα λεπτότερα πτερύγια μπορούν επίσης να παρουσιάσουν κραδασμούς και ακραίες παραμορφώσεις που μπορούν να οδηγήσουν σε σύγκρουση πτερυγίου και πύργου.

$$\text{TSR} = \text{TIP SPEED OF BLADE} / \text{WIND SPEED}$$

Το εξωτερικό σχήμα των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας βασίζεται στην

Αεροδυναμική, η εσωτερική δομή του πτερυγίου σχεδιάζεται με γνώμονα την αντοχή.

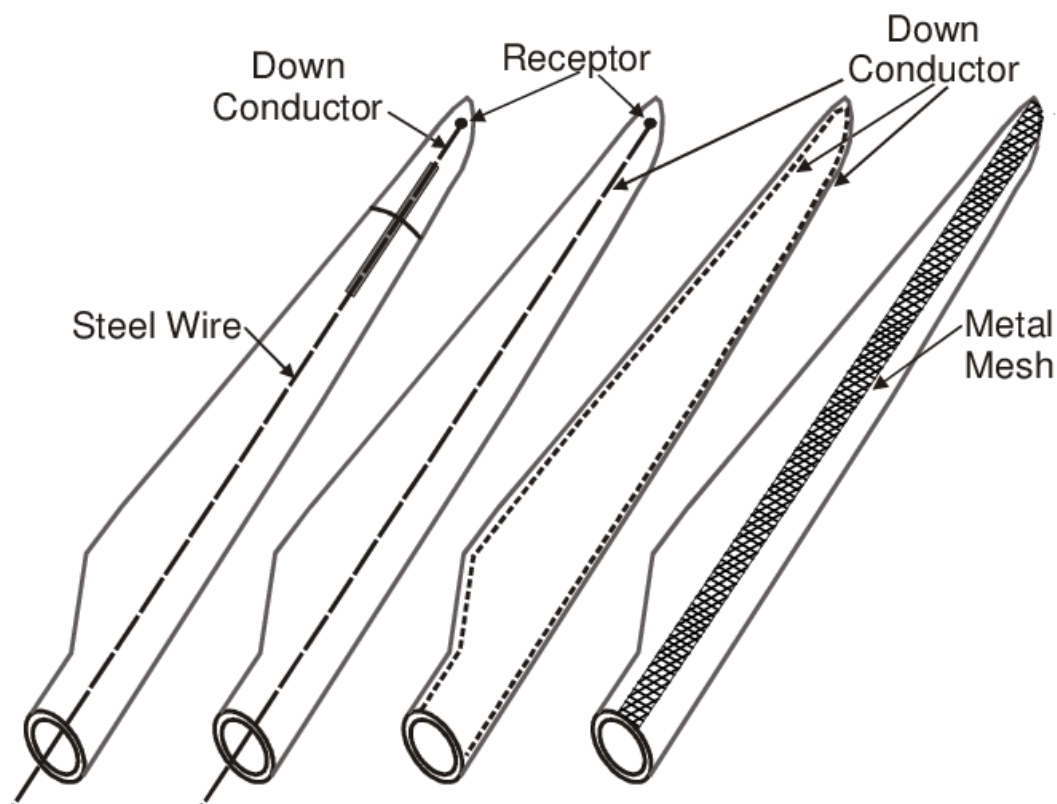
Η δομή του πτερυγίου πρέπει να είναι αρκετά ισχυρή τόσο για να αντέχει τα ακραία φορτία όσο και για να αντέχει πολλούς κύκλους κόπωσης. Επίσης το πτερύγιο δεν θα πρέπει να αποκλίνει πέρα από ένα επιτρεπόμενο σημείο όταν αυτό βρίσκεται υπό φορτίο. Προκειμένου το πτερύγιο να έχει αρκετή αντοχή, ιδιαίτερα στο σημείο κοντά στην βάση του, τα εσωτερικά του τμήματα είναι σχετικά χοντρά. Καθώς οι λεπίδες γίνονται όλο και μεγαλύτερες, οι χορδές κοντά στην βάση τους μεγαλώνουν και αυτές, αυτό έχει προκαλέσει ορισμένα προβλήματα κατά την μεταφορά.

Από την δεκαετία του 1970 και έπειτα τα περισσότερα πτερύγια για ανεμογεννήτριες έχουν κατασκευαστεί από σύνθετα υλικά. Τα πιο κοινά σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται αποτελούνται από υαλοίνα σε πολυεστερική ρητίνη.

Μια σημαντική ανησυχία είναι η ανακυκλωσιμότητα των πτερυγίων. Όσο περισσότερες ανεμογεννήτριες κατασκευάζονται και καθώς οι παλαιότερες αντικαθίστανται με καινούργιες το πρόβλημα της αντιμετώπισης των πτερυγίων ως σκουπίδια αλλά και της εξασφάλισης πρώτων υλών για την κατασκευή τους θα γίνει πιο σημαντικό. Ένας τρόπος για να αντιμετωπιστούν σε κάποιο βαθμό και τα δυο προβλήματα είναι η κατασκευή των πτερυγίων από ανακυκλώσιμα υλικά.

Τα πτερύγια θα πρέπει να προστατεύουν και αυτά με την σειρά τους το σύστημα από κεραυνούς. Υπάρχουν 4 διαφορετικές κατασκευαστικές τεχνικές χωρισμένες σε τύπους που είναι οι εξής

- Τύπος Α, ο οποίος έχει στην κατασκευή του έναν υποδοχέα στην άκρη του πτερυγίου, αγωγό για την γείωση και ενίσχυση από ατσάλινο σύρμα.
- Τύπος Β, έχει όπως στον τύπο Α υποδοχέα στην άκρη του πτερυγίου και αγωγό για την γείωση, όμως δεν έχει ενίσχυση από ατσάλινο σύρμα.
- Τύπος C, περιμετρικά του πτερυγίου έχει έναν αγωγό γείωσης.
- Τύπος D, αυτός ο τύπος έχει κατά μήκος του ένα μεταλλικό πλέγμα ως προστασία.



Εικόνα 19: Αντικεραυνικές προστασίες πτερυγίων. (https://www.researchgate.net/figure/Lightning-protection-systems-for-wind-turbine-blades-IEC-61400-24_fig1_237463514)

2.1.5 ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ (YAW SYSTEM)

Το σύστημα προσανατολισμού σε μια ανεμογεννήτρια έχει ως σκοπό την περιστροφή της ατράκτου γύρω από τον άξονα του πύργου.

Αυτός ο μηχανισμός παρέχει πλεονεκτήματα που επιτρέπουν στην ανεμογεννήτρια να έχει τον βέλτιστο βαθμό απόδοσης σε σχέση με την κατεύθυνση του ανέμου.

Στρέφοντας την περιοχή σάρωσης της πλήμνης στην κατεύθυνση του ανέμου, μεγιστοποιείται η ισχύς εισόδου της ανεμογεννήτριας.

Τα συστήματα προσανατολισμού χωρίζονται σε δυο βασικούς τύπους, στα ενεργά συστήματα προσανατολισμού (Active Yaw Systems) και στα παθητικά συστήματα προσανατολισμού (Passive Yaw Systems).

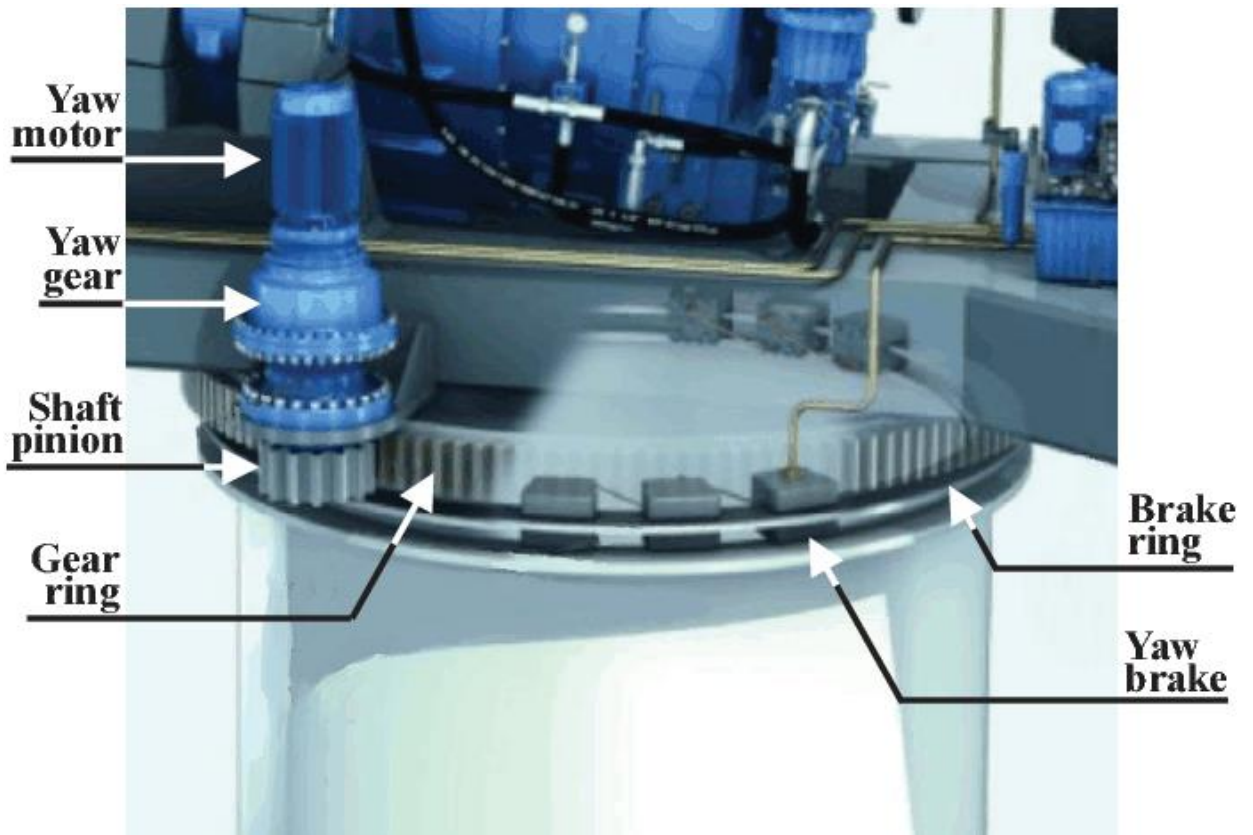
Τα συστήματα ενεργού προσανατολισμού είναι εξοπλισμένα με κινητήρα ικανό να παράγει ροπή που είναι ικανή να περιστρέφει την άτρακτο της ανεμογεννήτριας γύρω από τον άξονα του πύργου με βάση τις μετρήσεις που δέχεται από τους αισθητήρες κατεύθυνσης ανέμου ή αλλιώς μέσω χειροκίνητης ενεργοποίησης. Τα συστήματα ενεργού προσανατολισμού θεωρούνται πως είναι η τελευταία λέξη της τεχνολογίας για όλες τις σύγχρονες ανεμογεννήτριες μεσαίου και μεγάλου μεγέθους.

Τα βασικότερα στοιχεία ενός συστήματος προσανατολισμού είναι ο κινητήρας, το ρουλεμάν σύνδεσης ατράκτου και πύργου, ένα φρένο για τον περιορισμό περιστροφής και ένα σύστημα που θα επεξεργάζεται τις μετρήσεις και θα ελέγχει και την θέση της ατράκτου.

Τα συστήματα παθητικού προσανατολισμού χρησιμοποιούν την δύναμη του ανέμου για να προσαρμόσουν τον προσανατολισμό της πλήμνης στην κατεύθυνση του ανέμου. Στην απλούστερη μορφή τους, αυτά τα συστήματα περιλαμβάνουν ρουλεμάν που συνδέουν τον πύργο με την άτρακτο καθώς και ένα πτερύγιο-ουρά (tail fin) τοποθετημένο στην άτρακτο το οποίο είναι σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να περιστρέφει την άτρακτο στην κατεύθυνση του ανέμου, αφού ασκηθεί σε αυτό μια «διορθωτική» ροπή. Επομένως, η ισχύς του ανέμου είναι υπεύθυνη για την περιστροφή και τον προσανατολισμό της ατράκτου.

Εναλλακτικά, σε ανεμογεννήτριες downwind δεν χρειάζεται να έχουν πτερύγιο στην άτρακτο, αφού η ίδια η πλήμνη είναι ικανή να προσανατολίζει την άτρακτο στο άνεμο. Σε περίπτωση λοξών ανέμων, η «πίεση του ανέμου» στην περιοχή σάρωσης προκαλεί μια ροπή εκτροπής γύρω από τον άξονα του πύργου και προσανατολίζει την πλήμνη.

Το ουραίο πτερύγιο χρησιμοποιείται συνήθως για μικρές ανεμογεννήτριες, καθώς προσφέρει μια χαμηλού κόστους και αξιόπιστη λύση. Ωστόσο, δεν είναι σε θέση να ανταπεξέλθει στις υψηλές ροπές που απαιτούνται για την εκτροπή της ατράκτου μιας μεγάλης ανεμογεννήτριας λόγω του βάρους. Τα παθητικά συστήματα εκτροπής πρέπει να σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε η άτρακτος να μην ακολουθεί τις ξαφνικές αλλαγές στην κατεύθυνση του ανέμου, προκειμένου να αποφευχθούν υψηλά φυγοκεντρικά φορτία στην βάση στον άξονα περιστροφής της ατράκτου.



Εικόνα 20: Μηχανισμός προσανατολισμού. (<https://www.semanticscholar.org/paper/Indirect-estimation-of-the-Yaw-Angle-misalignment-a-Tsioumas-Karakasis/5fbb35a3d7cffe3034dc8218a3685dd3b6f35d97/figure/0>)

2.1.6 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΙΣΧΥΟΣ

Η μηχανική ισχύς που παράγει ο δρομέας μιας ανεμογεννήτριας, εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου. Όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι μικρότερη από μια ελάχιστη τιμή, η οποία κυμαίνεται από 3,5 έως 4m/s, η ανεμογεννήτρια τίθεται εκτός λειτουργίας, αυτό γίνεται επειδή η μηχανική ισχύς του δρομέα είναι μικρότερη από τις συνολικές απώλειες της ανεμογεννήτριας.

Σε ταχύτητες μεγαλύτερες από την ελάχιστη μέχρι και την ονομαστική ταχύτητα ανέμου η ανεμογεννήτρια παράγει ισχύ, η οποία αυξάνεται ανάλογα με την τρίτη δύναμη του ανέμου.

Η ονομαστική ταχύτητα ανέμου κυμαίνεται μεταξύ 10 – 15m/s, σε αυτό το εύρος η ανεμογεννήτρια παράγει την μέγιστη ισχύ.

Όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί την ονομαστική τότε ο δρομέας παράγει μεγαλύτερη ισχύ από ότι έχει υπολογιστεί, επομένως για ταχύτητες άνω της ονομαστικής έως την μέγιστη ταχύτητα ανέμου που κυμαίνεται μεταξύ 20 – 30m/s απαιτείται ο περιορισμός της παραγόμενης μηχανικής ισχύος.

Πέρα από την μέγιστη ταχύτητα ανέμου η ανεμογεννήτρια τίθεται εκτός λειτουργίας για λόγους ασφαλείας.

Σε κάθε περίπτωση ο έλεγχος της μηχανικής ισχύος του δρομέα θα πρέπει να ελέγχεται έτσι ώστε να είναι ίση με την ισχύ των απωλειών συν το φορτίο που προσθέτει η ηλεκτρογεννήτρια.

Για κατάσταση ισορροπίας ισχύει ο παρακάτω τύπος :

$$T_m = J*(d\omega_m/dt) + T_L + T_{LOSS}$$

Όπου T_L είναι η ροπή φορτίου, T_{LOSS} είναι η ροπή απωλειών, J είναι η ολική ροπή αδράνειας των στρεφόμενων μαζών (δρομέας, κιβώτιο ταχυτήτων και ηλεκτρογεννήτρια) και ω_m είναι η ταχύτητα των στρεφόμενων μαζών.

Αν εξαιτίας κάποιας δυσλειτουργίας, η ανεμογεννήτρια αποσυνδεθεί απότομα από το φορτίο, είτε διακοπεί η τάση του δικτύου που τροφοδοτεί η ανεμογεννήτρια τότε η ροπή φορτίου μηδενίζεται, ως αποτέλεσμα θα έχουμε ανεξέλεγκτη αύξηση της ταχύτητας περιστροφής.

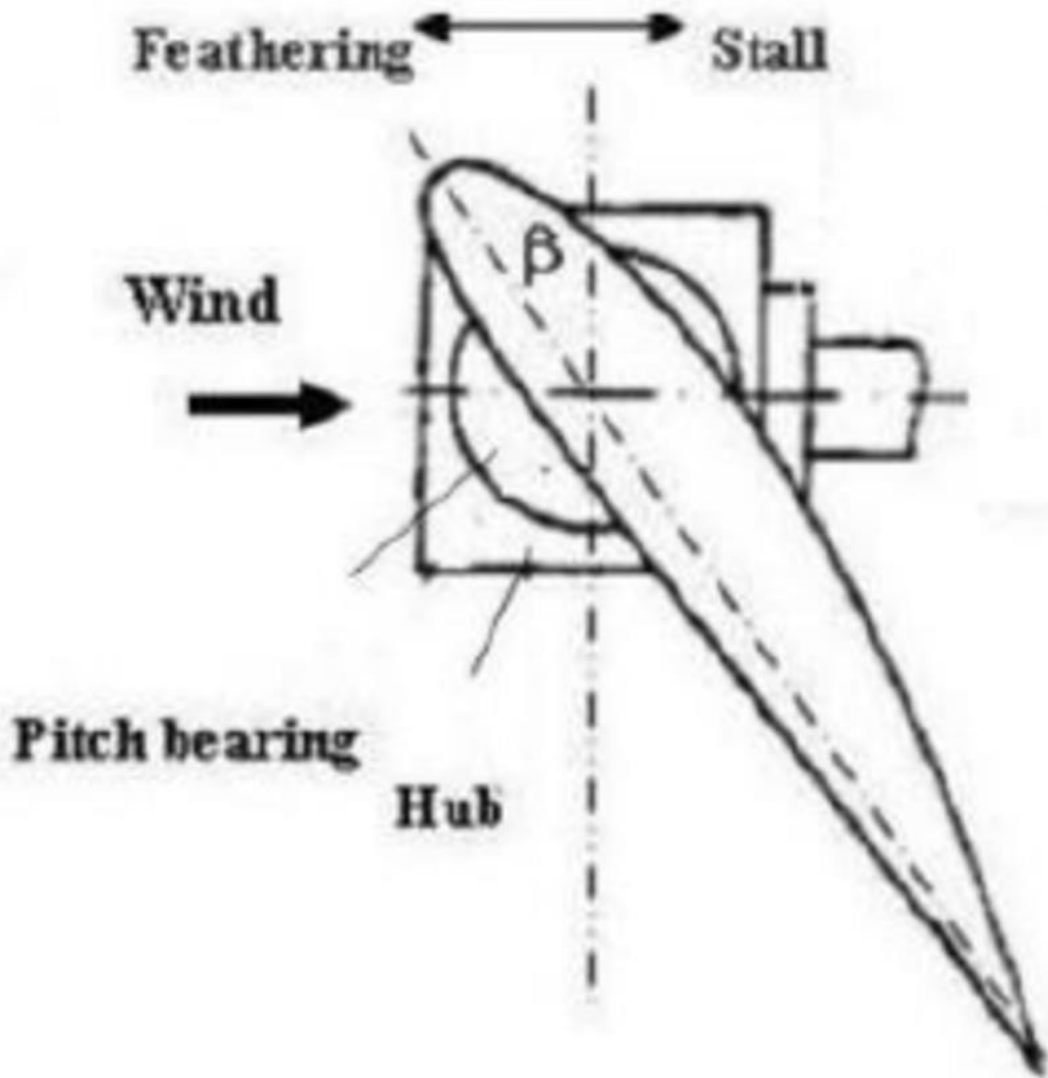
Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι ο έλεγχος της ανεμογεννήτριας είναι αναγκαίος για την ασφαλή και ομαλή λειτουργία της.

Η πλέον κατάλληλη μέθοδος για έλεγχο της μηχανικής ισχύος είναι η ρύθμιση κλίσης των πτερυγίων γνωστή και ως pitch control.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σε ανεμογεννήτριες με ισχύ πάνω από μερικά εκατοντάδες kW.

Η μέθοδος αυτή μειονεκτεί λόγω του κόστους με το οποίο συνεπάγεται ο ηλεκτρομηχανικός ή ηλεκτρο-υδραυλικός μηχανισμός.

Για κάθε πτερύγιο εγκαθίσταται και ένας μηχανισμός, μέσα στην πλήμνη της ανεμογεννήτριας και περιστρέφει την βάση του κάθε πτερυγίου.



Εικόνα 21: Σχέδιο με τις θέσεις που μπορεί να πάρει το πτερύγιο μέσω pitch control. (https://www.researchgate.net/figure/Pitch-angle-b-and-rotational-speed-rpm-versus-wind-speed-for-a-2-MW-turbine-The_fig5_221911660)

Στην ρύθμιση κλίσης πτερυγίων τα πτερύγια προσαρμόζονται ανάλογα με την ταχύτητα του αέρα.

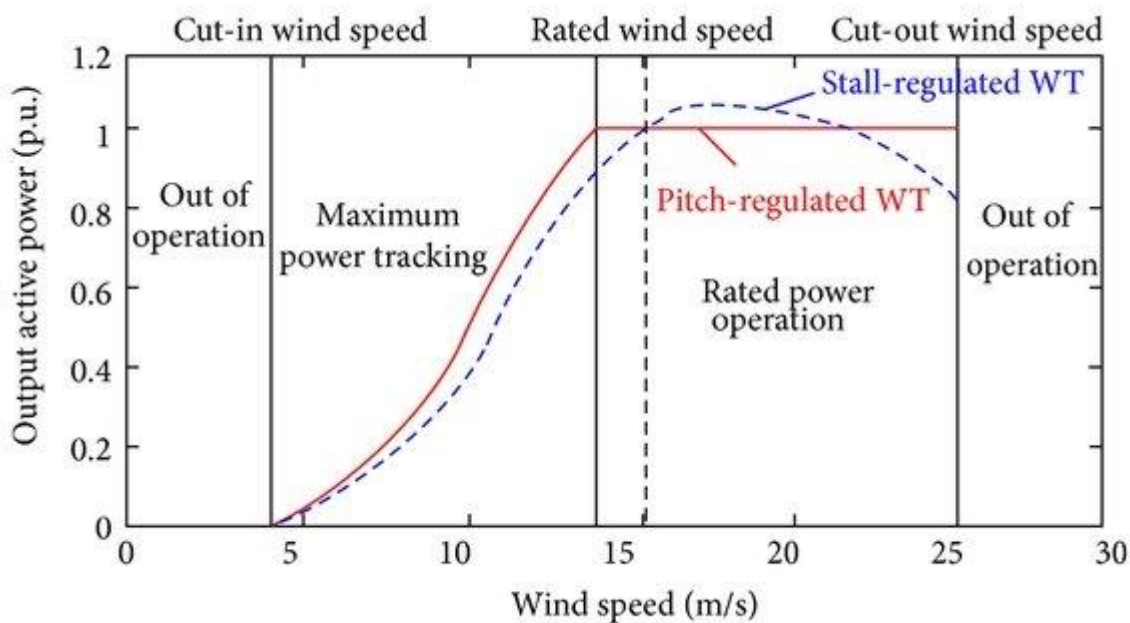
Όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι κάτω της ονομαστικής τότε τα πτερύγια παίρνουν την βέλτιστη κλίση προσβολής ώστε να παρέχεται ο μέγιστος αεροδυναμικός συντελεστής απόδοσης ισχύος.

Όταν η ταχύτητα του αέρα είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική τότε υπάρχουν 2 τακτικές για την μείωση της ροπής.

Ο πρώτος τρόπος ονομάζεται pitch to feather, όπου είναι να περιστραφεί το πτερύγιο προς τη θέση feather που αυτό σημαίνει ότι μπορεί να μειωθεί η ροπή και ταυτόχρονα να μην ασκούνται οπισθέλκουσες δυνάμεις στα πτερύγια.

Ο δεύτερος τρόπος είναι το ακριβώς αντίθετο δηλαδή τα πτερύγια περιστρέφονται προς τη θέση stall με αποτέλεσμα να μειώνεται η παραγόμενη ισχύς από τους στροβιλισμούς που αναπτύσσονται στα πτερύγια, αντίστοιχα αυξάνεται δραματικά η οπισθέλκουσα δύναμη . από τις δυο αυτές μεθόδους χρησιμοποιείται σχεδόν πάντα η πρώτη επειδή δεν προκαλεί άσκοπες δυνάμεις στα πτερύγια και κατά συνέπεια στον υπόλοιπο εξοπλισμό.

Από την άλλη πλευρά οι ανεμογεννήτριες παθητικής επιβράδυνσης έχουν τα πτερύγια τους σχεδιασμένα έτσι ώστε όταν οι ταχύτητες του άνεμου είναι υψηλές, η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα και επομένως η παράγωγή ισχύος, να μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας του άνεμου πάνω από ένα συγκεκριμένο όριο (συνήθως όχι το ίδιο με την ονομαστική ταχύτητα άνεμου). Τα πτερύγια είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να έχουν χειρότερη απόδοση σε υψηλές ταχύτητες ανέμου για την προστασία της ανεμογεννήτριας χωρίς την ανάγκη ενεργών ελέγχων. Το όφελος αυτού του τύπου ανεμογεννητριών έναντι της ρύθμισης γωνιάς βασίζεται στο μικρότερο κόστος κατασκευής, καθώς και ότι χρειάζεται λιγότερη συντήρηση που σχετίζεται με κινούμενα μέρη.



Εικόνα 22: Διαφορά μεταξύ ανεμογεννητριών με ρύθμιση γωνιάς και παθητικής επιβράδυνσης.
(https://www.researchgate.net/figure/Power-curves-of-fixed-pitch-and-variable-pitch-wind-turbines_fig2_266681666)

2.1.7 ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

Το σύστημα μετάδοσης κίνησης αναλαμβάνει την μεταφορά της μηχανικής ενέργειας από την πλήμνη στην ηλεκτρογεννήτρια.

Το πρώτο σε σειρά εξάρτημα είναι ο άξονας χαμηλής ταχύτητας ο οποίος στην μια άκρη του συνδέεται στην πλήμνη και στην άλλη συνήθως μέσω ενός συζευκτήρα συνδέεται στο κιβώτιο ταχυτήτων. Ο άξονα είναι συνήθως από χάλυβα για να μπορεί να ανταπεξέλθει στις ροπές που δέχεται καθώς και τα φορτία κάμψης που δέχεται από το βάρος της πλήμνης που είναι στερεωμένη πάνω του. Για ελαχιστοποίηση των τριβών κατά την περιστροφή εδράζεται πάνω σε ρουλεμάν.

Οι συζευκτήρες είναι στοιχειά που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση μεταξύ δυο αξόνων με σκοπό την μετάδοση κίνησης μεταξύ τους. Μερικές φορές είναι καλό να μειώνονται οι διακυμάνσεις της ροπής στον κύριο άξονα πριν μετατραπεί η ισχύς σε ηλεκτρική. Ένας σύνδεσμος κατάλληλου σχεδιασμού μπορεί να υπηρετήσει αυτόν τον ρόλο.

Μια τυπική χρήση των συνδέσμων σε ανεμογεννήτριες είναι η σύνδεση μεταξύ της γεννήτριας και του άξονα υψηλής ταχύτητας του κιβωτίου ταχυτήτων. Οι σύνδεσμοι αποτελούνται από δυο κύρια κομμάτια, το ένα από τα οποία συνδέεται σε κάθε άξονα. Τα δυο αυτά μέρη συνδέονται μεταξύ τους με μπουλόνια.

Τα ρουλεμάν με σφαιρίδια (Ball Bearings) χρησιμοποιούνται ευρέως σε εξαρτήματα ανεμογεννητριών. Αποτελούνται από τέσσερα μέρη: έναν εσωτερικό δακτύλιο, έναν εξωτερικό δακτύλιο, τις μπάλες και το κλουβί. Τα σφαιρίδια κινούνται σε καμπυλόγραμμες αυλακώσεις μέσα στα δακτυλίδια. Το κλουβί κρατά τις μπάλες και τις εμποδίζει να αγγίξουν η μια την άλλη. Τα σφαιρίδια του ρουλεμάν κατασκευάζονται σε διάφορους τύπους. Μπορεί να είναι σχεδιασμένα για να δέχονται αξονικά φορτία ή ακτινικά φορτία. Σε γενικές γραμμές, οι πιο σημαντικοί παράγοντες στο σχεδιασμό ενός ρουλεμάν είναι τα φορτία που θα βιώνει και ο αριθμός των περιστροφών που αναμένεται να επιβιώσει.

2.1.8 ΤΟ ΚΙΒΩΤΙΟ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ

Στα κιβώτια ταχυτήτων παράλληλου άξονα, ο υψηλής ταχύτητας άξονας είναι παράλληλος στον άξονα χαμηλής ταχύτητας.

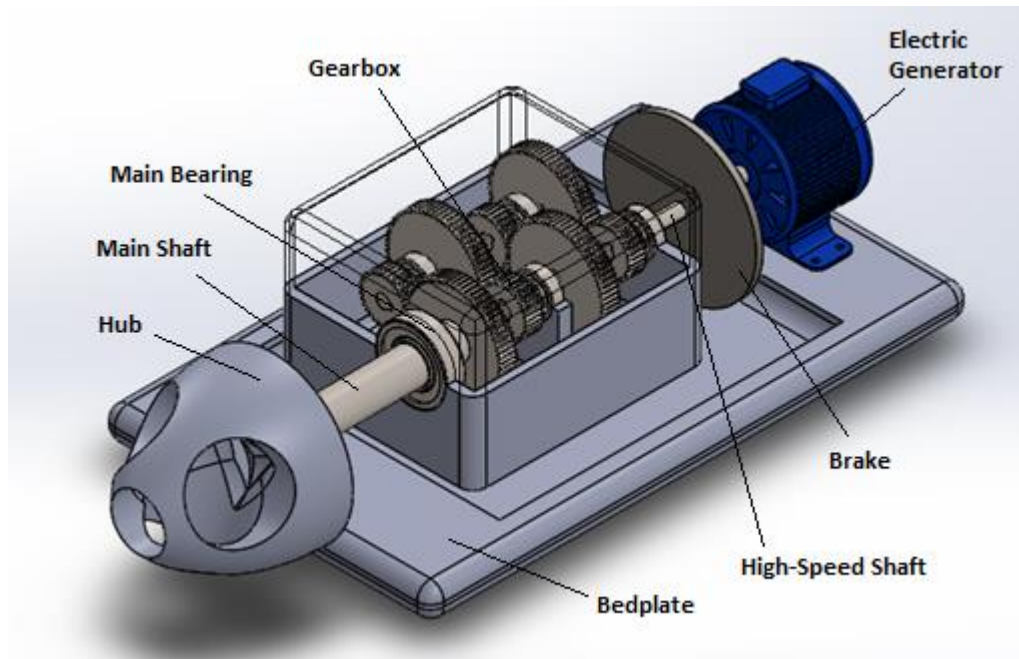
Σε ένα κιβώτιο ταχυτήτων ενός σταδίου (single stage) υπάρχουν δυο άξονες, ο χαμηλής ταχύτητας και ο υψηλής ταχύτητας, όπου και οι δυο άξονες περνούν μέσα από την θήκη. Ο ένας είναι συνδεδεμένος στον κύριο άξονα ή την πλήμνη και ο άλλος με την γεννήτρια. Σε κάθε άξονα υπάρχουν δυο γρανάζια διαφορετικού μεγέθους με το ένα στον άξονα χαμηλής ταχύτητας να είναι το μεγαλύτερο από τα δυο.

Τα πλανητικά κιβώτια ταχυτήτων έχουν πολλές σημαντικές διαφορές από τα κιβώτια παράλληλου άξονα. Πιο συγκεκριμένα, οι άξονες εισόδου και εξόδου είναι ομοαξονικοί. Επιπλέον, υπάρχουν πολλά ζεύγη δοντιών (από τα γρανάζια) που εμπλέκονται ανά πάσα στιγμή με αποτέλεσμα τα φορτία σε κάθε γρανάζι να μειώνεται. Αυτό κάνει τα πλανητικά κιβώτια ταχυτήτων σχετικά ελαφριά και συμπαγή. Στα πλανητικά κιβώτια ταχυτήτων, ένας άξονας χαμηλής ταχύτητας είναι άκαμπτα συνδεδεμένος με έναν πλανητικό φορέα. Ο φορέας αυτός έχει τρία πανομοιότυπα μικρά γρανάζια, γνωστά ως πλανήτες, τα οποία είναι τοποθετημένα σε κοντούς άξονες, ρουλεμάν και κινούνται ελεύθερα. Αυτοί οι πλανήτες συνεργάζονται με ένα γρανάζι δακτυλίου μεγάλης διαμέτρου και ένα μικρό γρανάζι που αποκαλείται ήλιος. Όταν ο χαμηλής ταχύτητας άξονας και ο φορέας περιστραφεί, τότε η δικτύωση των πλανητών στο γρανάζι δακτυλίου τείνει να περιστρέφει τους πλανήτες με μεγαλύτερη ταχύτητα από αυτή που κινείται ο φορέας. Η δικτύωση των πλανητών με τον ήλιο τείνει να περιστρέφει τον ίδιο τον ήλιο όπου αυτός με την σειρά του περιστρέφει τον άξονα υψηλής ταχύτητας.

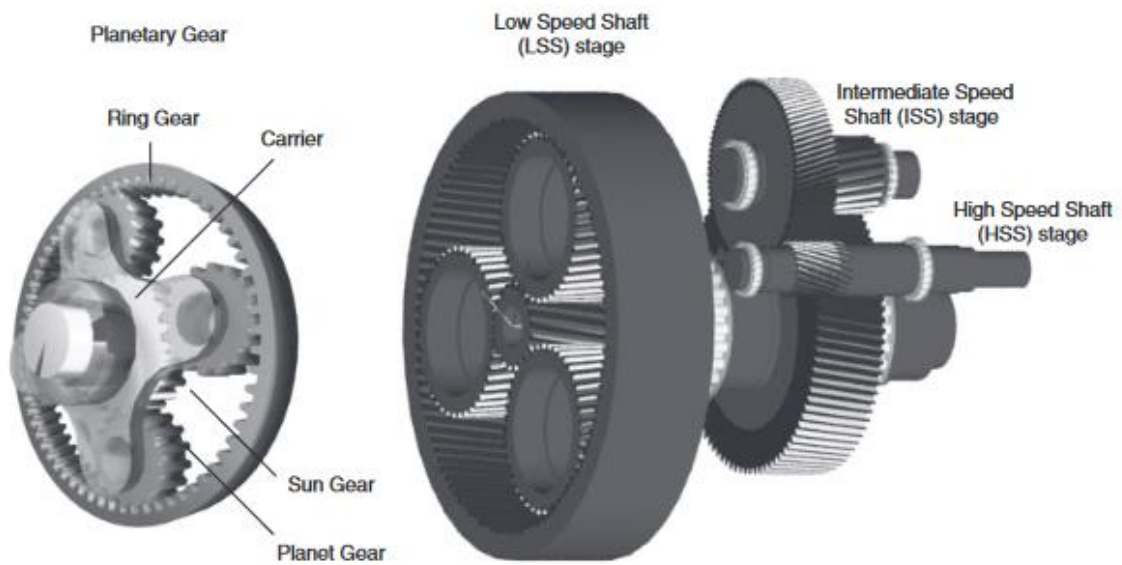
Τα φορτία που πρέπει να αντέξει το κιβώτιο ταχυτήτων οφείλονται κυρίως σε αυτά που επιβάλλει η πλήμνη. Αυτά περιλαμβάνουν τη ροπή του κύριου άξονα και μπορεί να περιλαμβάνουν το βάρος της πλήμνης και διάφορα δυναμικά φορτία, ανάλογα τον βαθμό ενσωμάτωσης του κιβωτίου ταχυτήτων με τον κύριο άξονα και τα ρουλεμάν. Φορτία επιβάλλονται επίσης και από την γεννήτρια, τόσο κατά την λειτουργία όσο και κατά την εκκίνηση, καθώς και με οποιοδήποτε μηχανικό φρένο που βρίσκεται στην πλευρά υψηλής ταχύτητας του κιβωτίου ταχυτήτων.

Τα κιβώτια ταχυτήτων μπορεί να είναι πηγή θορύβου. Η ποσότητα του θορύβου είναι μια συνάρτηση μεταξύ κάποιων πραγμάτων, όπως τον τύπο κιβωτίου, τα υλικά από τα οποία έχουν κατασκευαστεί τα γρανάζια και το πως αυτά έχουν κοπεί.

Τέλος, η αξιοπιστία αποτελεί βασικό στοιχείο στο σχεδιασμό ενός κιβωτίου ταχυτήτων. Η διαδικασία σχεδίασης πρέπει να είναι λεπτομερής και προσεκτική, έτσι ώστε να διασφαλιστεί ότι τελικό προϊόν είναι αξιόπιστο.



Εικόνα 23: Κιβώτιο ταχυτήτων παράλληλου άξονα. (<https://grabcad.com/library/wind-turbine-gearbox-1>)



Εικόνα 24: Πλανητικό κιβώτιο ταχυτήτων. (<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/we.1521>)

2.1.9 ΗΛΕΚΤΡΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

Είναι το δομικό στοιχείο που αναλαμβάνει να μετατρέψει την μηχανική ενέργεια που δέχεται από την πλήμνη μέσω του κιβωτίου ταχυτήτων να την μετατρέψει σε χρήσιμη ηλεκτρική.

Ανά τα χρόνια έχουν εφαρμοστεί πολλές μέθοδοι για την μετατροπή αυτή.

Ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος τύπος ανεμογεννήτριας είναι οι επαγωγικές γεννήτριες ενώ σε πολύ μικρό ποσοστό που τελευταία δείχνει να αυξάνεται είναι σύγχρονες γεννήτριες με μόνιμο μαγνήτη.

Πιο συγκεκριμένα σήμερα στην αγορά κυρίαρχος είναι η διπλά τροφοδοτούμενη επαγωγική μηχανή.

Επαγωγικές γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού σταθερής ταχύτητας

Η χρήση αυτού του τύπου γεννητριών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αιολική απαιτεί την χρήση στο σύστημα ενός κιβωτίου ταχυτήτων, soft starter και φίλτρου πυκνωτών.

Το κιβώτιο ταχυτήτων χρειάζεται έτσι ώστε η μηχανή να φτάσει στις απαιτούμενες στροφές οι οποίες εξαρτούνται από τους πόλους.

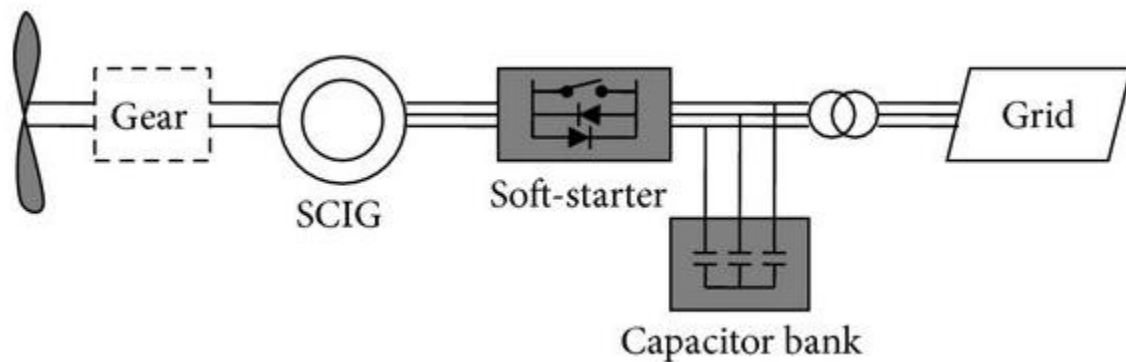
Κατά την εκκίνηση της γεννήτριας, μεταξύ της γεννήτριας και του δικτύου παρεμβάλλεται ένα soft starter έτσι ώστε να μην υπάρχει απότομη ροή μεγάλου ρεύματος από το δίκτυο προς τα τυλίγματα της γεννήτριας, έτσι κατά την εκκίνηση της η γωνία έναυσης των ημιαγωγίμων διακοπών θυρίστορ να ρυθμίζεται έτσι ώστε η τάση στην γεννήτρια να γίνει ίση με την τάση του δικτύου.

Μετά την εκκίνηση της γεννήτριας παράλληλα στους διακόπτες υπάρχουν διακόπτες οι οποίοι παρακάμπτουν τα θυρίστορ με αποτέλεσμα να συνδέεται απ' ευθείας η γεννήτρια στο δίκτυο.

Το σύστημα του soft start αποτελείται από τρία ζεύγη αντιπαράλληλων θυρίστορ ένα για κάθε φάση, ο σκοπός τους είναι να ρυθμίσουν την τάση.

Στην έξοδο προς το δίκτυο υπάρχουν πυκνωτές αντιστάθμισης για βελτίωση του συντελεστή ισχύος όταν η γεννήτρια καταναλώνει άεργο ισχύ από το δίκτυο.

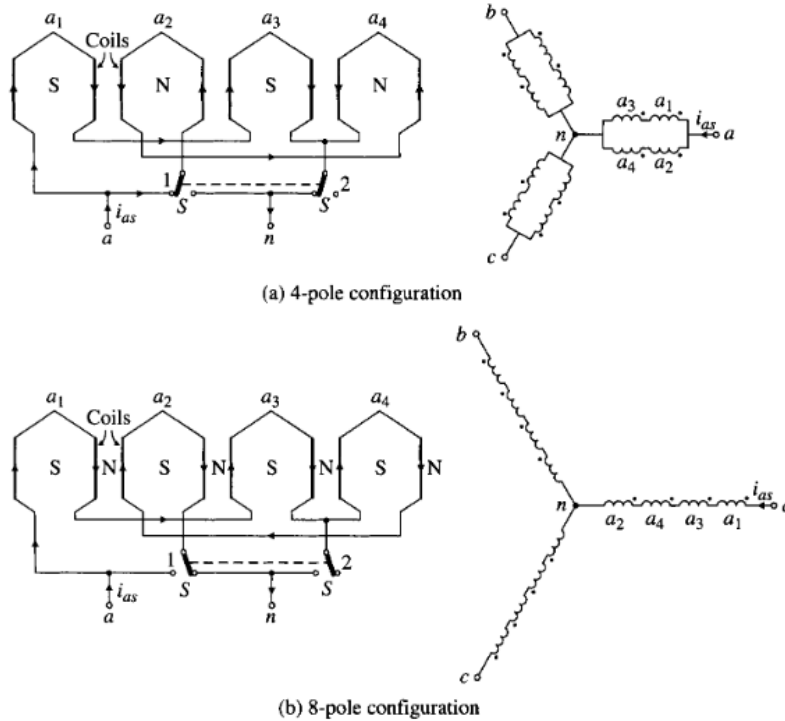
Το σύστημα αυτό στην δομή του είναι απλό και φτηνό, όμως αυτό έρχεται με το αρνητικό του ότι δεν έχει καλή εκμετάλλευση ισχύος λόγω του ότι μπορεί να παράγει ηλεκτρική ισχύ μόνο σε συγκεκριμένες στροφές.



Εικόνα 25: Σύστημα ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών. (https://www.researchgate.net/figure/A-Wind-Turbine-with-a-Squirrel-Cage-Induction-Generator-5_fig3_24535586)

Επαγωγικές γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού 2 σταθερών ταχυτήτων

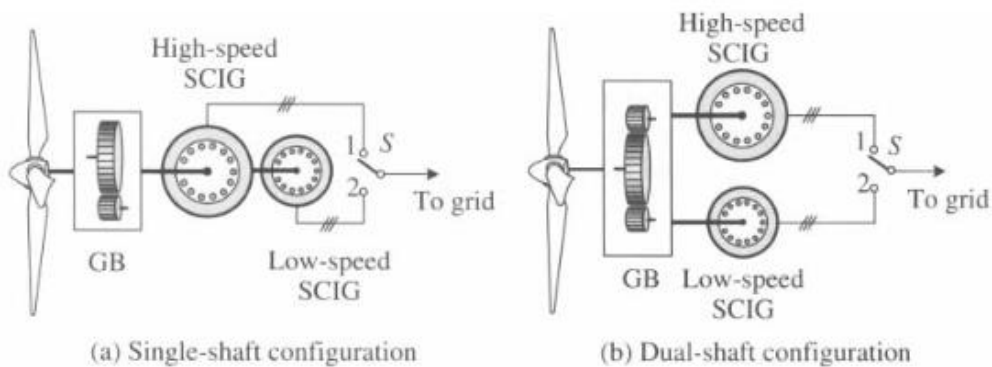
Το παραπάνω σύστημα έχει βελτιωθεί με την μεταβολή του αριθμού των πόλων της ηλεκτρικής μηχανής, χρησιμοποιεί τα ίδια στοιχεία με την προσθήκη ενός συστήματος για αλλαγή της συνδεσμολογίας των τυλιγμάτων του στάτη. Αυτό επιτρέπει την εκμετάλλευση του ανέμου και σε χαμηλότερη ταχύτητα αλλάζοντας τους πόλους από 4 σε 8 π.χ.



Εικόνα 26: Συνδεσμολογία των τυλιγμάτων του στάτη σε 4-πολική διάταξη και έπειτα σε 8-πολική.

Μια ακόμη παραλλαγή της μεθόδου αυτής είναι η χρήση 2 διαφορετικών γεννητριών στον ίδιο άξονα. Οι δύο γεννήτριες έχουν την διαφορά ότι έχουν διαφορετικούς πόλους έτσι η μία θα λειτουργεί σε χαμηλή ταχύτητα περιστροφής και άλλη σε υψηλή

Η διάταξη μπορεί να γίνει με δύο τρόπους ο ένας είναι πάνω στον ίδιο άξονα εξόδου από το κιβώτιο ταχυτήτων να συνδεθούν οι δύο γεννήτριες η μια πίσω από την άλλη, και ο άλλος είναι να συνδεθούν η μια δίπλα στην άλλη αλλά εκεί θα πρέπει το κιβώτιο ταχυτήτων να έχει δύο εξόδους.



Εικόνα 27: Σύνδεση των γεννητριών σε ανεμογεννήτρια 2 ταχυτήτων.

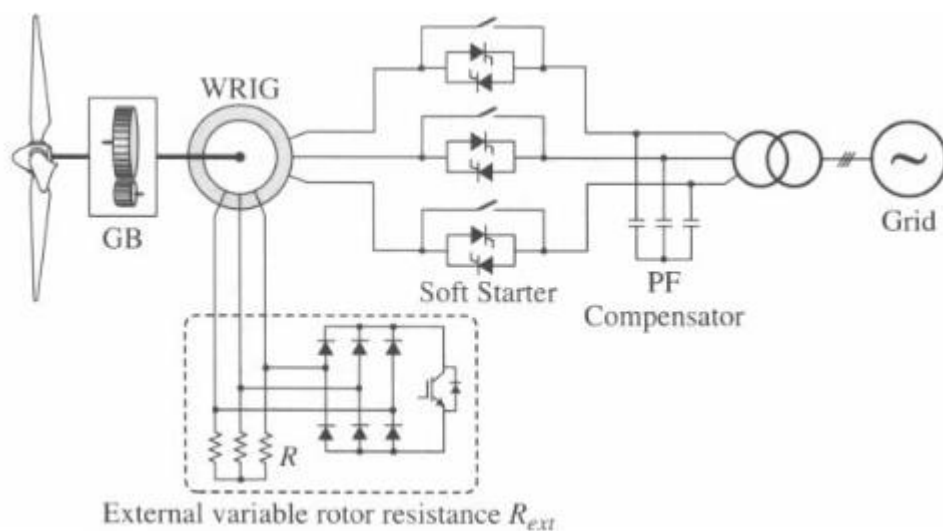
Γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα με εξωτερικό φορτίο στον δρομέα

Πρόκειται για μια διάταξη η οποία είναι απλή, φτηνή και προσφέρει λειτουργία σε μικρό εύρος ταχυτήτων της τάξης του 10% από τις σύγχρονες στροφές της γεννήτριας.

Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση γεννήτριας δακτυλιοφόρου δρομέα η οποία έχει στα τυλίγματα του δρομέα συνδεδεμένο φορτίο με αντιστάσεις η οποία μπορεί να μεταβληθεί με την χρήση παράλληλα μιας τριφασικής γέφυρας με διόδους και ενός ψαλιδιστή συνεχούς ρεύματος.

Με τον έλεγχο της αντίστασης μπορεί να γίνει έλεγχος της ροπής και την ολίσθησης της γεννήτριας.

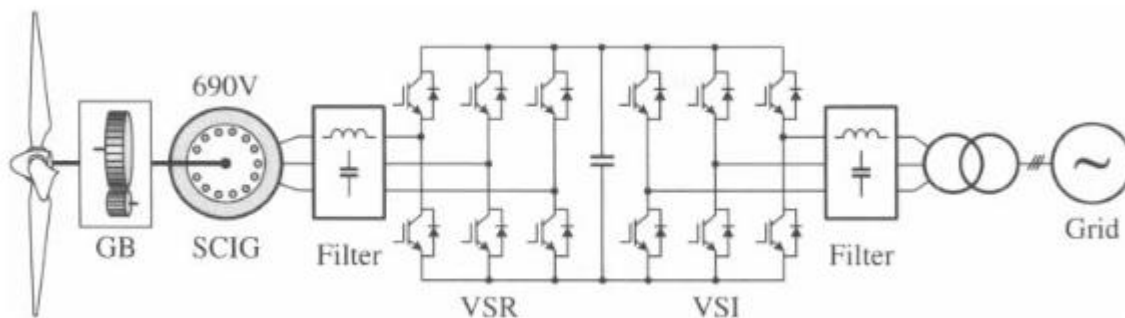
Κατασκευαστικά το κύκλωμα αντιστάσεων μπορεί να βρίσκεται εντός του δρομέα μειώνοντας έτσι το κόστος συντήρησης, όμως αυτό έχει το μειονέκτημα ότι θερμαίνεται η γεννήτρια.



Εικόνα 28: Σύνδεση της γεννήτριας δακτυλιοφόρου δρομέα με εξωτερικό φορτίο δρομέα.

Γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού με μετατροπείς ισχύος πλήρως ελεγχόμενους

Το σύστημα αυτό αποτελείται από μια γεννήτρια βραχυκυκλωμένου δρομέα η οποία είναι συνδεδεμένη με 2 μετατροπείς από εναλλασσόμενη σε συνεχής τάση και μετά πάλι εναλλασσόμενη. Αυτή η διάταξη επιτρέπει στην γεννήτρια να περιστρέφεται ανεξάρτητα από τις απαιτούμενες στροφές του δικτύου. Μεταξύ των μετατροπέων υπάρχει πυκνωτής (dc-link) για σταθεροποίηση της συνεχούς τάσης. Επίσης υπάρχουν αντίστοιχα φίλτρα για εξομάλυνση απότομων αυξήσεων του ρεύματος.



Εικόνα 29: Γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού με μετατροπείς ισχύος πλήρως ελεγχόμενους.

Διπλά τροφοδοτούμενες επαγωγικές γεννήτριες (DFIM)

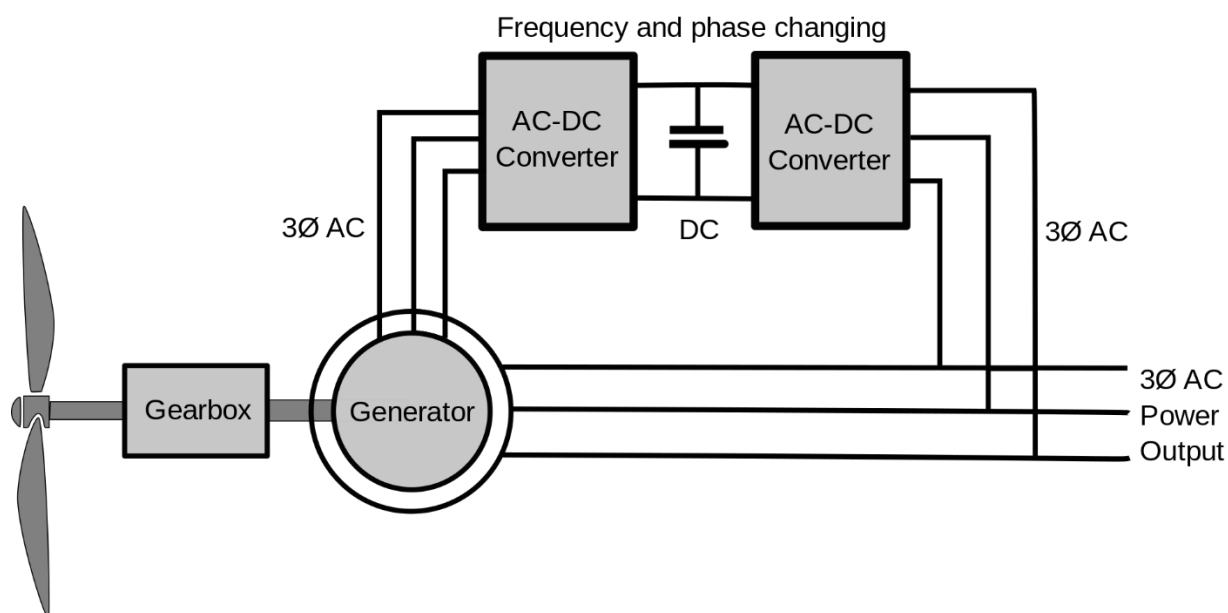
Οι διπλά τροφοδοτούμενες ηλεκτρικές γεννήτριες είναι παρόμοιες με τις εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) ηλεκτρικές γεννήτριες, αλλά διαθέτουν επιπλέον χαρακτηριστικά που τους επιτρέπουν να λειτουργούν σε ταχύτητες ελαφρά πάνω ή κάτω από τη φυσική τους σύγχρονη ταχύτητα. Αυτό είναι χρήσιμο για μεγάλες ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας, επειδή ο αέρας μπορεί να αλλάξει ξαφνικά. Όταν ένας ξαφνικός άνεμος χτυπά μια ανεμογεννήτρια, οι λεπίδες προσπαθούν να επιταχύνουν, αλλά μια σύγχρονη γεννήτρια είναι κλειδωμένη στην ταχύτητα του δικτύου ισχύος και δεν μπορεί να επιταχύνει. Έτσι, αναπτύσσονται μεγάλες δυνάμεις στον δρομέα, το κιβώτιο ταχυτήτων και τη γεννήτρια καθώς το δίκτυο αντιδρά. Αυτό προκαλεί φθορά και ζημιές στον μηχανισμό. Εάν η ανεμογεννήτρια επιτραπεί να επιταχύνει αμέσως μόλις χτυπηθεί από μια ξαφνική ριπή ανέμου, οι προστιθέμενες επιβαρύνσεις είναι χαμηλότερες, με την ενέργεια από την ριπή να μετατρέπεται ακόμη σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια.

Ένας τρόπος για να επιτραπεί η μεταβολή της ταχύτητας της ανεμογεννήτριας είναι να αποδεχθούμε τη συχνότητα που παράγει ο γεννήτρια, να τη μετατρέψουμε σε συνεχές ρεύμα (DC) και στη συνέχεια να τη μετατρέψουμε σε εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) στην επιθυμητή συχνότητα εξόδου χρησιμοποιώντας έναν μετατροπέα. Αυτό είναι κοινό για μικρές ανεμογεννήτριες σπιτιών και αγροκτημάτων. Αλλά οι μετατροπείς που απαιτούνται για ανεμογεννήτριες μεγάλης ισχύος είναι μεγάλοι και ακριβοί.

Οι διπλά τροφοδοτούμενες γεννήτριες αποτελούν μια άλλη λύση σε αυτό το πρόβλημα. Αντί για τη συνήθη διέγερση που τροφοδοτείται με DC και μια αρματούρα όπου εξάγεται η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, υπάρχουν δύο τριφασικά τυλίγματα, ένα σταθερό και ένα περιστρεφόμενο, που συνδέονται ξεχωριστά με εξοπλισμό έξω από τη γεννήτρια. Επομένως, ο όρος "διπλά τροφοδοτούμενοι" χρησιμοποιείται για αυτούς τους τύπους μηχανών.

Το ένα τύλιγμα συνδέεται απευθείας στην έξοδο και παράγει 3-φασική AC ισχύ στην επιθυμητή συχνότητα του δικτύου. Το άλλο τύλιγμα (παραδοσιακά ονομάζεται διέγερση) συνδέεται με 3-φασική AC ισχύ με μεταβαλλόμενη συχνότητα. Αυτή η εισαγωγική ισχύς προσαρμόζεται στη συχνότητα και τη φάση για να αντισταθμίσει τις αλλαγές στην ταχύτητα της ανεμογεννήτριας.

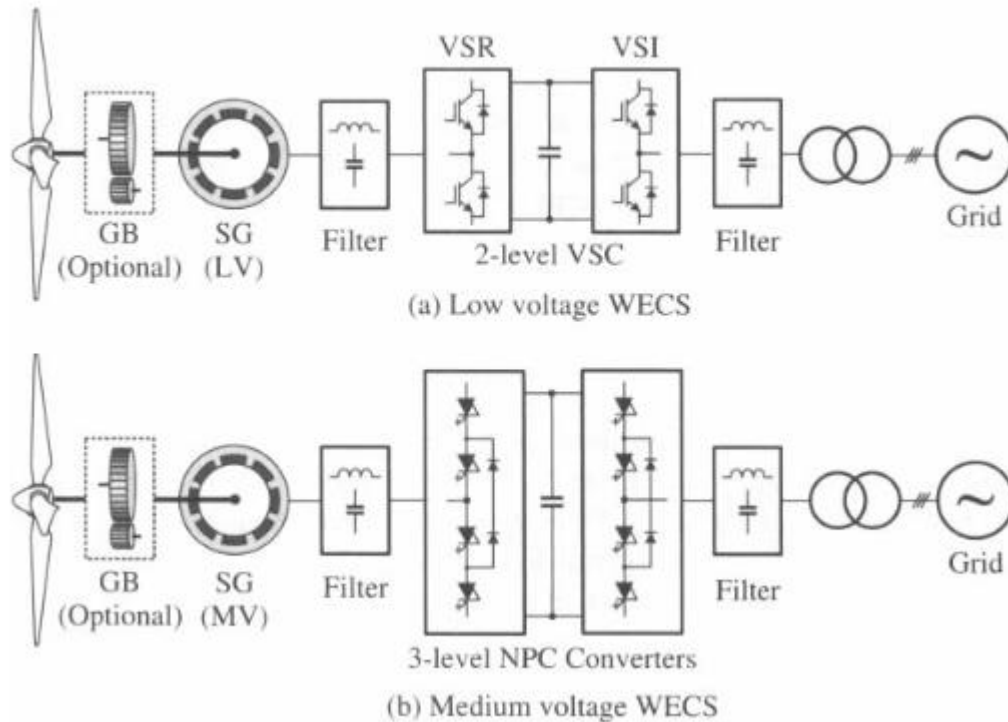
Η προσαρμογή της συχνότητας και της φάσης απαιτεί έναν μετατροπέα AC σε DC σε AC. Αυτός κατασκευάζεται συνήθως από ημιαγωγούς IGBT. Ο μετατροπέας είναι αμφίδρομος, και μπορεί να μεταφέρει ισχύ προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Η ισχύς μπορεί να ρέει τόσο από το τύλιγμα της διέγερσης όσο και από το τύλιγμα εξόδου.



Εικόνα 30: Διάγραμμα με την διασύνδεση της γεννήτριας DFIM. (https://en.wikipedia.org/wiki/Doubly_fed_electric_machine)

Σύγχρονες γεννήτριες

Οι σύγχρονες γεννήτριες έχουν πολλές περισσότερες διαμορφώσεις από τα συστήματα με ασύγχρονες γεννήτριες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στον δρομέα υπάρχουν μόνιμοι μαγνήτες είτε πηνία τροφοδοτούμενα από συνεχή τάση και επίσης είναι πιο εύκολο και οικονομικό να έχουν παραπάνω φάσεις και παραπάνω πόλους έτσι δεν είναι απαραίτητη η χρήση κιβωτίου ταχυτήτων, καθώς μπορεί να γίνει χρήση μεγαλύτερης γκάμας ηλεκτρονικών διατάξεων.



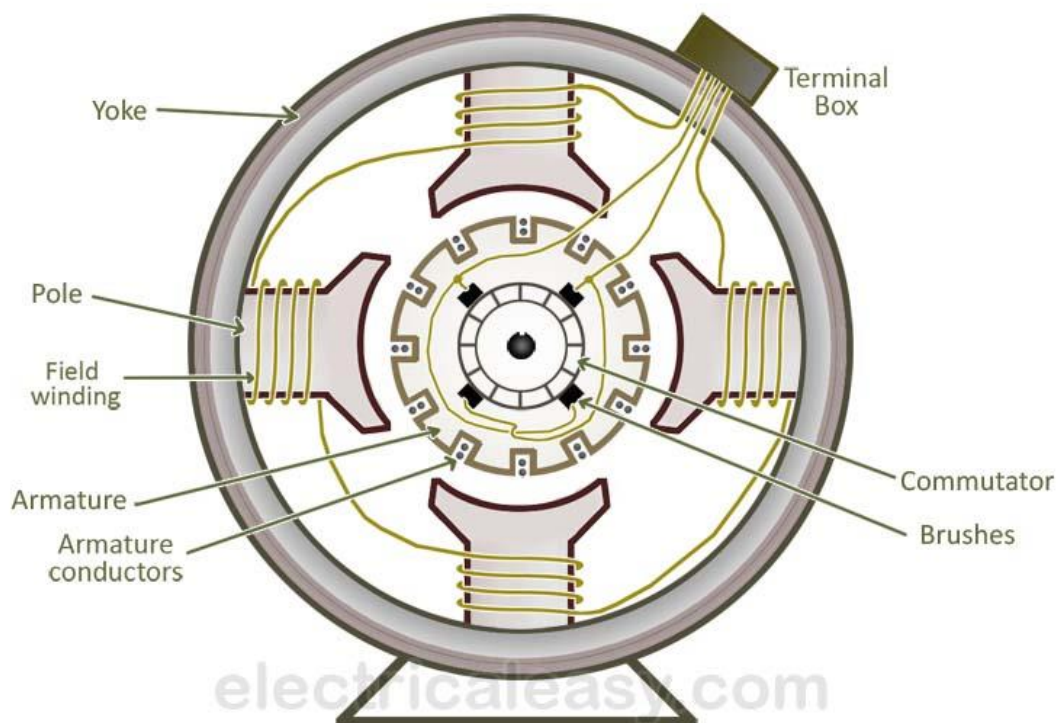
Εικόνα 31: Διατάξεις σύγχρονων γεννητριών.

Γεννήτριες συνεχούς ρεύματος.

Στις πρώτες ανεμογεννήτριες που σχεδιάστηκαν, ως γεννήτρια χρησιμοποιήθηκαν γεννήτριες συνεχούς ρεύματος (DC) παράλληλης διέγερσης ή αυτοδιέγερσης

Σε αυτές τις γεννήτριες το τύλιγμα διέγερσης είναι στον στάτη και το τύλιγμα του οπλισμού στον δρομέα. Το ηλεκτρικό πεδίο δημιουργείται από ρεύματα που περνούν μέσα από το τύλιγμα διέγερσης που είναι παράλληλο προς το τύλιγμα του οπλισμού. Το παραγόμενο ρεύμα περνάει από εξαρτήματα ηλεκτρονικών ισχύος ώστε να γίνει συνεχές. Σε αυτές τις γεννήτριες, το ρεύμα διέγερσης και επομένως το μαγνητικό πεδίο αυξάνεται με την ταχύτητα λειτουργίας (μέχρι ένα σημείο). Η τάση στον οπλισμό και η ηλεκτρική ροπή επίσης αυξάνονται με την ταχύτητα. Η πραγματική ταχύτητα της ανεμογεννήτριας καθορίζεται από την ισορροπία μεταξύ της ροπής από την πλήμνη της ανεμογεννήτριας και την ηλεκτρική ροπή.

Αυτού του τύπου γεννήτριες συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούνται σπάνια λόγω του υψηλού κόστους και της συντήρησης που απαιτούν.



Εικόνα 32: Γεννήτρια συνεχούς ρεύματος. (<https://www.electricaleasy.com/2022/09/construction-and-working-of-dc-generator.html>)

2.1.10 ΜΗΧΑΝΙΚΟ ΦΡΕΝΟ

Υπάρχουν δυο τύποι μηχανικών φρένων που χρησιμοποιούνται συνήθως σε ανεμογεννήτριες, δισκόφρενα και φρένα με συμπλέκτη.

Το δισκόφρενο λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο με αυτό ενός αυτοκινήτου. Ένας ατσαλένιος δίσκος είναι άκαμπτα στερεωμένος στον άξονα που πρόκειται να φρενάρι. Κατά το φρενάρισμα ενεργοποιείται υδραυλικά ή δαγκάνα και πιέζει τα τακάκια των φρένων πάνω στο δίσκο. Η δύναμη που προκύπτει δημιουργεί μια αντίθετη ροπή στην κίνηση του δίσκου, επιβραδύνοντας έτσι τον δρομέα.

Τα φρένα τύπου συμπλέκτη αποτελούνται από τουλάχιστον μια πλάκα πίεσης και έναν δίσκο τριβής. Η ενεργοποίηση των φρένων συμπλέκτη γίνεται συνήθως μέσω ελατηρίων, οπότε είναι ασφαλή σε αστοχίες από τον σχεδιασμό τους. Τα φρένα απελευθερώνονται από πεπιεσμένο αέρα ή υδραυλικό υγρό.



Εικόνα 33: Σύστημα κιβωτίου ταχυτήτων δρομέα και δισκόφρενού ανεμογεννήτριας.
(https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Gearbox,_Rotor_Shaft_and_Disk_Brake_Assembly_for_Turbine_No_3_-_geograph.org.uk_-_758164.jpg)

Ένα φρένο που προορίζεται να σταματήσει έναν δρομέα θα πρέπει να εφαρμόζει κατευθείαν ροπή και να φτάνει στην μέγιστη εντός λίγων δευτερολέπτων. Ο επιλεγμένος χρόνος αύξησης της ροπής είναι μια ισορροπία μεταξύ στιγμιαίας και αργής εφαρμογής της ροπής ανάλογα με την επιτάχυνση του δρομέα και της θερμοκρασίας των φρένων κατά την διάρκεια της επιβράδυνσης. Κανονικά, ολόκληρη η διαδικασία πέδησης, από την ενεργοποίηση των φρενών μέχρι την πλήρη ακινητοποίηση του δρομέα θα πρέπει να ολοκληρώνεται σε λιγότερο από 5 δευτερόλεπτα.

Η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του φρένου είναι ένας σημαντικός παράγοντας. Πρώτα από όλα, το φρένο πρέπει να απορροφά όλη την κινητική ενέργεια του δρομέα όταν αυτός περιστρέφεται με την μέγιστη ταχύτητα του. Πρέπει επίσης να μπορεί να απορροφά οποιαδήποτε πρόσθετη ενέργεια που θα μπορούσε να αποκτήσει ο δρομέας κατά την περίοδο στάσης του.

2.1.11 ΠΥΡΓΟΣ ΚΑΙ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ

Ο πύργος είναι ο κορμός της ανεμογεννήτριας. Χαρακτηρίζεται ως ο κορμός όλης της κατασκευής, διότι στηρίζει επάνω του το κουβούκλιο και τα κινούμενα μέρη της, δηλαδή ολόκληρη την ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση.

Το κωνικό σχήμα του πύργου εξασφαλίζει την αύξηση της αντοχής παράλληλα με εξοικονόμηση υλικών για μείωση του κόστους παραγωγής και η διάμετρος του αυξάνεται όσο πλησιάζουμε τη βάση. Σημειώνεται ότι η θεμελίωση του αποτελείται από οπλισμένο σκυρόδεμα πάνω στο οποίο σταθεροποιείται με κοχλίες. Κύριο υλικό κατασκευής του πύργου είναι το ατσάλι αν και μερικές φορές χρησιμοποιείτε σκυρόδεμα. Όταν ως υλικό κατασκευής του πύργου χρησιμοποιείται ο χάλυβας, είναι συνήθως γαλβανισμένος ή βαμμένος για προστασία από την διάβρωση.

Το ύψος του πύργου κυμαίνεται στα 40-80 μέτρα, ώστε ο αέρας που προσπίπτει στα περύγια της ανεμογεννήτριας να έχει ομαλή ροή και όχι τυρβώδη για την μείωση του θορύβου στο ελάχιστο. Πλεονέκτημα αποτελεί το μεγάλο ύψος του πύργου, διότι οι ταχύτητες του ανέμου αυξάνονται όσο απομακρύνεται από το έδαφος. Ένας πύργος που κυμαίνεται στα 40 με 80 μέτρα θα έχει μια σύγχρονη ανεμογεννήτρια 1000 kW. Στο εσωτερικό του πύργου υπάρχουν έχει καλώδια για την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας και για την γείωση της κατασκευής καθώς επίσης και σκάλες και ανελκυστήρες για να μπορεί το προσωπικό που κάνει συντήρηση να φτάσει στο κέλυφος.

Υπάρχουν τρία είδη πύργων:

- Πύργος με δικτυωτό πλέγμα (Truss tower)
- Σωληνοειδής πύργος (Tubular tower)
- Πύργος δοκαριού (Guyed tower)



Εικόνα 34: Είδη πύργων ανεμογεννήτριας. (<http://www.steelwindtower.com/wind-turbine-tower-comparison-pros-and-cons-explained/>)

Τα θεμέλια της ανεμογεννήτριας πρέπει να εξασφαλίζουν την επάρκεια της στις ακραίες καιρικές συνθήκες και να την διατηρούν σταθερή. Η βάση κατασκευάζεται από οπλισμένο σκυρόδεμα μέσα στο οποίο εγκιβωτίζεται ο κορμός του πύργου στήριξης. Στην περίπτωση όπου η εγκατάσταση της ανεμογεννήτριας γίνεται σε βραχώδη τοποθεσία, η θεμελίωση κατασκευάζεται από ράβδους τοποθετημένες βαθιά μέσα στον βράχο. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ένα επίθεμα από σκυρόδεμα για την παροχή μιας επίπεδης επιφανείας ώστε να γίνει η τοποθέτηση του πύργου.

2.2 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΑΞΟΝΑ

Οι ανεμογεννήτριες με κάθετο άξονα έχουν τον κύριο άξονα του δρομέα διαταγμένο κάθετα. Ένα πλεονέκτημα αυτής της διάταξης είναι ότι η ανεμογεννήτρια δεν χρειάζεται να ευθυγραμμίζεται με τον άνεμο για να είναι αποτελεσματική, κάτι που αποτελεί πλεονέκτημα σε τοποθεσίες όπου η κατεύθυνση του ανέμου είναι υψηλά μεταβαλλόμενη. Επιπλέον, ο γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων μπορούν να τοποθετηθούν κοντά στο έδαφος, χρησιμοποιώντας έναν άμεσο μηχανισμό από τον δρομέα προς το κιβώτιο ταχυτήτων στο έδαφος, βελτιώνοντας την προσβασιμότητα για συντήρηση. Ωστόσο, αυτά τα σχέδια παράγουν πολύ λιγότερη ενέργεια μέσω χρόνο, που αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα.

Οι σχεδιασμοί με κάθετο άξονα έχουν πολύ χαμηλότερη απόδοση από τους κανονικούς οριζόντιους σχεδιασμούς. Τα βασικά μειονεκτήματα είναι η σχετικά χαμηλή περιστροφική ταχύτητα με την ανάγκη για υψηλή ροπή και κόστος του μηχανισμού μετάδοσης κίνησης, τον χαμηλό συντελεστή ισχύος, την 360-μοίρες περιστροφή όλου του συστήματος με τα πτερύγια μέσα στη ροή του ανέμου κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου και, συνεπώς, το υψηλό δυναμικό φορτίο στην λεπίδα, την παλμική ροπή που δημιουργείται από ορισμένους σχεδιασμούς δρομέα στον μηχανισμό μετάδοσης κίνησης και τη δυσκολία να μοντελοποιηθεί ακριβώς η ροή του ανέμου και, συνεπώς, οι προκλήσεις στην ανάλυση και τον σχεδιασμό του δρομέα πριν από την κατασκευή ενός πρωτότυπου.

Οι διαφορές που έχουν οι κάθετες ανεμογεννήτριες μεταξύ τους είναι στα πτερύγια το υπόλοιπο σύστημα είναι κοινό, το οποίο αποτελείται από την γεννήτρια τον δρομέα με τα πτερύγια και ένα κιβώτιο ταχυτήτων που στο οποίο μπορεί να στηριχτεί όλο το βάρος των πτερυγίων και του άξονα.

Τα δύο κύρια μοντέλα κάθετης ανεμογεννήτριας είναι οι Savonius και οι Darrieus οι υπόλοιποι σχεδιασμοί έχουν ως βάση αυτά τα μοντέλα ή συνδυασμό τους.

2.2.1 SAVONIUS

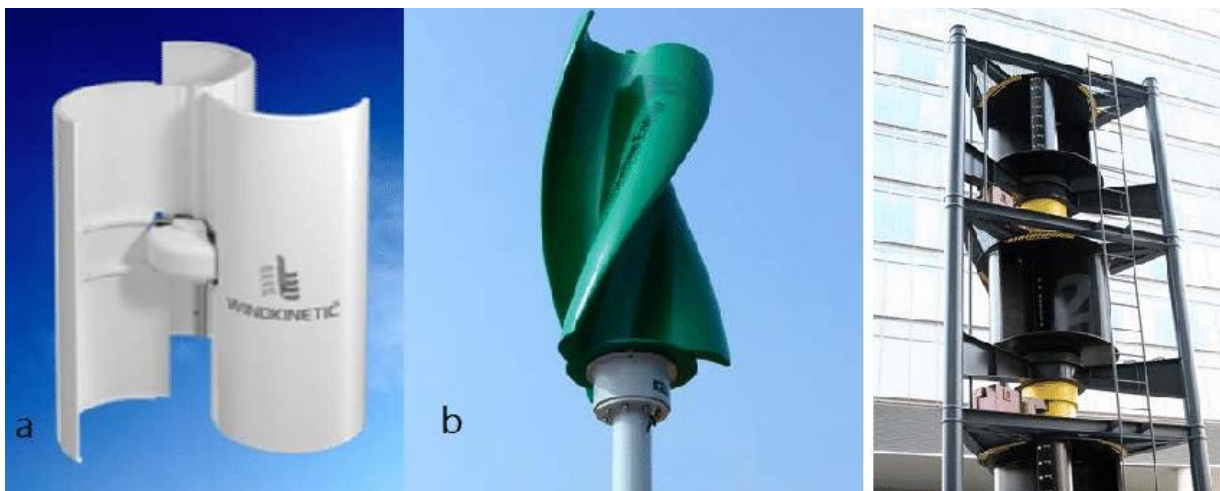
Οι ανεμογεννήτριες Savonius είναι μια από τις απλούστερες ανεμογεννήτριες. Αποτελείται από δύο ή τρεις κουτάλες. Κοιτώντας τον δρομέα από πάνω, μια μηχανή με δύο κουτάλες μπορεί να μοιάζει με το γράμμα "S" σε διατομή. Λόγω της καμπυλότητας, οι κουτάλες αντιμετωπίζουν λιγότερη αντίσταση όταν κινούνται αντίθετα προς τον άνεμο από ό,τι όταν κινούνται προς τον άνεμο. Η διαφορετική αντίσταση προκαλεί την περιστροφική κίνηση της ανεμογεννήτριας Savonius. Λόγω της φύσης τους, οι ανεμογεννήτριες Savonius εξάγουν πολύ λιγότερη από την ισχύ του ανέμου σε σύγκριση με άλλες ανεμογεννήτριες παρόμοιου μεγέθους.

Έχουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των οριζόντιων ανεμογεννητριών, κυρίως χαμηλά επίπεδα θορύβου, την ικανότητα να λειτουργούν με χαμηλές ταχύτητες ανέμου και τη σχετική ανεξαρτησία από την κατεύθυνση του ανέμου.

Βάσει του νόμου Betz η αποδοτικότητα του ανέμου σε αυτή τη διάταξη φτάνει το 20% ($C_p = 0.2$).

Αυτές οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται όταν προτεραιότητα έχει το κόστος ενώ η απόδοση είναι δευτερεύουσα.

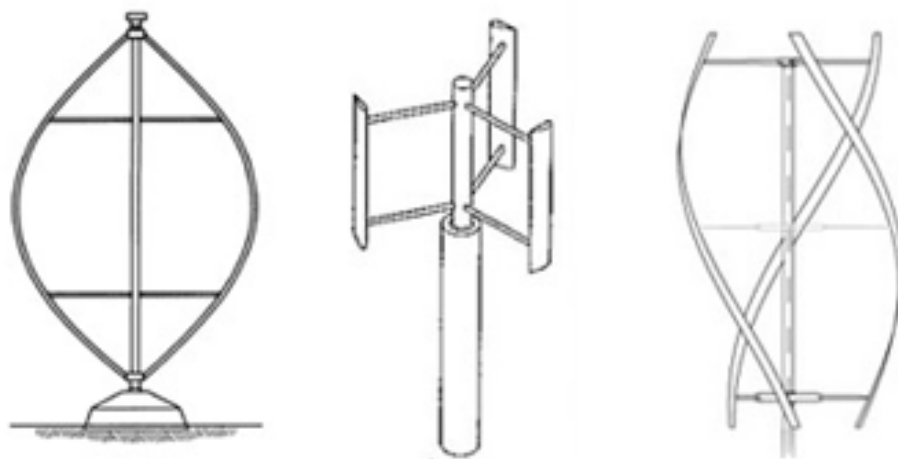
Για αυτό το λόγο τα περισσότερα ανεμόμετρα είναι τύπου Savonius επειδή μπορούν να έχουν ακρίβεια ταχύτητας ενώ δεν μας ενδιαφέρει η απόδοση.



Εικόνα 35: Ανεμογεννήτριες τύπου Savonius. a) Απλός τρίπτερος. b) Ελικοειδής τρίπτερος. c) Πύργος με πολλές πτερωτές για εκμετάλλευση ανέμου σε πολλά ύψη. (https://www.researchgate.net/figure/a-Savonius-turbines-with-Straight-bucket-19-b-Helical-bucket-c-Multi-stage_fig1_332676704)

2.2.2 Darrieus

Ο τύπος Darrieus ανεμογεννήτριας αποτελείται από δύο συμμετρικά ή περισσότερα πτερύγια σε σχήμα αεροτομής, τα οποία είναι προσδεμένα πάνω στον άξονα περιστροφής. Ο αέρας που περνά από τα πτερύγια δημιουργεί αεροδυναμική άνωση, λόγω της θετικής γωνίας προσβολής που αντικρίζουν σε σχέση με τη ροή, με αποτέλεσμα να υπόκεινται σε περιστροφή. Ένα πρόβλημα είναι η συνεχής αλλαγή της γωνίας προσβολής που δημιουργεί κυκλική φόρτιση στα πτερύγια και δυσχεραίνει το σχεδιασμό τους όπως και η μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής σε σχέση με την ταχύτητα ανέμου, ωστόσο δεν επηρεάζει την κίνηση, αφού και σε αρνητικές γωνίες προσβολής η κινητήρια δύναμη είναι προς την κατεύθυνση περιστροφής. Επίσης, αρνητικός παράγοντας είναι η δυσκολία στην εκκίνηση της ανεμογεννήτριας από στάση.



Εικόνα 36: Ανεμογεννήτρια Darrieus και παραλλαγές της. a) Darrieus b) H - Rotor c) Darrieus ελικοειδής.
(<https://www.quora.com/What-is-a-vertical-wind-turbine>)

2.2.3 ΠΑΡΑΛΛΑΓΕΣ ΤΩΝ DARRIEUS ΚΑΙ SAVONIUS

Παραλλαγές των παραπάνω κάθετων ανεμογεννητριών είναι η ελικοειδής μορφοποίηση των πτερυγίων τους έτσι ώστε να μειωθεί το πρόβλημα της αυτόεκκίνησης για του τύπου Darrieus, εξομαλύνει τις ροπές που δέχεται κατά τη διάρκεια της περιστροφής με αποτέλεσμα να μειώνει τους κραδασμούς.

Το ανεμόμετρο είναι ένας συνδυασμός H-Rotor και Savonius.

2.3 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ VORTEX

Είναι μια καινοτόμα ιδέα ανεμογεννήτριας η οποία στηρίζει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο φαινόμενο του στροβιλισμού.

Στροβιλισμός αναφέρεται σε μια περιοχή εντός ενός ρευστού, όπως αέρας ή υγρό, όπου η ροή του ρευστού περιστρέφεται ή γυρίζει γύρω από έναν άξονα.

Οι στρόβιλοι μπορούν να πάρουν διάφορες μορφές και χαρακτηρίζονται από κυκλική κίνηση. Είναι συνήθεις φυσικά φαινόμενα και μπορούν να παρατηρηθούν σε διάφορα πλαίσια, συμπεριλαμβανομένης της μετεωρολογίας, της δυναμικής των ρευστών και ακόμα και στην καθημερινή ζωή.

Οι στρόβιλοι μπορούν να δημιουργηθούν υπό διάφορες συνθήκες. Συχνά προκύπτουν όταν υπάρχει διαφορά στην ταχύτητα ή στην πίεση του ρευστού.

Για παράδειγμα, όταν ο άνεμος ρέει γύρω από ένα κτίριο ή ένα βουνό, μπορεί να δημιουργήσει στρόβιλους στην αντίθετη πλευρά.

Αν και είναι σε πειραματικό στάδιο η εταιρία υποστηρίζει διάφορα πλεονεκτήματα έναντι των υπολοίπων ανεμογεννητριών τα οποία είναι :

- Απουσία λιπαντικών ουσιών και γρاناζιών το οποίο σημαίνει λιγότερη συντήρηση
- Δεν χρειάζεται φρένα
- Είναι πάντα προσανατολισμένη
- Εύκολη κατασκευή
- Παρόμοια θεμέλια τις υπάρχουσες ανεμογεννήτριες
- Μεγαλύτερος χρόνος ζωής
- Λιγότερη χρήση γης για την λειτουργία της
- Δεν παράγει θόρυβο στο περιβάλλον
- Είναι φιλικό προς τα πτηνά

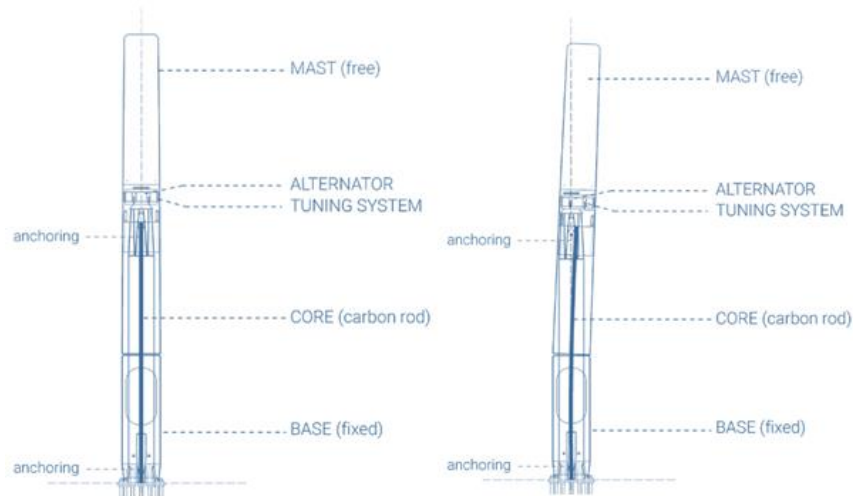
Επιτρέπει εύκολη κατεργασία, εγκατάσταση και λειτουργία.

Είναι μια σταθερή βάση με μια κυλινδρική δομή που πάλλεται ελεύθερα και είναι ενωμένη με ράβδο από ανθρακονήματα. Η εσωτερική δομή δεν έρχεται ποτέ σε επαφή μεταξύ της όμως συνεργάζεται για την παραγωγή ηλεκτρισμού.

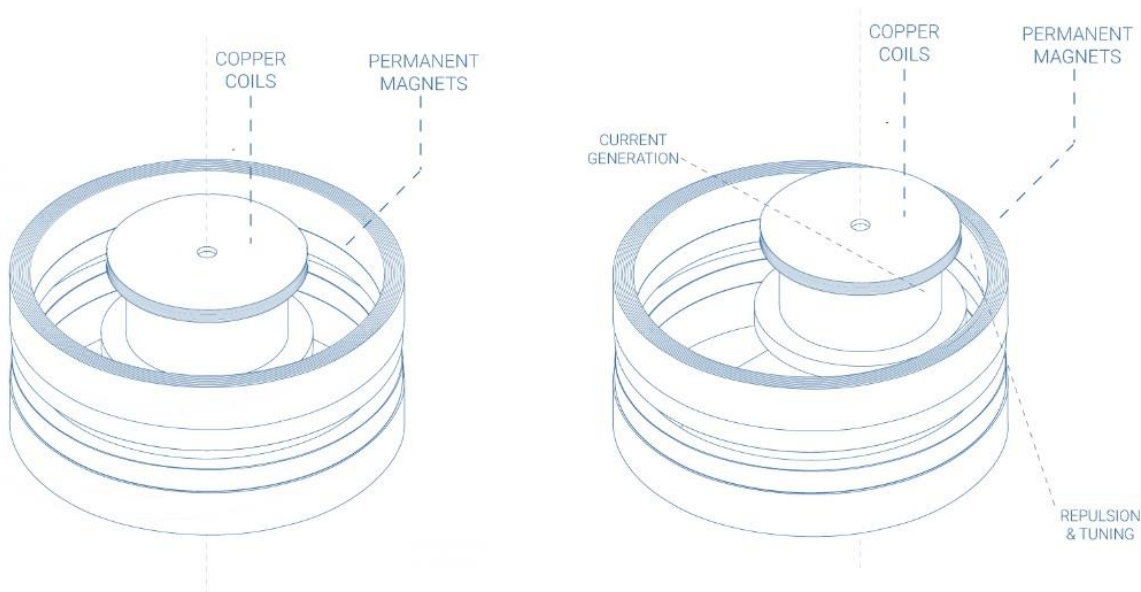
Όταν ο άνεμος περνάει γύρω από την κατασκευή δημιουργούνται στροβιλισμοί από πίεση .

Η συχνότητα των στροβιλισμών εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου και εάν η κατασκευή έχει την ίδια ιδιοσυχνότητα τότε πάλλεται και εκμεταλλεύεται την ενέργεια.

Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται Vortex Shedding.



Εικόνα 37: Σχέδιο της κατασκευής με τις θέσεις λειτουργίας. (<https://vortexbladeless.com/technology/#papers>)



Εικόνα 38: Σχέδιο με την αλληλεπίδραση των μαγνητών και των τυλιγμάτων. (<https://vortexbladeless.com/technology/#papers>)

Η συσκευή με την παλινδρομική κίνηση δημιουργεί αλληλεπιδράσεις μεταξύ τυλιγμάτων και μαγνητικών πεδίων δημιουργώντας έτσι ηλεκτρισμό μέσω ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής χωρίς τη χρήση δρομέα ή κιβωτίου ταχύτητας.

Οι μαγνήτες λειτουργούν και ως σύστημα ρύθμισης, ρυθμίζοντας την ελαστική σταθερά της κυκλικής δομής ώστε να ταιριάζει στην ταχύτητα του ανέμου, έτσι μεγαλώνει το εύρος ταχυτήτων που μπορεί να λειτουργήσει.

3 ΕΙΔΗ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ

Αιολικό πάρκο ονομάζεται μία συστοιχία πολλών ανεμογεννητριών συνδεδεμένες σε παράλληλη ηλεκτρική σύνδεση, οι οποίες εγκαθίστανται και λειτουργούν σε μία περιοχή με υψηλό αιολικό δυναμικό για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και διοχετεύουν το σύνολο της παραγωγής τους στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Ανάλογα με το μέρος όπου εγκαθίστανται οι συστοιχίες των ανεμογεννητριών, τα αιολικά πάρκα διακρίνονται σε χερσαία και υπεράκτια.

Η σημαντικότερη μέχρι τώρα εφαρμογή των ανεμογεννητριών όσον αφορά το οικονομικό μέρος είναι η σύνδεσή τους στο ηλεκτρικό δίκτυο της χώρας και η διοχέτευση του ρεύματος της παραγωγής τους σε αυτό, καθώς και η δυνατότητα αυτόνομης λειτουργίας σε περιοχές όπου δεν ηλεκτροδοτούνται.

Σύμφωνα με τα σημερινά δεδομένα εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό θεωρείται εκείνο του οποίου, η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου ξεπερνά την τιμή των 5m/s. Όσο μεγαλύτερη όμως είναι η ταχύτητα του ανέμου τόσο περισσότερη ενέργεια παρέχεται στο σύστημα. Έτσι είναι σημαντικό να γνωρίζουμε με μεγάλη ακρίβεια το αιολικό δυναμικό μιας περιοχής, ώστε με την κατάλληλη και ορθή μελέτη για τη σχεδίαση του αιολικού πάρκου να γίνεται όσο πιο άριστη εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας.

Για την ηλεκτρική διασύνδεση του πάρκου γενικότερα ισχύει ότι η ηλεκτρογεννήτρια που παράγει την ισχύ συνδέεται μέσω καλωδίων στον μετασχηματιστή της κάθε ανεμογεννήτριας όπου γίνεται η μετατροπή της τάσης του από χαμηλή σε μέση τάση. Έπειτα η ισχύς από όλες τις ανεμογεννήτριες συγκεντρώνεται στον κεντρικό υποσταθμό ανύψωση μέσης τάσεως σε υψηλή. Ο υποσταθμός υψηλής τάσεως είναι το τελευταίο μέρος διαχείρισης της ισχύος από το πάρκο. Αφού έχει μετατραπεί η τάση σε υψηλή, έχουμε τις λιγότερες απώλειες για την μεταφορά ισχύος μέσω αγωγών στο δίκτυο, έτσι έπειτα αναχωρούν τα καλώδια υψηλής τάσεως για τον υποσταθμό ο οποίος βρίσκεται κοντά στους καταναλωτές για μετατροπή της τάσης σε μέση και έπειτα χαμηλή για διανομή της ισχύος.

Η λειτουργία ενός αιολικού πάρκου παρακολουθείται και ελέγχεται σε καθημερινή βάση με ένα εποπτικό σύστημα ελέγχου και συλλογής δεδομένων (SCADA) (Supervision Control And Data Acquisition), το οποίο συνδέει όλα τα δομικά μέρη του αιολικού πάρκου με ένα κεντρικό υπολογιστή μέσω του οποίου ένας χειριστής έχει τη δυνατότητα να επιβλέπει τη λειτουργία του πάρκου και να εξασφαλίζει τη βέλτιστη απόδοση του. Παράλληλα το σύστημα αποθηκεύει τις πληροφορίες αυτές συμβάλλοντας στον εντοπισμό αστοχιών και προβλημάτων λειτουργίας συγκεκριμένων αιολικών μηχανών. Οπότε με βάση το παραπάνω σύστημα θα πρέπει να υπάρχει και μια σύνδεση με οπτικές ίνες για

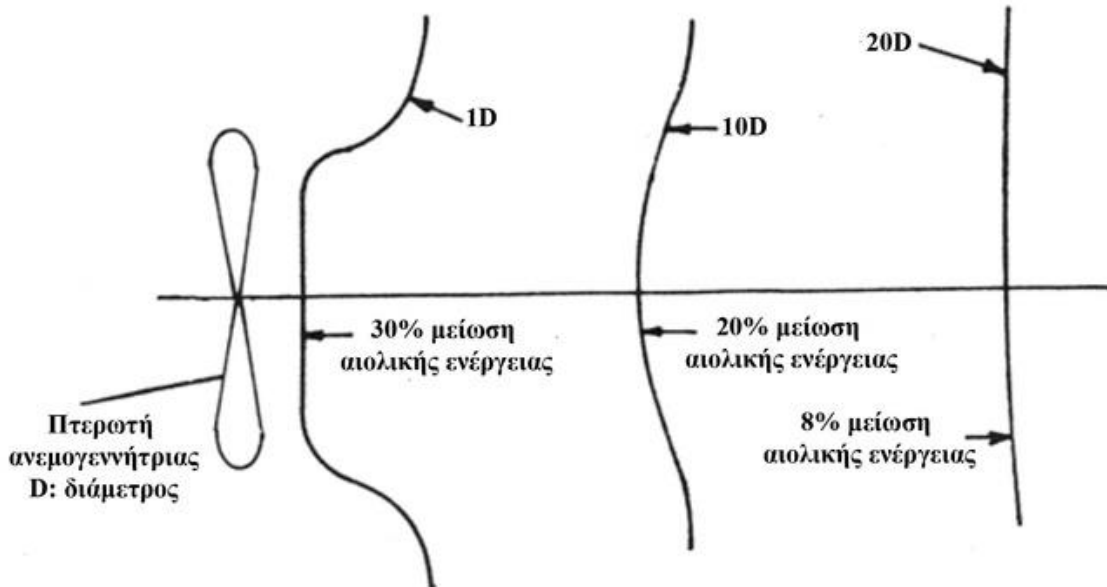
Για όλων των ειδών αιολικά πάρκα θα πρέπει σύμφωνα με το ΕΠΧΣΑΑ για τις ΑΠΕ, η χωροθέτηση αιολικών εγκαταστάσεων μην γίνεται εντός των περιοχών που ονομάζονται «περιοχές αποκλεισμού και ζώνες ασυμβατότητας».

Αυτές είναι:

- Οι περιοχές που περιλαμβάνονται σε πολεοδομικά σχέδια ή όρια οικισμών
- Οι περιοχές που έχουν ανακηρυχθεί ως διατηρητέα μνημεία της παγκόσμιας πολιτιστικής κληρονομιάς, τα μνημείων μικρότερης σημασίας καθώς και οι οριοθετημένες αρχαιολογικές ζώνες προστασίας.
- Οι περιοχές απόλυτης προστασίας της φύσης
- Οι Υγρότοποι Διεθνούς Σημασίας όπως ορίζονται σύμφωνα με τη συνθήκη Ramsar
- Οι πυρήνες εθνικών δρυμών, τα μνημεία της φύσης και τα αισθητικά δάση
- Οι Τόποι Κοινοτικής Σημασίας που ανήκουν στο δίκτυο Natura 2000
- Οι Περιοχές Οργάνωσης Τουριστικών Δραστηριοτήτων (Π.Ο.Τ.Α) και οι Περιοχές Οργανωμένης Ανάπτυξης Παραγωγικών Δραστηριοτήτων (Π.Ο.Α.Π.Δ) του τριτογενούς τομέα παραγωγής
- Οι ατύπως διαμορφωμένες (εκτός σχεδίου δόμησης) τουριστικές και οικιστικές περιοχές
- Οι ακτές κολύμβησης
- Οι περιοχές που φιλοξενούν λατομεία, και επιφανειακές μεταλλευτικές και εξορυκτικές ζώνες
- Άλλες περιοχές ή ζώνες που υπάγονται σε ειδικό καθεστώς χρήσεων γης σύμφωνα με το οποίο δεν επιτρέπεται τέτοιου είδους εγκατάσταση

Μια ακόμα παράμετρος που πρέπει να εξεταστεί σε ένα πάρκο είναι η σκίαση της ανεμογεννήτριας.

Οι ανεμογεννήτριες λόγω της δέσμευσης ενέργειας από τον άνεμο, επιβραδύνουν την ροή του ανέμου με αποτέλεσμα οι υπόλοιπες ανεμογεννήτριες που πιθανόν να βρίσκονται πίσω από την πρώτη να μην λαμβάνουν άνεμο με τα ίδια χαρακτηριστικά που έλαβε η πρώτη ανεμογεννήτρια. Τα κύρια χαρακτηριστικά που έχει ο άνεμος στην περιοχή σκίασης είναι η μειωμένη ταχύτητα του και η μεγάλη τύρβη.



Η απόσταση L στην οποία ο άνεμος ανακτά τα αρχικά του χαρακτηριστικά έχει εκτιμηθεί από πειραματικά δεδομένα ότι είναι στην περιοχή $8D$ έως $10D$, όπου D η διάμετρος της πλήμνης μαζί με τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας. Από πειραματικά δεδομένα επίσης έχει προκύψει ότι η γωνία B κυμαίνεται από $11,5^\circ$ έως $12,5^\circ$.

Για το υπό ανάπτυξη σύστημα οι προτεινόμενες (default) τιμές είναι:

$L=10D$

$\delta=12^\circ$

Η περιοχή όπως διαμορφώνεται για τις προτεινόμενες τιμές είναι ένα τραπέζιο, όπως φαίνεται στην εικόνα 10, με:

Ύψος L

Μικρή βάση D

Μεγάλο βάση $D+2L \cdot \epsilon\phi 12^\circ$

Το πρόβλημα της μακροσκοπικής χωροθέτησης ενός αιολικού πάρκου σε μια περιοχή συνίσταται στην βέλτιστη τοποθέτηση των ανεμογεννητριών του.

3.1 ΧΕΡΣΑΙΟ ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ

Τα χερσαία αιολικά πάρκα είναι εγκατεστημένα κατά κανόνα σε κορυφογραμμές μεγάλου υψομέτρου, όπου παρουσιάζονται μεγάλες ταχύτητες ανέμων. Τέτοιου είδους πάρκα, εντοπίζονται και σε πεδινές περιοχές στις οποίες γίνεται προσπάθεια για την πλήρη αξιοποίηση του μεγαλύτερου δυνατού ποσοστού αιολικού δυναμικού.

Το μεγάλο πρόβλημα για την χερσαία εγκατάσταση είναι η μεταφορά του εξοπλισμού στο σημείο εγκατάστασης εξαιτίας του όγκου των μηχανημάτων, των δύσβατων περιοχών και του ελλιπούς οδικού δικτύου. Έτσι το κόστος κατασκευής του πάρκου αυξάνεται και ειδικά όταν απαιτούνται περαιτέρω εργασίες όπως η διάνοιξη δρόμων για τη διέλευση των μηχανημάτων.

Οι βασικές τεχνικές προδιαγραφές των δρόμων πρόσβασης είναι:

- Ομαλές κλίσεις οδοστρώματος (10 έως 12 μοίρες).
- Πλάτος οδοστρώματος 5-6 μέτρα.
- Ακτίνα καμπυλότητας δρόμου μεγαλύτερη από 20 μέτρα.
- Κατασκευή έργων για την απορροή όμβριων υδάτων.

Σε κάθε θέση ανέγερσης Α/Γ διαμορφώνεται κατάλληλος επίπεδος χώρος (πλατεία) κατάλληλων διαστάσεων για την συναρμολόγηση των διαφόρων τμημάτων των Α/Γ (πύργος, γεννήτρια, υποσυστήματα, κλπ.) και την ευκολία χειρισμών των οχημάτων ανύψωσης των Α/Γ. Τυχόν ανωμαλίες του εδάφους θα πρέπει αποκατασταθούν με επιχωματώσεις κα κατάλληλη συμπίεση ώστε να επιτευχθεί μια σχετικά επίπεδη επιφάνεια.

Για την ηλεκτρολογική διασύνδεση των ανεμογεννητριών, κατασκευάζεται υπόγειο δίκτυο από το οποίο οδεύουν καλώδια μέσης τάσης, καλώδια ασθενών ρευμάτων και το δίκτυο γείωσης. Το κανάλι καλωδίων συνήθως γίνεται παράλληλα με τους εσωτερικούς δρόμους του αιολικού πάρκου αποφεύγοντας έτσι την πρόσθετη αλλαγή της επιφάνειας του εδάφους. Το πλάτος του καναλιού θα είναι περίπου 0,6 μέτρα, ενώ το βάθος της εκσκαφής θα είναι περίπου 1 μέτρο, όπως προβλέπεται και από τους ηλεκτρολογικούς κανονισμούς, για καλωδιώσεις Μέσης Τάσης. Στις εργασίες κατασκευής των καναλιών των καλωδιώσεων, συμπεριλαμβάνεται και η επιχωμάτωση αυτών με δύο στρώσεις 20 εκατοστών κατάλληλης άμμου ή και καταλλήλου λεπτοκόκκου χώματος με καλή αγωγιμότητα για την προστασία των καλωδιώσεων αλλά και την βελτίωση των γειώσεων, ήτοι:

- στρώση άμμου ύψους 20 εκατοστών επί του πυθμένα του καναλιού.
- εναπόθεση καλωδίων.
- στρώση άμμου ύψους 20 εκατοστών μετά την ολοκλήρωση των ηλεκτρολογικών εργασιών.

Μετά το πέρας των εργασιών τοποθέτησης των καλωδίων γίνεται η επιχωμάτωση και συμπύκνωση των καναλιών με προϊόντα εκσκαφής καθαρισμένα από πέτρες μέχρι να γεμίσει πλήρως το κανάλι.

Το υπόγειο κανάλι θα καταλήγει σε κάθε ανεμογεννήτρια σε φρεάτιο.

Για την ηλεκτρική σύνδεση του πάρκου γενικότερα ισχύει ότι, σε κάθε ανεμογεννήτρια υπάρχει ένας μετασχηματιστής ανύψωσης από χαμηλή τάση σε μέση δηλαδή τα 20kV για να μπορεί να γίνει μεταφορά της ισχύος.

Έπειτα όλες οι ανεμογεννήτριες συνδέονται σε έναν κεντρικό υποσταθμό για ανύψωση της τάσης σε υψηλή για μεταφορά και διανομή στο κεντρικό δίκτυο.

Ο υποσταθμός είναι μια ξεχωριστή εγκατάσταση η οποία δεν είναι απαραίτητο να είναι εντός του αιολικού πάρκου αλλά μπορεί να είναι και μερικά χιλιόμετρα εκτός αυτό όμως που θα πρέπει να υπάρχει σε αυτή την περίπτωση είναι ένας ζυγός μέσης τάσης για σύνδεση του πάρκου με τον υποσταθμό. Τα καλώδια ισχύος που θα πρέπει να υπάρχουν για ένα χερσαίο αιολικό πάρκο είναι 4 καλώδια μέσης τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος οπου 3 χρησιμοποιούνται για τις φάσεις και ένα εφεδρικό.

Οι τεχνικές λεπτομέρειες του κάθε στοιχείου εξαρτάται από τις λεπτομέρειες της ανεμογεννήτριας και κατ' επέκταση και του αιολικού πάρκου και των αποστάσεων από τους καταναλωτές.

Από θέματα ασφαλείας θα πρέπει να γίνει αφαίρεση της βλάστησης γύρω από το πάρκο για λόγους πυρασφάλειας καθώς και γύρω από τους υποσταθμούς να υπάρχει χαλίκι στην επιφάνεια του εδάφους για αποστράγγιση υδάτων.

Επίσης θα είναι καλό να υπάρχουν περιφράξεις με προστατευτικό πλέγμα έτσι ώστε να έχει πρόσβαση μόνο το εξειδικευμένο προσωπικό καθώς και ένα σύστημα ασφαλείας με κάμερες τόσο για ασφάλεια του πάρκου όσο και για πυρασφάλεια του πάρκου και αν υπάρχει και της βλάστησης γύρω από αυτό.



Εικόνα 39: Αιολικό πάρκο στην Αργολίδα. (<https://zogaris.blogspot.com/2017/12/wind-turbines-in-protected-areas-mount.html>)

Για τα αιολικά πάρκα που κατασκευάζονται σε πεδιάδες για να εκμεταλλευτούν τις μεγάλες ταχύτητες ανέμου χρησιμοποιούν πύργους μεγάλους σε ύψος, με αποτέλεσμα η γη γύρω από την ανεμογεννήτρια να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για καλλιέργειες.



Εικόνα 40: Αιολικό πάρκο σε πεδιάδα στο Roscoe, Texas.

(https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%B9%CE%BF%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CF%8C_%CF%80%CE%AC%CF%81%CE%BA%CE%BF)

3.2 ΠΑΡΑΚΤΙΟ ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ

Είναι τα πάρκα που βρίσκονται στην ξηρά εντός της ζώνης των τριών χιλιομέτρων από την ακτογραμμή ή στην θάλασσα εντός της ζώνης των δέκα χιλιομέτρων από την ακτογραμμή. Αυτές οι τοποθεσίες είναι αποδοτικές για εγκατάσταση λόγω του ανέμου που δημιουργείται από την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ θάλασσας και ξηράς.

Για αυτού του είδους τις εγκαταστάσεις χρειάζεται οι κατασκευές να έχουν μεγάλες αντοχές στην διάβρωση από το θαλασσινό νερό καλή στεγανότητα κυρίως στον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό για αποφυγή βλαβών.

Στην περίπτωση που το πάρκο είναι στην στεριά ισχύει ότι και στο χερσαίο πάρκο χωροταξικά και ηλεκτρολογικά. Όμως όταν είναι στην θάλασσα τότε θα υπάρχει διαφορά στην κατασκευή του.

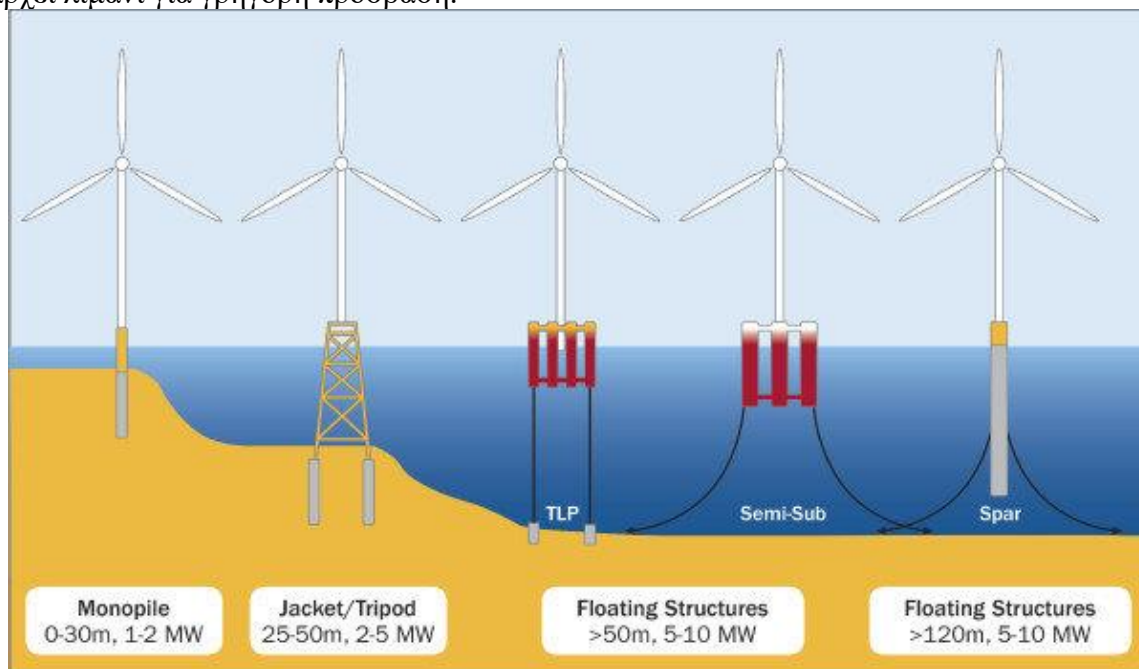
Οι διαφορές είναι αρχικά στην βάση των ανεμογεννητριών, για βάθος μέχρι 30 μετρά μπορεί να γίνει χρήση ενός απλού πυλώνα και μέχρι και τα 50 μετρά ενός τρίποδου πυλώνα με ιστό, αυτές είναι οι λύσεις με στήριξη στον πυθμένα, για μεγαλύτερα βάθη υπάρχουν πλωτές και ημιβυθισμένες βάσεις οι οποίες θα εξηγηθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

Ανάλογα της αποστάσεως από την στεριά θα εξαρτηθεί αν θα μπορεί να υπάρχει βάση για τον μετασχηματιστή ώστε να γίνει η μεταφορά της ισχύος ή απλώς ενός ζυγού για την μέση τάση ώστε να συνδεθεί με ένα καλώδιο στην στεριά στον υποσταθμό.

Για τις συνδέσεις χρησιμοποιούνται μόνο υποβρύχια καλώδια.

Τέτοια πάρκα συναντώνται σε ακτές στις οποίες δεν χρησιμοποιούνται τουριστικά και δεν είναι προστατευόμενες περιοχές.

Όταν υπάρχει εξοπλισμός μέσα στην θάλασσα θα πρέπει να υπάρχουν πλατφόρμες έτσι ώστε να μπορεί να προσαράξει με ασφάλεια το πλωτό μέσο καθώς και στην κοντινή απόσταση να υπάρχει λιμάνι για γρήγορη πρόσβαση.



Εικόνα 41: Είδη θεμελίων ανεμογεννητριών στην θάλασσα. (https://www.researchgate.net/figure/Types-of-offshore-wind-turbine-foundations-reproduced-from-ref-102-source-Principle_fig4_266086383)

3.3 ΥΠΕΡΑΚΤΙΟ ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ

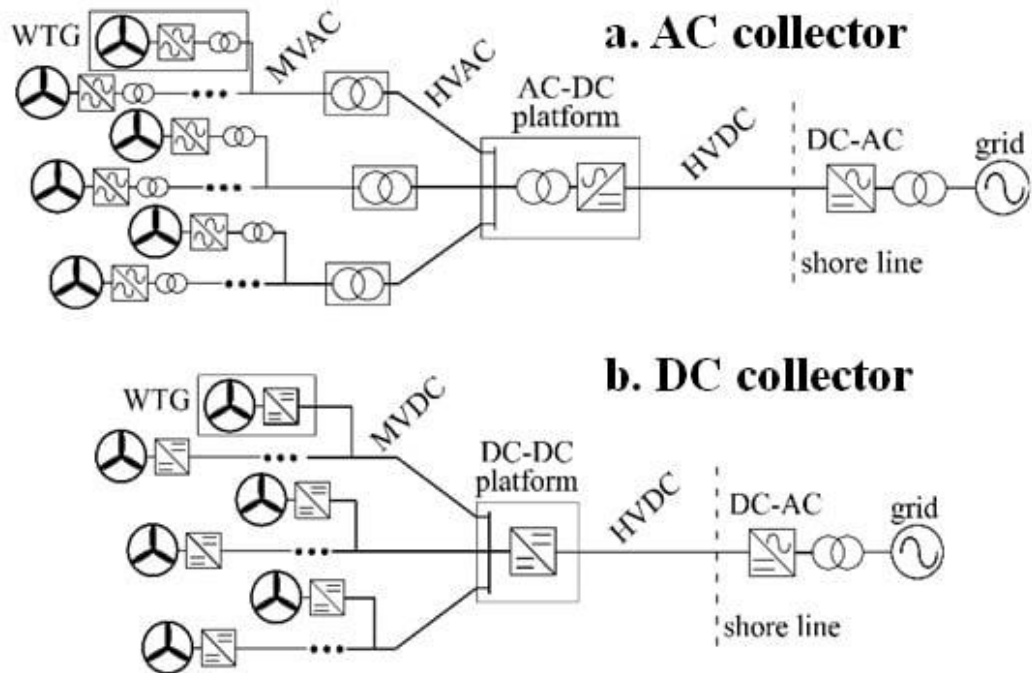
Τέτοιου είδους πάρκα συναντώνται σε θαλάσσιες περιοχές τουλάχιστον 10 χιλιόμετρα από την στεριά με αποτέλεσμα να μπορούν να εκμεταλλεύονται τους ανέμους στην θάλασσα που έχουν μεγαλύτερες ταχύτητες και είναι πιο σταθεροί σε ταχύτητα.

Τέτοια πάρκα μπορεί και να βρεθούν σε βάθη μεγαλύτερα από τα 50 μετρά οπότε η θεμελίωση τους γίνεται με πλωτές ημιβυθισμένες κατασκευές που είναι δεμένες με τον πυθμένα της θάλασσας.

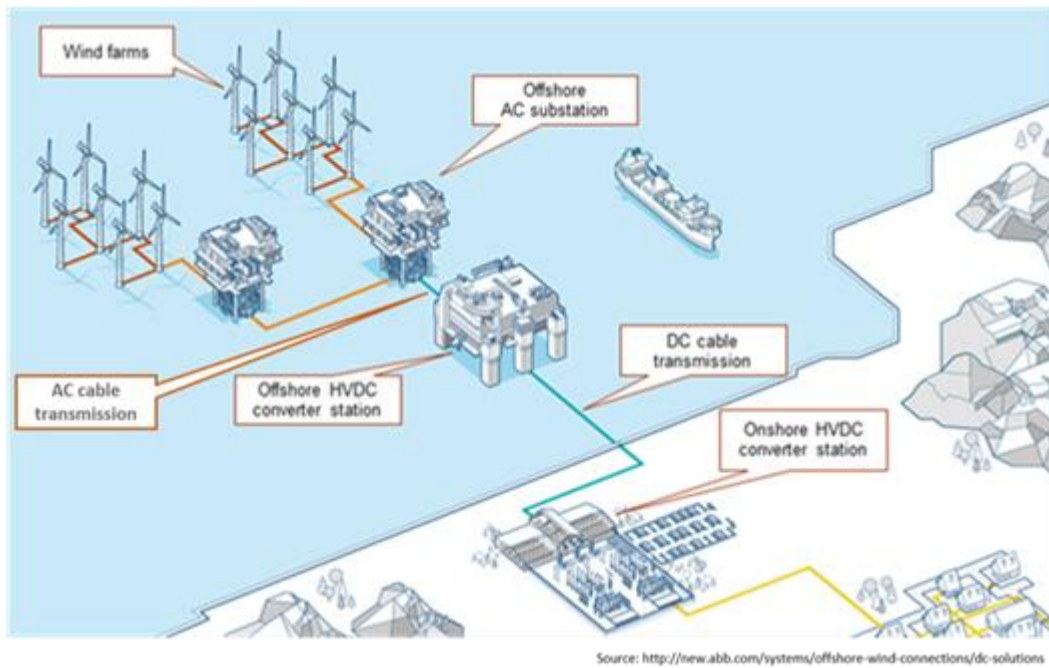
Σε αυτή την κατηγορία κατατάσσονται και τα πάρκα τα οποία βρίσκονται σε βραχονησίδες μακριά από την κοντινότερη στεριά με ηλεκτρικό δίκτυο, σε αυτή την περίπτωση το κέρδος είναι ότι το πάρκο μπορεί να εκμεταλλευτεί τους ανέμους της θάλασσα αλλά με μικρότερο κόστος κατασκευής, σε αυτή την περίπτωση ισχύει η χωροθέτηση που ισχύει και για ένα χερσαίο πάρκο με την προσθήκη μιας βάσης για να μπορεί να προσγειωθεί ελικόπτερο και ενός λιμανιού για πρόσβαση σε βαρέα μηχανήματα.

Η ιδιαιτερότητα αυτών των πάρκων είναι ότι λόγω των αποστάσεων που μπορεί να έχουν από το κυρίως δίκτυο ίσως χρειαστεί η διασύνδεση να γίνει με συνεχές ρεύμα με τη χρήση ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος. Η διαφορά με τα υπόλοιπα αιολικά είναι ότι η γίνεται ανύψωση σε συνεχή τάση το οποίο σημαίνει ότι χρειάζονται μόνο δυο καλώδια για την μεταφορά ισχύος ένα με θετικό πόλο και ένα με αρνητικό, τα οποία λόγω του ότι έχουν συνεχή τάση δεν έχουν απώλειες από επαγωγή παρά μόνο από ωμική. Όταν αυτά τα καλώδια φτάσουν στην στεριά εκεί θα πρέπει να υπάρχουν εγκαταστάσεις για την μετατροπή του DC σε AC και έπειτα να συνδεθεί στο ηλεκτρικό δίκτυο

Επίσης υπάρχουν 2 τρόποι για να επιτευχθεί DC τάση για τη μεταφορά, η μια είναι να υπάρχει ένας κεντρικός μετατροπέας από εναλλασσόμενο σε συνεχές και ο δεύτερος είναι να υπάρχει σε κάθε ανεμογεννήτρια ένας μετατροπέας από εναλλασσόμενο σε συνεχές και έπειτα να συνδέονται όλοι σε έναν κεντρικό ο οποίος θα κάνει ανύψωση από μέση σε υψηλή τάση. Με τον πρώτο τρόπο επειδή όλες οι ανεμογεννήτριες είναι συνδεδεμένες μέσω εναλλασσόμενου ρεύματος θα έχουν περισσότερες μηχανικές καταπονήσεις λόγω του ότι θα πρέπει να διατηρούν μια συχνότητα δικτύου παρόλο ενώ με τον δεύτερο τρόπο η κάθε ανεμογεννήτρια μπορεί να κινείται με διαφορετική ταχύτητα.



Εικόνα 42: Οι συνδέσεις μέσω DC δικτύου. (<https://eepower.com/technical-articles/dc-dc-power-converter-for-offshore-wind-farm-integration/>)



Εικόνα 43: Η διασύνδεση ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου. (<https://northsearegion.eu/northsee/e-energy/existing-offshore-linear-energy-infrastructure-and-grid-connections/>)

4. ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ (DFIM)

Στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει ανάλυση της μοντελοποίησης μιας ανεμογεννήτριας σε σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο. Στην μοντελοποίηση θα χρησιμοποιηθεί ανεμογεννήτρια με διπλά τροφοδοτούμενη επαγωγική γεννήτρια, για αυτό το λόγο θα πρέπει να γίνει σε αυτό το κεφάλαιο ανάλυση της λειτουργία της καθώς και των ηλεκτρονικών διατάξεων για να λειτουργήσει.

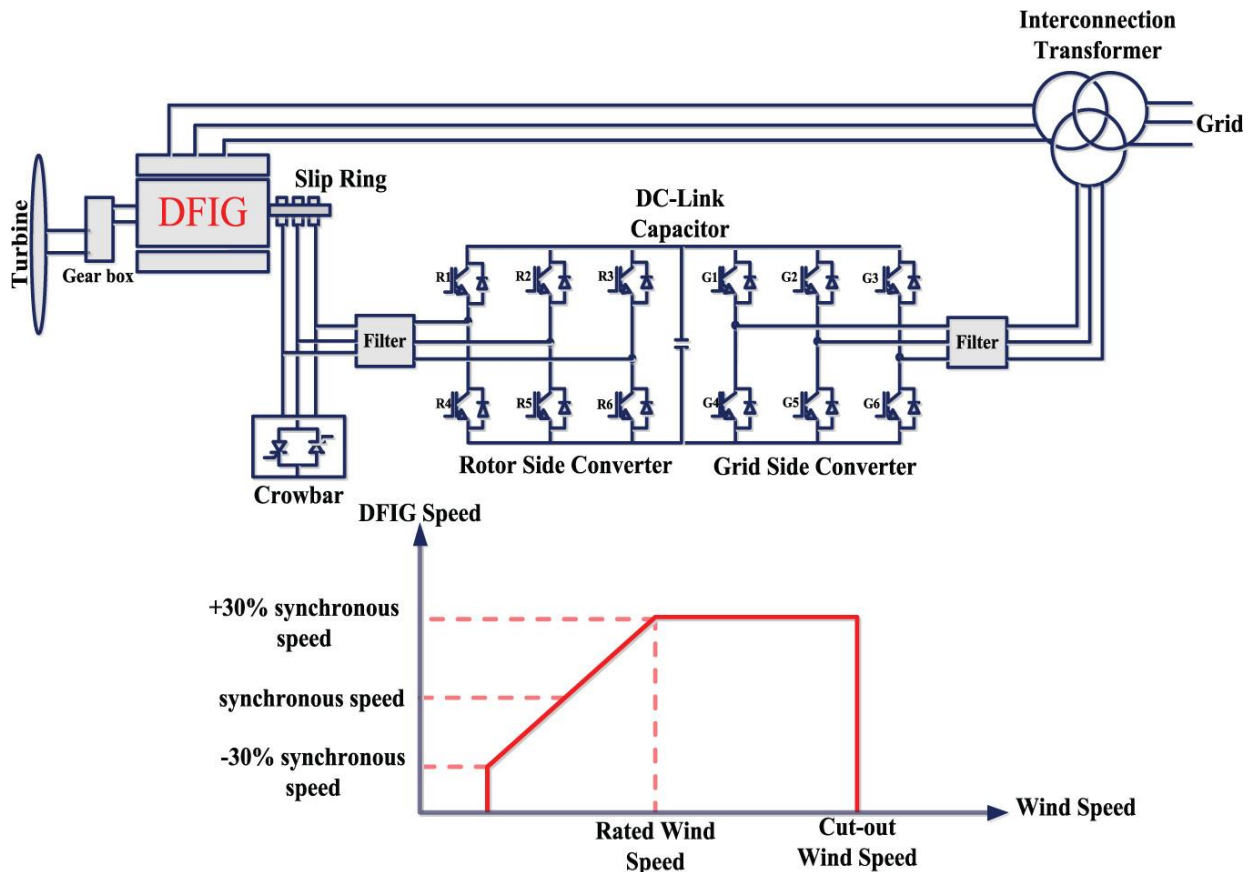
4.1 ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ (DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR – DFIG)

Το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανεμογεννήτριες με μεταβλητή ταχύτητα διπλής τροφοδοσίας (DFIG) είναι μία από τις κύριες διαμορφώσεις στη βιομηχανία ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σήμερα. Η μηχανή συνδέεται ως εξής, ο στάτορας συνδέεται απευθείας με το δίκτυο, ενώ ο δρομέας συνδέεται με το δίκτυο μέσω μειωμένης χωρητικότητας μετατροπείς ισχύος. Συνήθως χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας τάσης (VSC) με IGBT δύο επιπέδων σε διάταξη back-to-back. Επειδή τόσο ο στάτορας όσο και ο δρομέας μπορούν να τροφοδοτήσουν ενέργεια στο δίκτυο, ο γεννήτρια αποκαλείται διπλής τροφοδοσίας. Η τυπική τάση του στάτορα για το εμπορικό σύστημα DFIG είναι 690 V και η ισχύς κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες κιλοβάτ ως αρκετά μεγαβάτ.

Ο μετατροπέας στην πλευρά του δρομέα (RSC) ελέγχει τη ενεργό/άεργο ισχύ της γεννήτριας, ενώ ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου (GSC) ελέγχει την τάση του DC-link και την άεργο ισχύ του AC. Επειδή το σύστημα έχει τη δυνατότητα να ελέγχει την άεργο ισχύ, δεν απαιτείται εξωτερική τροφοδοσία άεργου ισχύος.

Το εύρος ταχυτήτων του συστήματος ανεμογεννήτριας DFIG κυμαίνεται περίπου στο $\pm 30\%$, που είναι 30% πάνω και 30% κάτω από τη συγχρονική ταχύτητα. Το εύρος αυτό της ταχύτητας του 60% μπορεί συνήθως να καλύψει όλες τις συνθήκες του ανέμου και, συνεπώς, είναι αρκετό για τη μεταβλητή λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Ο μέγιστη ολίσθηση καθορίζει τη μέγιστη ισχύ που επεξεργάζεται το κύκλωμα του δρομέα, που είναι στο περίπου 30% της ονομαστικής ισχύος. Επομένως, η ροή ισχύος στο κύκλωμα του δρομέα είναι αμφίδρομη από και προς το δίκτυο. Αυτό απαιτεί ένα σύστημα μετατροπέα τεσσάρων τεταρτημόριων. Ωστόσο, το σύστημα μετατροπέα πρέπει να επεξεργάζεται μόνο περίπου το 30% της ονομαστικής ισχύος.

Η χρήση μειωμένης χωρητικότητας μετατροπέων οδηγεί σε μείωση του κόστους, του βάρους και του φυσικού μεγέθους. Σε σύγκριση με τα συστήματα με σταθερή ταχύτητα, η αποτελεσματικότητα μετατροπής ενέργειας της ανεμογεννήτριας DFIG βελτιώνεται σημαντικά.

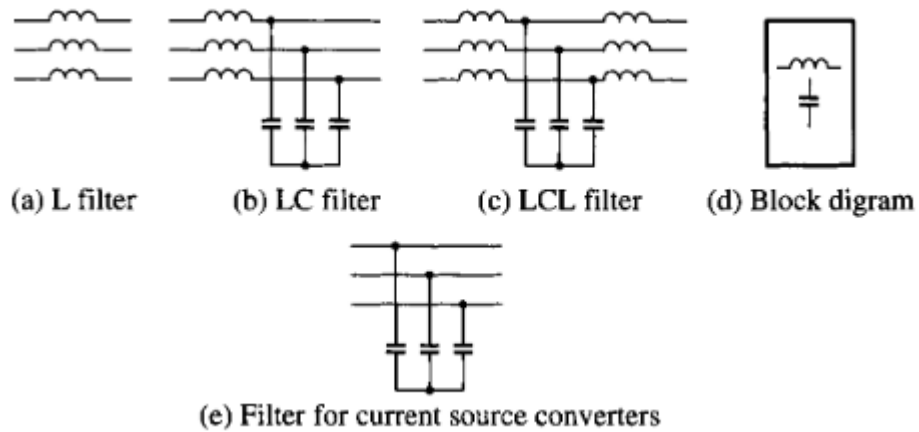


Εικόνα 44: Συνδεσμολογία της μηχανής και διάγραμμα ταχύτητας γεννήτριας και ταχύτητας ανέμου. (<https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0309524X19877525>)

Οι μετατροπείς ισχύος συνήθως παράγουν διακοπτικές αρμονικές. Για να λυθούν τα προβλήματα που προκαλούν οι αρμονικές, σε πρακτικά συστήματα μετατροπής ενέργειας σε ανεμογεννήτριες, χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι αρμονικών φίλτρων. Τα φίλτρα L, LC και LCL χρησιμοποιούνται συνήθως στους μετατροπείς τάσεως. Το φίλτρο με πυκνωτές (C) είναι κατάλληλο για μετατροπείς ρεύματος πηγής (CSC).

Το φίλτρο L συνηθίζεται στους μετατροπείς από την πλευρά της γεννήτριας για να μειώσει την αρμονική παραμόρφωση στο ρεύμα και την τάση της γεννήτριας, με αποτέλεσμα τη μείωση των αρμονικών απωλειών στο μαγνητικό πυρήνα και την αντίσταση.

Τα φίλτρα LC μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να επιτύχουν καλύτερα αποτελέσματα. Το φίλτρο LCL χρησιμοποιείται συχνά στους μετατροπείς από την πλευρά του δικτύου για να πληροί τις αυστηρές απαιτήσεις αρμονικών που καθορίζονται από διάφορους κανονισμούς δικτύου. Τα φίλτρα LC βρίσκονται επίσης σε αιολικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά δεν είναι τόσο αποτελεσματικά όσο τα φίλτρα LCL. Ένα πρόσθετο όφελος της χρήσης αυτών των φίλτρων είναι ότι μπορούν αποτελεσματικά να αντιμετωπίσουν τα προβλήματα υψηλών ταχυτήτων αλλαγής της τάσης (dv/dt) που προκαλούνται από τη γρήγορη διακοπτική συχνότητα των ημιαγωγικών διακοπών. Ωστόσο, τα φίλτρα LC και LCL μπορεί να προκαλέσουν ανακλάσεις LC. Οι παράμετροι των φίλτρων και οι ταλαντώσεις συντονισμού πρέπει να σχεδιαστούν προσεκτικά για να αποφευχθούν πιθανές ταλαντώσεις LC.

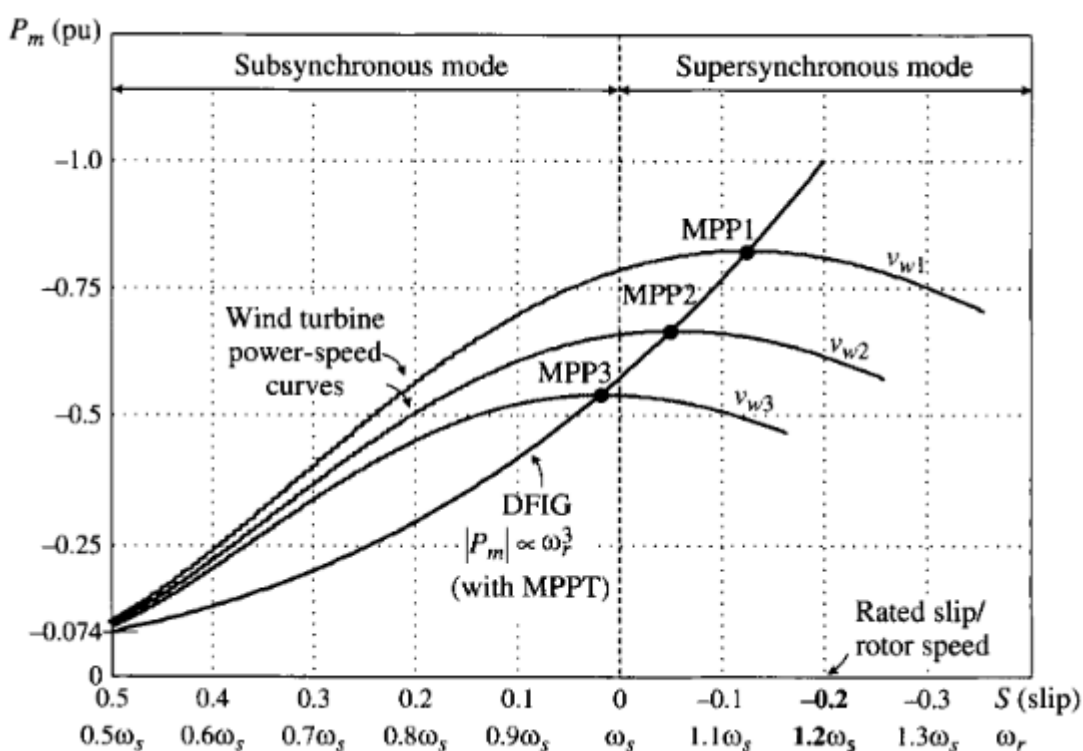


Εικόνα 45: Τα είδη των φίλτρων. (Βιβλίο 3Βιβλίο 3Βιβλίο 3Βιβλίο 3Βιβλίο 3Βιβλίο 3Βιβλίο 3Βιβλίο 3Βιβλίο 3)

Το τελευταίο φίλτρο που φαίνεται στην παραπάνω εικόνα είναι ένα φίλτρο (C) το οποίο χρησιμοποιείται για μετατροπείς ρεύματος. Εκτός από τη λειτουργία του φίλτρου, ο πυκνωτής απαιτείται από τους μετατροπείς ρεύματος για να μπορούν να λειτουργήσουν οι ημιαγωγικοί διακόπτες ρεύματος. Επομένως, αυτός ο πυκνωτής φίλτρου είναι αναγκαίος στους μετατροπείς ρεύματος και δεν μπορεί να παραλειφθεί.

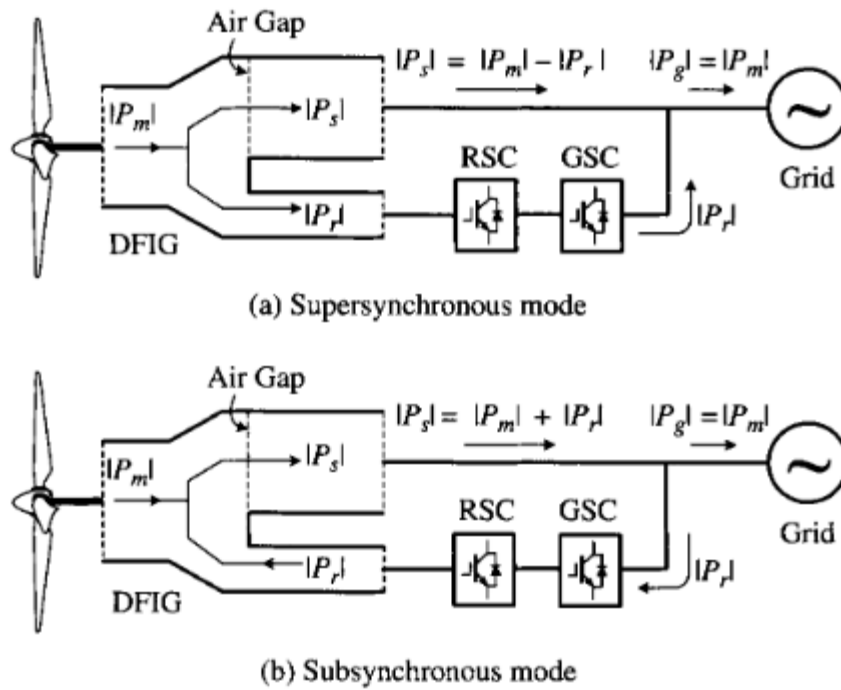
4.2 Η ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΣΕ ΥΠΕΡΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΚΑΙ ΣΕ ΥΠΟΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΣΤΡΟΦΕΣ

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η μηχανή μπορεί να περιστραφεί σε υπερσύγχρονες και υποσύγχρονες ταχύτητες, όπου στη μια η γεννήτρια λειτουργεί πάνω από τις ονομαστικές στροφές με αρνητική ολίσθηση και στην άλλη λειτουργεί κάτω από αυτές με θετική ολίσθηση αντίστοιχα. Καθώς η ταχύτητα του δρομέα της DFIG είναι προσαρμόσιμη, μπορεί να υλοποιηθεί ένα σύστημα παρακολούθησης της μέγιστης ισχύος (MPPT) για να αξιοποιηθεί η μέγιστη διαθέσιμη ισχύ από την ανεμογεννήτρια. Κατά τη λειτουργία στο σημείο μέγιστης ισχύος (MPP) στις καμπύλες ισχύος-ταχύτητας της ανεμογεννήτριας, η μηχανική ισχύ της γεννήτριας από τον άξονα Pm είναι ανάλογη με τον κύβο της ταχύτητας του δρομέα ω_r .



Εικόνα 46: Παράδειγμα με χαρακτηριστικές ισχύος - ταχύτητας σε μια γεννήτρια DFIG. (Βιβλίο 3)

Η ταχύτητα του δρομέα της γεννήτριας στην παραπάνω εικόνα κυμαίνεται στο εύρος από 0,5 μέχρι 1,2, που αντιστοιχεί περίπου στο 58% του πλήρους εύρους ταχυτήτων (από μηδέν έως 1,2). Αυτό το εύρος ταχυτήτων είναι συνήθως αρκετό για ένα σύστημα ανεμογεννητριών, καθώς η ισχύς που παράγεται στο 42% της ονομαστικής της ταχύτητας αντιστοιχεί στο 0,074 pu ($0,42^3$), μόνο 7,4% της ονομαστικής ισχύος. Η ονομαστική ολίσθηση στην οποία παράγεται η ονομαστική ισχύς (1 pu) σε αυτό το παράδειγμα είναι -0,2, που αντιπροσωπεύει το ονομαστικό σημείο λειτουργίας του συστήματος σταθερής κατάστασης. Δυναμικά, η DFIG μπορεί να λειτουργήσει έως και σε ολίσθημα -0,3 pu (30% πάνω από τη συγχρονική ταχύτητα ω_s). Ως αποτέλεσμα, οι μετατροπείς ισχύος στο κύκλωμα του δρομέα πρέπει να σχεδιαστούν για να αντιμετωπίσουν περίπου το 30% της ονομαστικής ισχύος του στάτη.



Εικόνα 47: Ροή της ισχύος σε μια DFIG σε υπερσύγχρονες και υποσύγχρονες στροφές. (Βιβλίο 3)

Η ολίσθηση στην μηχανή υπολογίζεται από τον τύπο :

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s}$$

Οπού n_r : είναι η ταχύτητα του δρομέα σε rpm

N_s : είναι η σύγχρονη ταχύτητα η οποία υπολογίζεται βάση των πόλων της μηχανής από τον τύπο

$$n_s = 160f/p$$

Με f τη συχνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος στον στάτη, και p ο αριθμός των ζευγών των πόλων της μηχανής.

Και τέλος το για το n_r είναι για υποσύγχρονες στροφές :

$$n_r = (1 - s)n_s = \left(1 - \frac{f_r}{f}\right)n_s$$

Και για υπερσύγχρονες :

$$n_r = (1 + s)n_s = \left(1 + \frac{f_r}{f}\right)n_s$$

Αντίστοιχα η μηχανική ισχύς P_{mech} για υποσύγχρονες στροφές :

$$P_{mech} = (1 - s)P_{gap} = \left(1 - \frac{f_r}{f}\right)P_{gap}$$

Και για υπερσύγχρονες :

$$P_{mech} = (1 - s)P_{gap} = \left(1 + \frac{f_r}{f}\right)P_{gap}$$

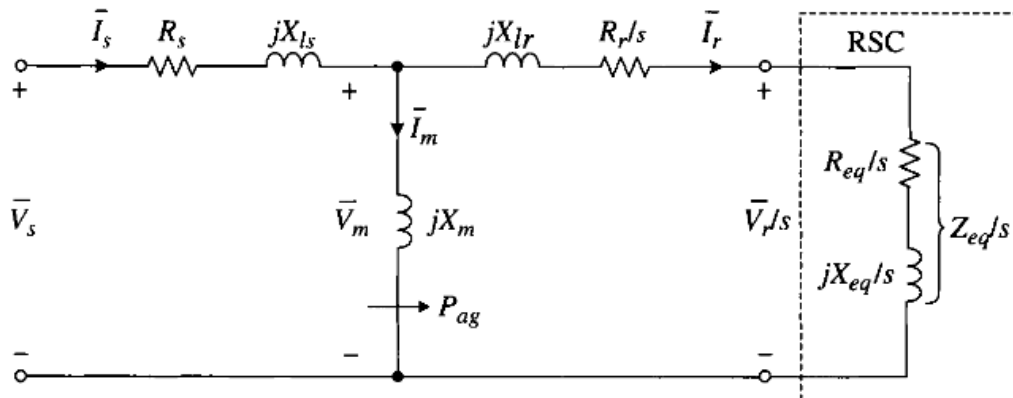
Με P_{gap} να είναι η ισχύς που μεταφέρεται μέσω του κενού αέρα και f_r είναι η συχνότητα του ρεύματος στον δρομέα.

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή T_{em} δίνεται από :

$$T_{em} = P_{gap}/\omega_{syn}$$

Οπού ω_{syn} είναι οι σύγχρονη ταχύτητα σε rad/s και υπολογίζεται από τον τύπο :

$$\omega_{syn} = 2\pi f$$



Εικόνα 48: το ισοδύναμο κύκλωμα της μηχανής μαζί με τον μετατροπέα από την πλευρά του δρομέα (RSC). (Βιβλίο 3)

Η ισοδύναμη εμπέδηση του μετατροπέα υπολογίζεται από τον τύπο :

$$\bar{Z}_{eq} = R_{eq} + jX_{eq} = R_{eq} + j\omega_{sl}L_{eq}$$

Οπού L_{eq} είναι η ισοδύναμη επαγωγή και ω_{sl} είναι η γωνιακή συχνότητα ολίσθησης.

Υποθέτοντας ότι ο συντελεστής ισχύος είναι 1, τότε η ισχύς διάκενου υπολογίζεται από :

$$P_{ag} = 3(V_s - I_s R_s)I_s$$

Και από :

$$P_{ag} = \frac{\omega_s T_m}{P}$$

Οπού T_m είναι η μηχανική ροπή, P είναι τα ζεύγη πόλων της μηχανής και ω_s είναι η γωνιακή συχνότητα του στάτη.

Η τάση στον μαγνητικό βρόγχο είναι :

$$\bar{V}_m = \bar{V}_s - \bar{I}_s(R_s + j\omega_s L_{ls})$$

Με τις τιμές της τάσης και ρεύματος στον στάτη να δίνονται από :

$$\bar{V}_s = V_s \angle 0^\circ$$

$$\bar{I}_s = I_s \angle 180^\circ$$

Το ρεύμα μαγνήτισης μπορεί να βρεθεί από :

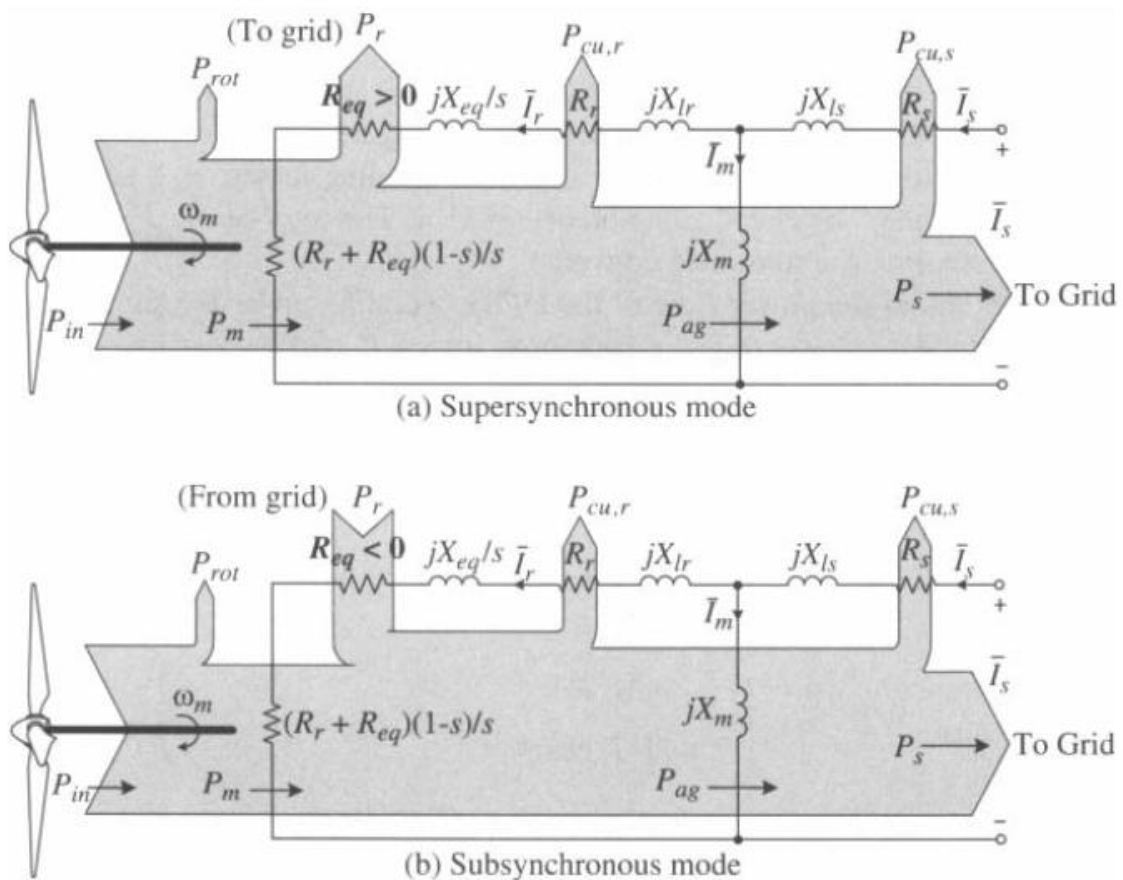
$$\bar{I}_m = \frac{\bar{V}_m}{j\omega_s L_m}$$

Το ρεύμα στον δρομέα υπολογίζεται από :

$$\bar{I}_r = \bar{I}_s - \bar{I}_m$$

Η τάση στον δρομέα :

$$\frac{\bar{V}_r}{S} = \bar{V}_m - \bar{I}_r \left(\frac{R_r}{S} + j\omega_s L_{lr} \right)$$



Εικόνα 49: Ροή της ισχύος σε υπερσύγχρονες και υποσύγχρονες στροφές. (Βιβλίο 3)

Οι τύποι για τους υπολογισμούς των ισχύων είναι :

$$\text{Μηχανική ισχύς : } P_m = 3I_r^2(R_r + R_{eq})(1 - s)/s$$

$$\text{Ισχύς δρομέα : } P_r = 3I_r^2R_{eq}$$

$$\text{Απώλειες χαλκού δρομέα : } P_{cu,r} = 3I_r^2R_r$$

$$\text{Απώλειες χαλκού στάτη : } P_{cu,s} = 3I_s^2R_s$$

$$\text{Ισχύς στάτη : } P_s = 3V_s I_s \cos\phi_s$$

Η ισχύς που δίνεται από την γεννήτρια υπολογίζεται ανάλογα με την κατάσταση.

$$|P_g| = \begin{cases} |P_s| + |P_r|, & \text{για υπερσύγχρονη κατάσταση} \\ |P_s| - |P_r|, & \text{για υποσύγχρονη κατάσταση} \end{cases}$$

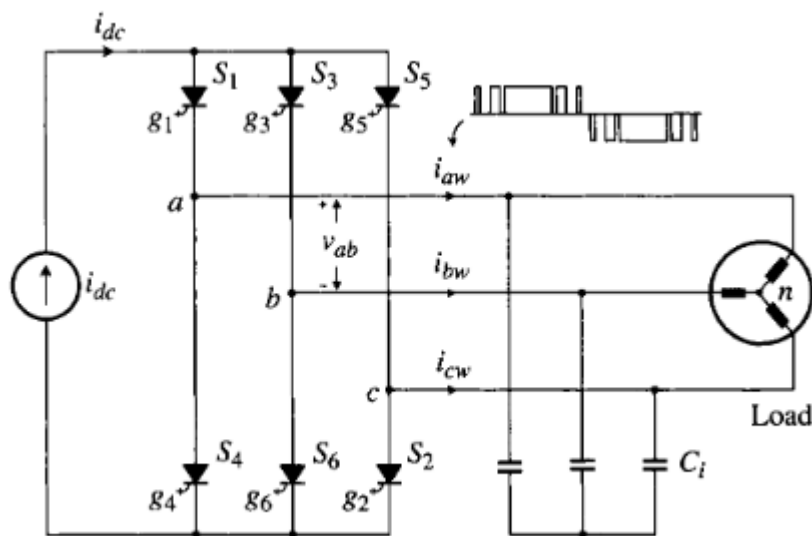
4.3 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ DC-AC

Οι μετατροπείς πηγής ρεύματος παράγουν ένα τριφασικό ηλεκτρικό ρεύμα διαμορφωμένο με τεχνική παλμοδότησης PWM (Pulse Width Modulation).

Η απλή τοπολογία του μετατροπέα, οι σχεδόν ημιτονοειδείς κυματομορφές εξόδου και η αξιόπιστη προστασία από βραχυκυκλώματα, καθιστούν ιδανικό για συστήματα μεγάλης ισχύος όπως ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας της τάξης του MW.

Ένας απλός μετατροπέας αποτελείται από έξι διακοπτικά στοιχεία, χρειάζεται ένα συνεχές ρεύμα στην είσοδο του και στην έξοδο παράγει ένα ρεύμα διαμορφωμένο με PWM διαμόρφωση.

Συνήθως ο μετατροπέας χρειάζεται στην έξοδο του πυκνωτές στις 3 φάσεις όπου βοηθάει στην εναλλαγή των διακοπτικών στοιχείων και λειτουργεί επίσης ως φίλτρο για αρμονικές παραμορφώσεις. Για παράδειγμα στο παρακάτω σχήμα εάν κατά τη σβέση του διακόπτη S_1 πέσει απότομα το ρεύμα i_{aw} τότε θα υπάρξει μεγάλη απότομη αύξηση της τάσης και πιθανώς να προκαλέσει ζημιά στον μετατροπέα, ενώ με του πυκνωτές θα μπορεί να περάσει το ρεύμα μέσω αυτών.



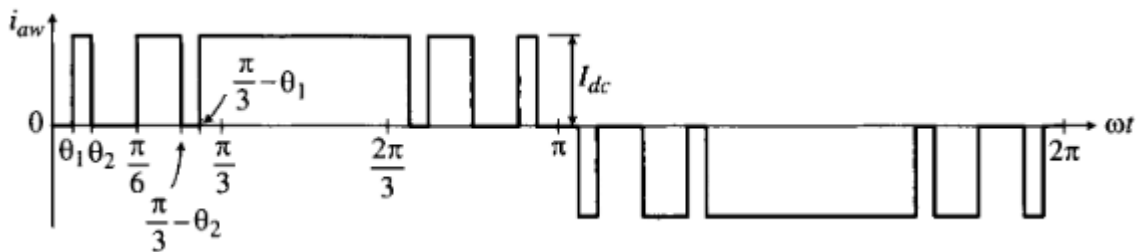
Εικόνα 50: Σχηματικό του μετατροπέα πηγής ρεύματος. (Βιβλίο 3)

4.3.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΑΛΜΟΔΟΤΗΣΗΣ ΕΠΙΛΕΚΤΙΚΗ ΑΠΑΛΕΙΦΗ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ

Αυτή η μέθοδος πρέπει να πληροί τις εξής προϋποθέσεις, το συνεχές ρεύμα στην είσοδο του μετατροπέα θα πρέπει να είναι συνεχές και το PWM ρεύμα της φάσης A θα πρέπει να είναι καθορισμένο. Αυτές οι προϋποθέσεις απαιτούν κατά την κανονική λειτουργία να άγουν μόνο δύο διακοπτικά στοιχεία ένα στην άνω τριάδα και ένα στην κάτω.

Η μέθοδος αυτή μπορεί να εξαλείψει μη επιθυμητές αρμονικές χαμηλής τάξης στα ρεύματα εξόδου των τριών φάσεων.

Οι γωνίες έναυσης των διακοπών προκαθορίζονται και καταχωρούνται στον ψηφιακό ελεγκτή που ελέγχει τους διακόπτες, όμως οι γωνίες έναυσης που θα καταχωρηθούν θα είναι μόνο για τους διακόπτες S1 και S2 για την πρώτη φάση έπειτα όλες οι υπόλοιπες γωνίες έναυσης για τους διακόπτες S1 και S2 υπολογίζονται από τον ελεγκτή.



Εικόνα 51: Παλμοδότηση μιας φάσης. (Βιβλίο 3)

Όπως φαίνεται στην παραπάνω κυματομορφή πέρα από τις γωνίες έναυσης θ_1 και θ_2 όλες οι υπόλοιπες υπολογίζονται μέσω αυτών.

Ο αριθμός των αρμονικών που εξαλείφονται προκύπτει από τον τύπο

$$k = (N_p - 1)/2$$

Οπού N_p είναι ο αριθμός των παλμών σε μια ημιπερίοδο δηλαδή στο παραπάνω διάγραμμα στην θετική ημιπερίοδο λαμβάνουν χώρα 5 παλμοί.

Για τον υπολογισμό των γωνιών έναυσης γίνεται ανάλυση Fourier οπού μέσω αυτής της ανάλυσης να προκύψουν οι αντίστοιχες μη γραμμικές εξισώσεις οι οποίες έπειτα θα λυθούν με χρήση υπολογιστικών μεθόδων.

4.3.2 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΟΣ ΧΩΡΟΥ

Κατά την λειτουργία του μετατροπέα υπάρχουν οι μηδενικές καταστάσεις και οι ενεργές καταστάσεις. Αυτές προκύπτουν από συνδυασμούς σκανδαλισμού των διακοπών.

Type	Switching state	On-state switch	Inverter PWM current			Space vector
			i_{aw}	i_{bw}	i_{cw}	
Zero states	(1,4)	S_1, S_4	0	0	0	\vec{T}_0
	(3,6)	S_3, S_6				
	(5,2)	S_5, S_2				
Active states	(6,1)	S_6, S_1	I_{dc}	$-I_{dc}$	0	\vec{T}_1
	(1,2)	S_1, S_2	I_{dc}	0	$-I_{dc}$	\vec{T}_2
	(2,3)	S_2, S_3	0	I_{dc}	$-I_{dc}$	\vec{T}_3
	(3,4)	S_3, S_4	$-I_{dc}$	I_{dc}	0	\vec{T}_4
	(4,5)	S_4, S_5	$-I_{dc}$	0	I_{dc}	\vec{T}_5
	(5,6)	S_5, S_6	0	$-I_{dc}$	I_{dc}	\vec{T}_6

Εικόνα 52: Καταστάσεις των διακοπών και τα διανύσματα τους. (Βιβλίο 3)

Οι μηδενικές καταστάσεις είναι καταστάσεις οι οποίες δεν τροφοδοτούν με ρεύμα το φορτίο επειδή ο συνδυασμός των διακοπών είναι βραχυκυκλωμένος όπως φαίνεται και στην εικόνα 50, αυτές οι καταστάσεις ονομάζονται και καταστάσεις παράκαμψης διότι χρησιμοποιούνται έτσι ώστε να μην υπάρχει διακοπή του συνεχούς ρεύματος στην είσοδο του μετατροπέα.

Ο παραπάνω πίνακας ισχύει για ένα μετατροπέα από AC σε DC, έτσι για ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα ισχύει ο τύπος :

$$i_{aw}(t) + i_{bw}(t) + i_{cw}(t) = 0$$

Το στιγμιαίο ρεύμα μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο :

$$\vec{i}(t) = \frac{2}{3} [i_{aw}(t)e^{j0} + i_{bw}(t)e^{j2\pi/3} + i_{cw}(t)e^{j4\pi/3}]$$

Για την ενεργή κατάσταση (6,1) ισχύει ότι

$$i_{aw}(t) = I_{dc}$$

$$i_{bw}(t) = -I_{dc}$$

$$i_{cw}(t) = 0$$

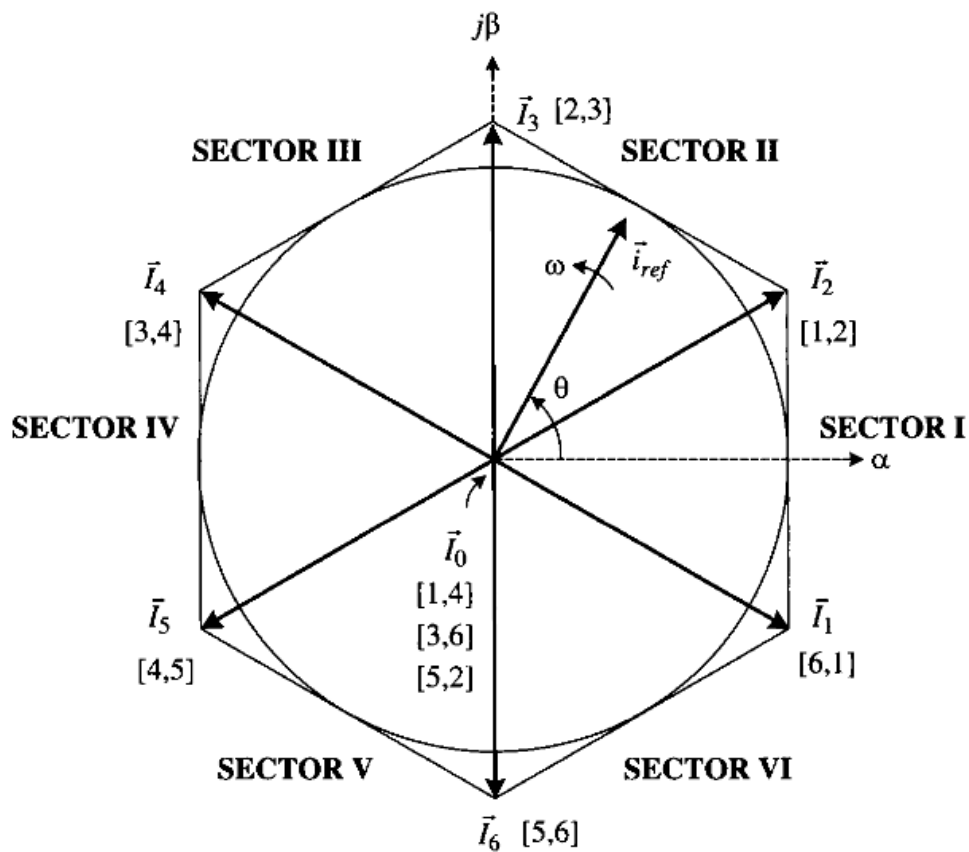
Τα ρεύματα στις φάσεις μπορούν να εκφραστούν ως :

$$\vec{I}_k = \frac{2}{\sqrt{3}} I_{dc} e^{j((k-1)\frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{6})}$$

Οπού k είναι το εκάστοτε διάνυσμα.

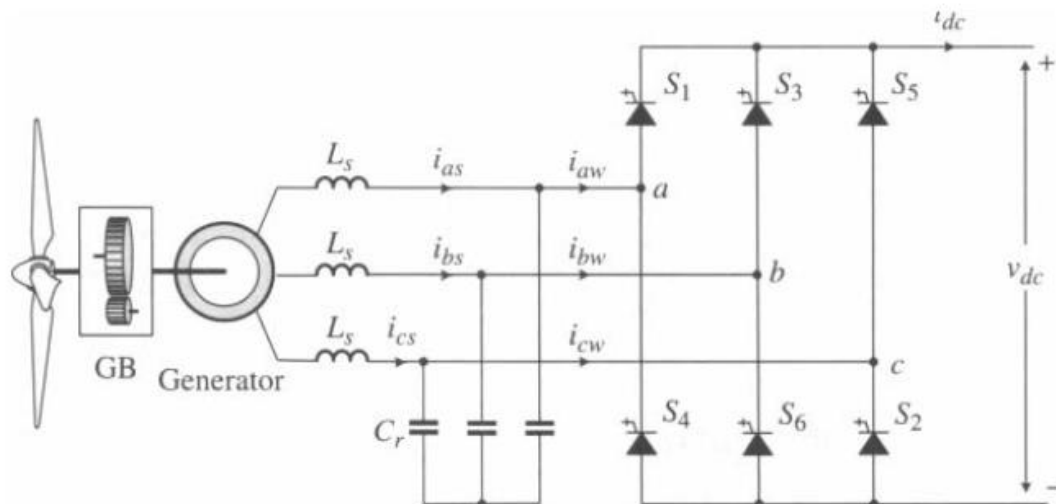
Η γωνιακή μετατόπιση του \vec{i}_{ref} σε σχέση με την αρχή των αξόνων στο α υπολογίζεται από τον τύπο :

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(t) dt + \theta_0$$



Εικόνα 53: Διάγραμμα χώρου διανυσμάτων. (Βιβλίο 3)

4.4 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ AC-DC



Εικόνα 54: Μετατροπέας AC-DC. (Βιβλίο 3)

Όπως και στους μετατροπέες ρεύματος DC-AC θα πρέπει να υπάρχουν φίλτρα με πυκνωτές ώστε να γίνεται ομαλά η εναλλαγή των διακοπτικών στοιχείων και να φιλτράρει αρμονικές ρεύματος.

Η έξοδος συνεχούς ρεύματος μπορεί να ρυθμιστεί, ρυθμίζοντας την γωνία έναυσης των διακοπτικών στοιχείων η οποία εξηγήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και με τη χρήση μεταβλητής διαμόρφωσης m_a .

Η ισχύς στην είσοδο του μετατροπέα υπολογίζεται από :

$$P_{ac} = \sqrt{3}V_{\text{πολική}}I_{rms} \cos \varphi$$

Η ισχύς στην έξοδο είναι συνεχές ισχύς και υπολογίζεται από :

$$P_{dc} = V_{dc}I_{dc}$$

Και για τη μεταβλητή διαμόρφωσης m_a :

$$m_a = \sqrt{2}I_{rms}/I_{dc}$$

4.5 ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ

Ένας μετατροπέας συνδεδεμένος στο δίκτυο μπορεί να γίνει έλεγχος με πολλές μεθόδους που εξηγήθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο όπως η διαμόρφωση διανύσματος χώρου.

Η συνεχής τάση μπορεί να υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο :

$$V_{dc} = \frac{\sqrt{6}V_{\phi}}{m_a}$$

Οπού το m_a είναι η μεταβλητή διαμόρφωσης και V_{ϕ} είναι η φασική τάση.

Υποθέτοντας ότι η V_{ϕ} είναι ίση με αυτή του δικτύου που μπορεί να θεωρηθεί σταθερή τότε η συνεχής τάση μπορεί να αυξηθεί σε μεγάλη τάση με μικρό m_a .

Η ροή ισχύος στον μετατροπέα είναι αμφίδρομη, σε εφαρμογές ανεμογεννήτριας η ισχύς μεταφέρεται συνήθως από τον μετατροπέα προς το δίκτυο.

Η ενεργός ισχύς που μεταφέρεται προς στο δίκτυο από την ανεμογεννήτρια υπολογίζεται από :

$$P_g = 3V_g I_g \cos \varphi$$

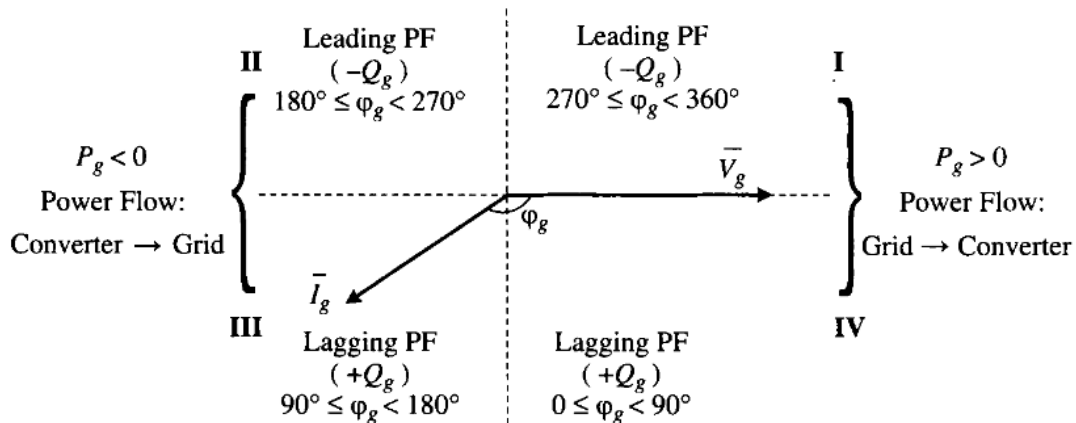
Με τη γωνία φ να εκφράζει την γωνία του συντελεστή ισχύος υπολογισμένο από :

$$\varphi_g = \angle \bar{V}_g - \angle \bar{I}_g$$

Ο συντελεστής ισχύος μπορεί να είναι μονάδα, χωρητικός ή επαγωγικός.

Συχνά χρειάζεται η άεργος ισχύς να παρέχεται ελεγχόμενη προς το δίκτυο από τον ελεγκτή της ανεμογεννήτριας μαζί με την ενεργό ισχύ.

Αυτό σημαίνει ότι η ανεμογεννήτρια θα πρέπει να λειτουργεί με γωνία συντελεστή ισχύος στις 90° με 180° έτσι ώστε να γίνεται παραγωγή άεργου ισχύος.

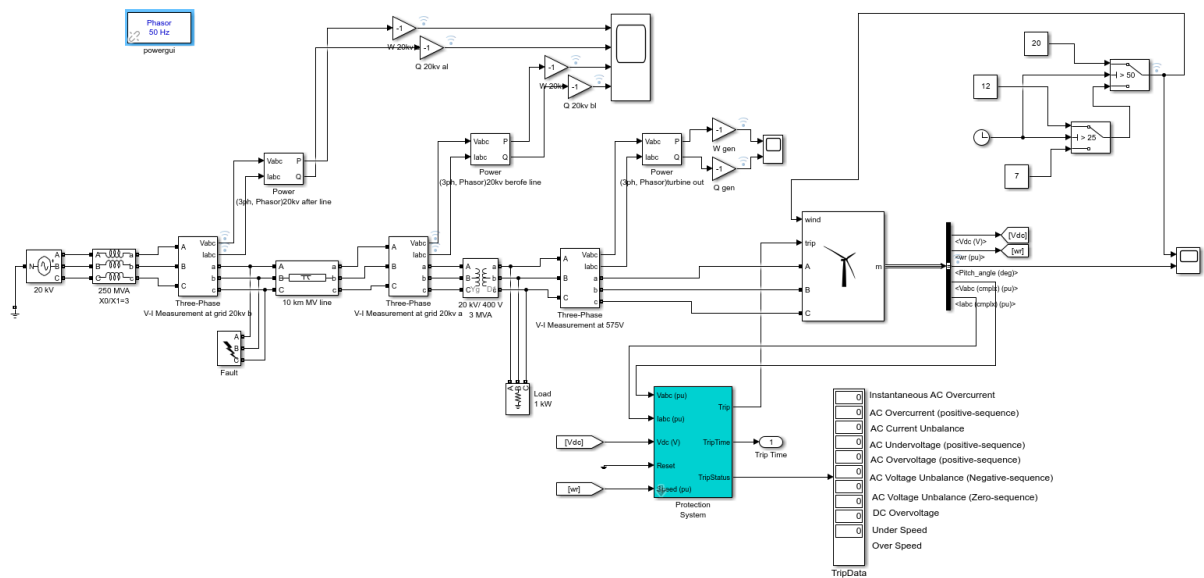


Εικόνα 55: Γωνία συντελεστή ισχύος χωρισμένη σε τεταρτημόρια. (Βιβλίο 3)

5. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του SIMULINK, μιας προέκτασης του λογισμικού MATLAB που ρόλος της είναι η μοντελοποίηση, η εξομοίωση και η ανάλυση δυναμικών συστημάτων. Η μοντελοποίηση γίνεται μέσα από ένα γραφικό περιβάλλον διεπαφής (GUI) σε αντίθεση με την πληκτρολόγηση στο παράθυρο εντολών του MATLAB. Υποστηρίζει γραμμικά και μη γραμμικά συστήματα που διαμορφώνονται στο συνεχή χρόνο, το δειγματικό διακριτό χρόνο ή ένα συνδυασμό συνεχής και δειγματικού.

Το σύστημα που κατασκευάστηκε για την προσομοίωση παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.

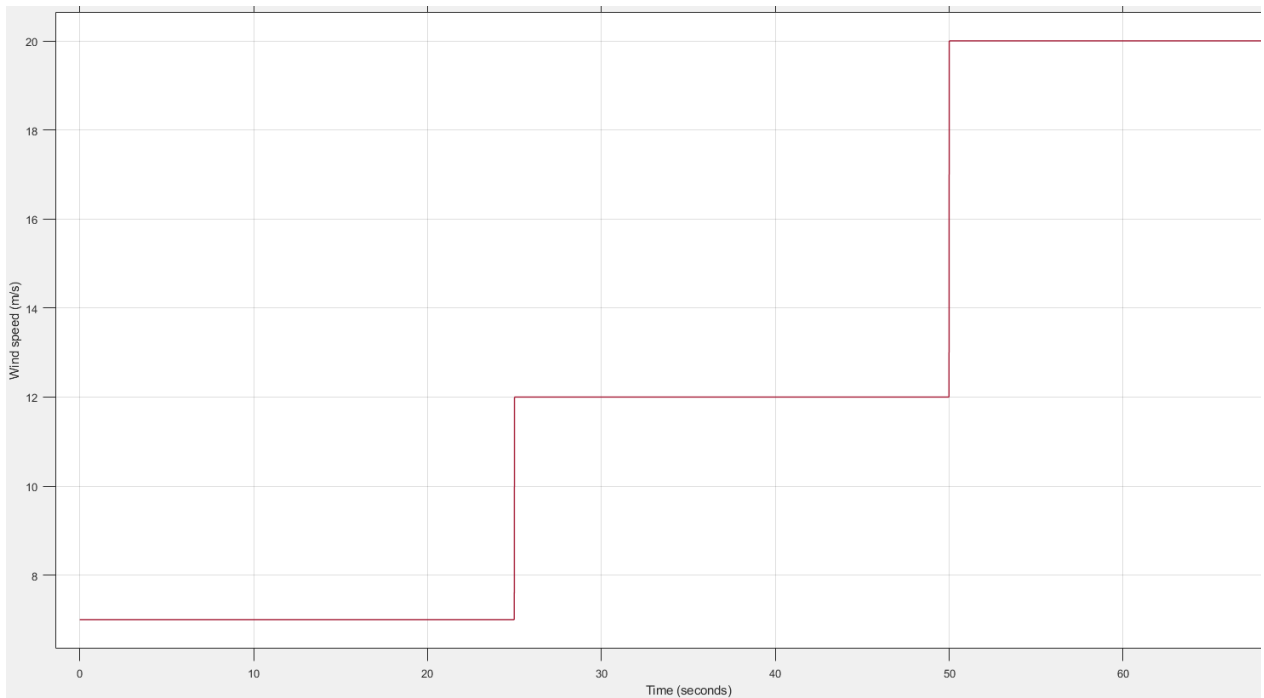


Εικόνα 56: Το κύκλωμα εξομοίωσης.

Το παραπάνω σύστημα εξομοιώνει μια ανεμογεννήτρια με γεννήτρια διπλής τροφοδότησης (DFIG). Η ανεμογεννήτρια έχει ισχύ εξόδου 2MW, έπειτα γίνεται ανύψωση της τάσης σε μέση τάση στα 20kV και συνδέεται σε γραμμή μεταφοράς 10 χιλιομέτρων με σύνδεση σε ηλεκτρικό δίκτυο.

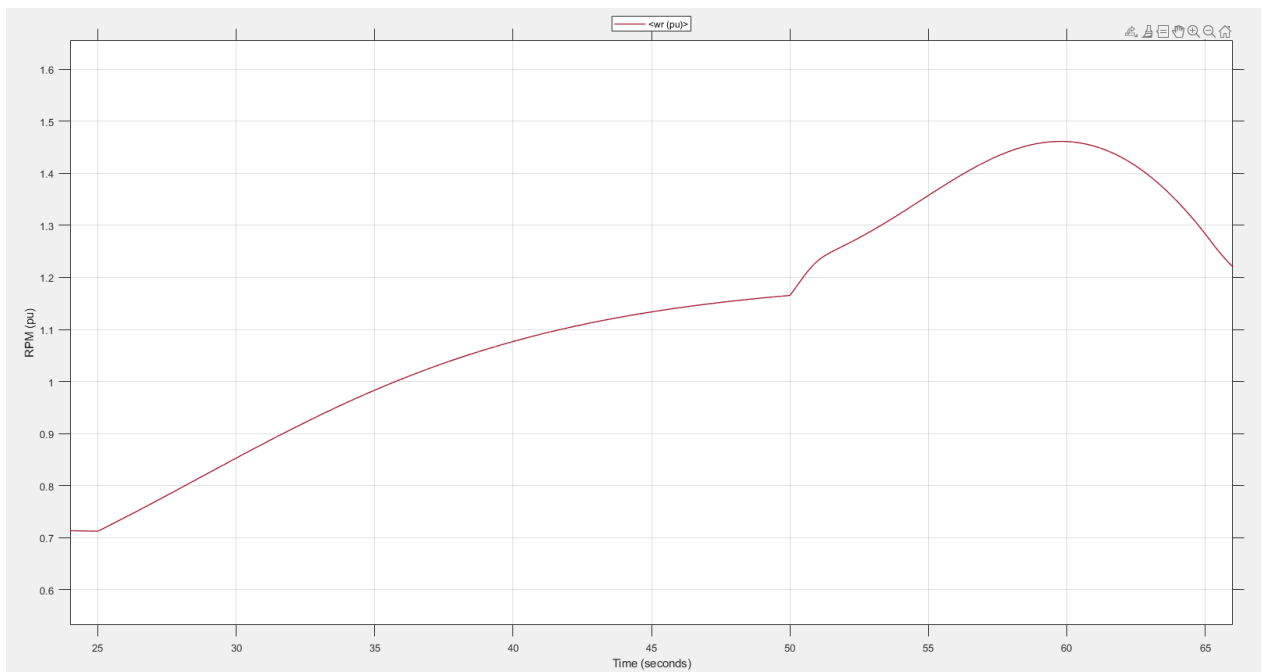
Υπάρχουν μπλοκ μέτρησης για την τάση, ρεύμα και ισχύς στην έξοδο της ανεμογεννήτριας, στην είσοδο της γραμμής μεταφοράς και στην έξοδο γραμμής μεταφοράς.

Οι μεταβολές στον άνεμο γίνονται με τη σειρά 7m/s, έπειτα ανεβαίνει στα 12m/s και τέλος στα 20m/s.

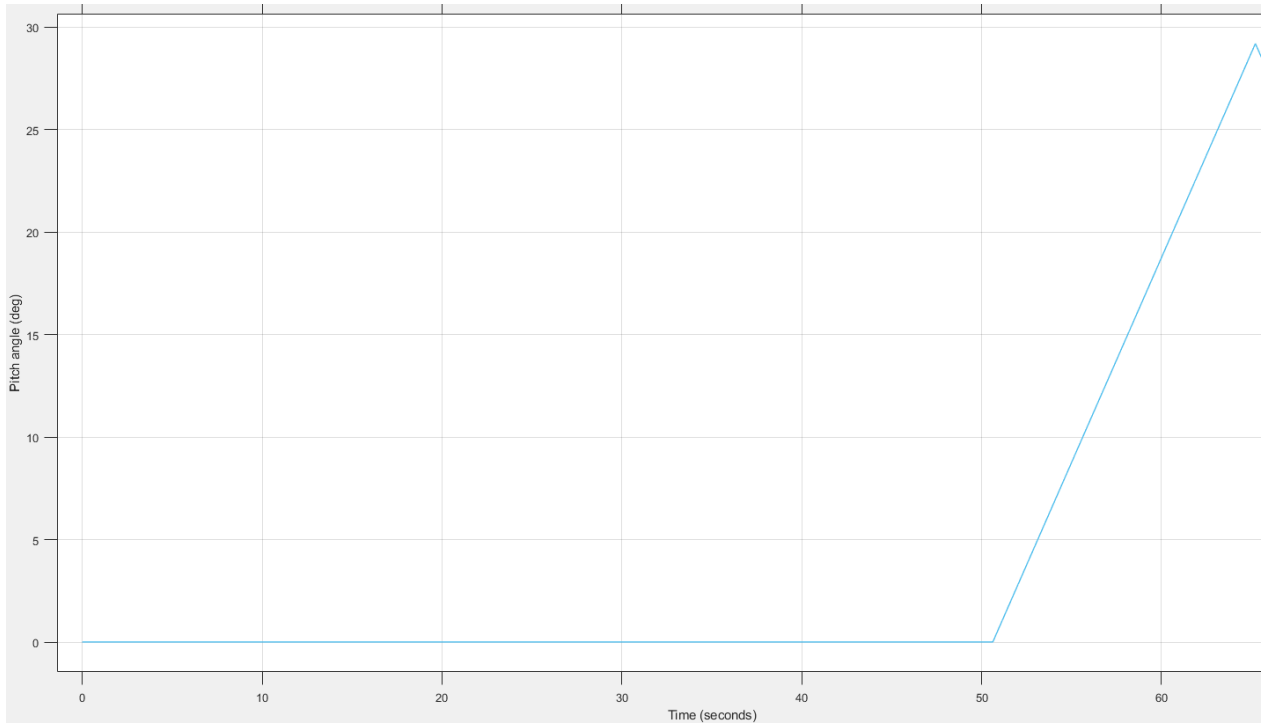


Εικόνα 57: Ταχύτητα ανέμου σε σχέση με τον χρόνο.

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η ταχύτητα του ανέμου η οποία αλλάζει στους καθορισμένους χρόνους.

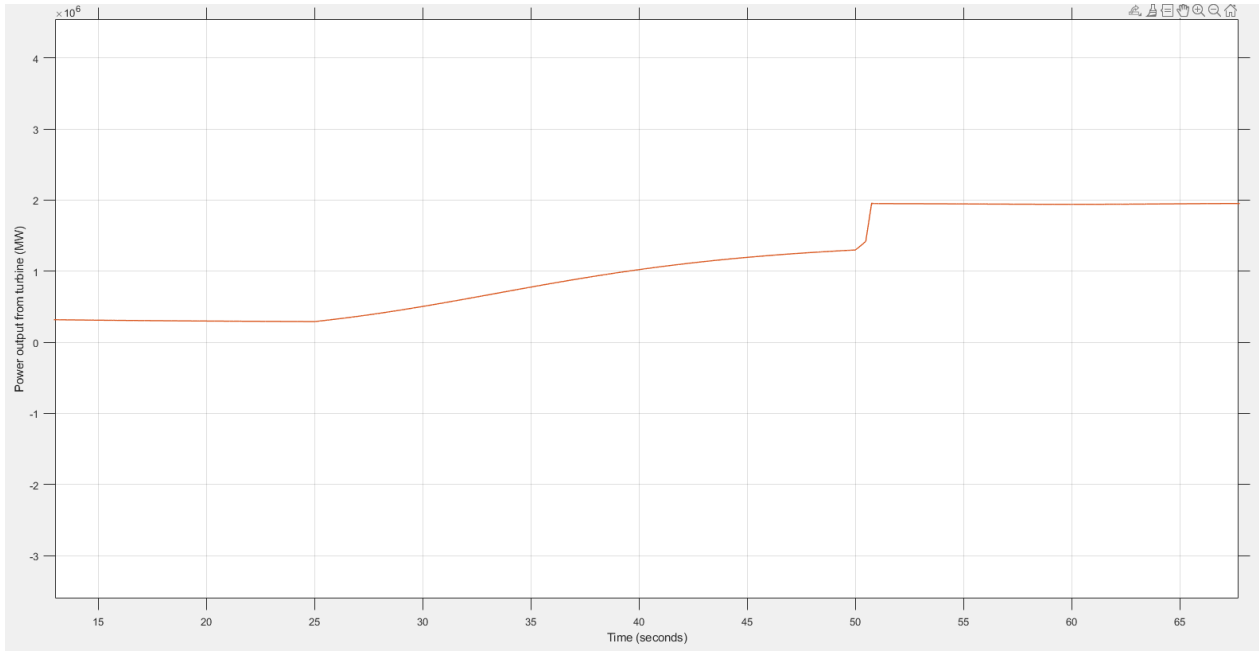


Εικόνα 58: Στροφές την ανεμογεννήτριας σε σχέση με τον χρόνο.



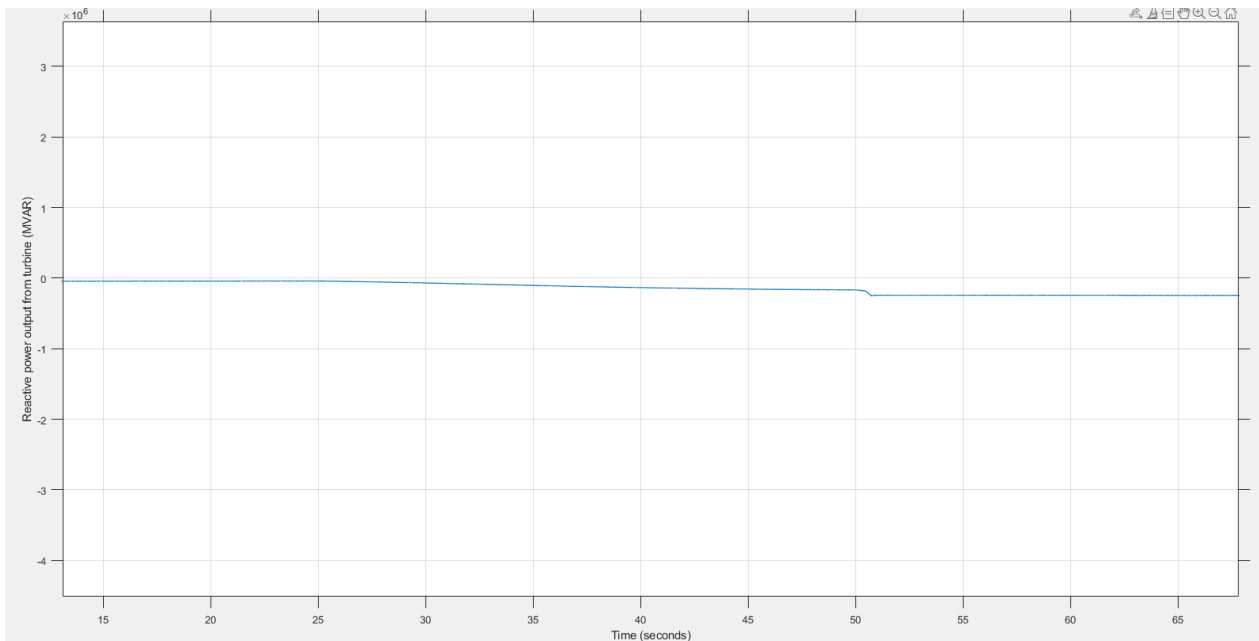
Εικόνα 59: Μεταβολή της γωνίας των πτερυγίων σε σχέση με τον χρόνο.

Όπως παρατηρείται από το διάγραμμα βλέπουμε μετά από την τελευταία μεταβολή του ανέμου η οποία είναι από τα 12 m/s στα 20 m/s, υπάρχει μεταβολή της γωνίας των πτερυγίων ως προς την ροή του ανέμου με τη μέγιστη δυνατή μεταβολή η οποία είναι 2 deg/s.



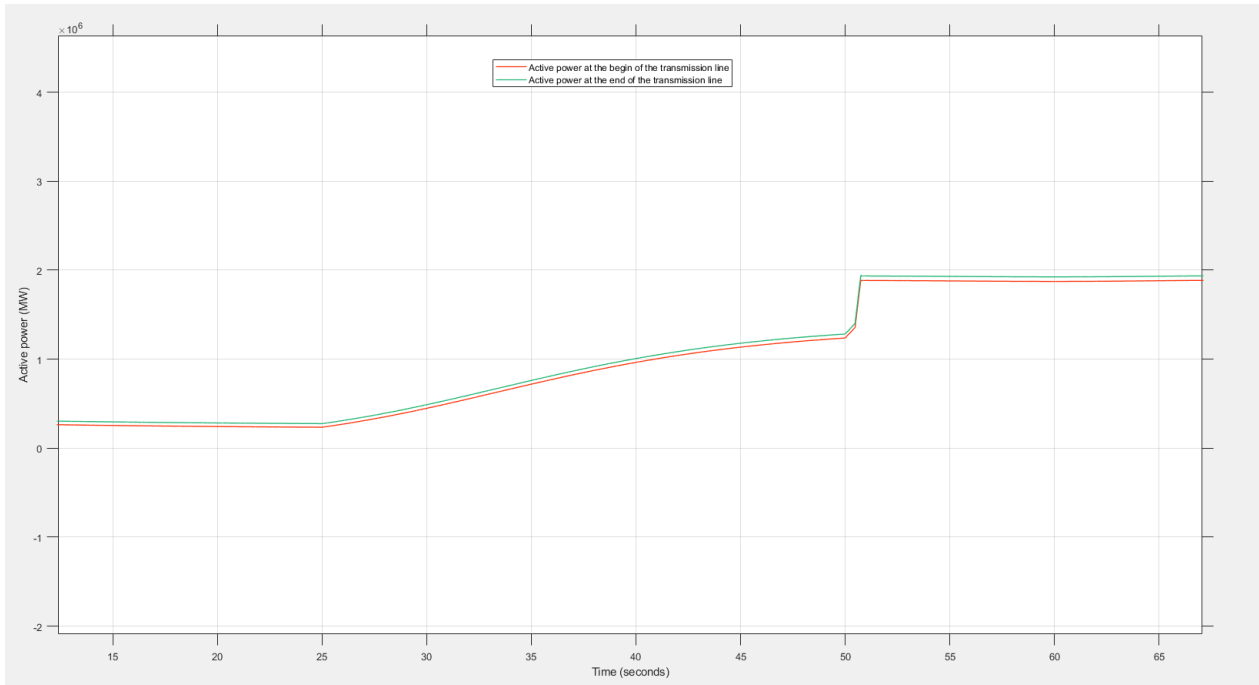
Εικόνα 60: Η ενεργός ισχύς στην έξοδο της ανεμογεννήτριας.

Στο παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε ότι η ενεργός ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας είναι σε ισορροπία για ταχύτητα ανέμου 7m/s, αφού γίνεται αλλαγή από τα 7m/s στα 12 m/s δηλαδή στα 25 δευτερόλεπτα μέχρι και λίγο μετά τα 45 η ανεμογεννήτρια προσπαθεί να πάρει μια κατάσταση σταθερής ισχύος, λίγο μετά τα 45 δεύτερα μέχρι και την επόμενη αλλαγή ταχύτητας του ανέμου οπου εκεί φτάνει την μέγιστη ισχύ η ανεμογεννήτρια και παραμένει σταθερή.



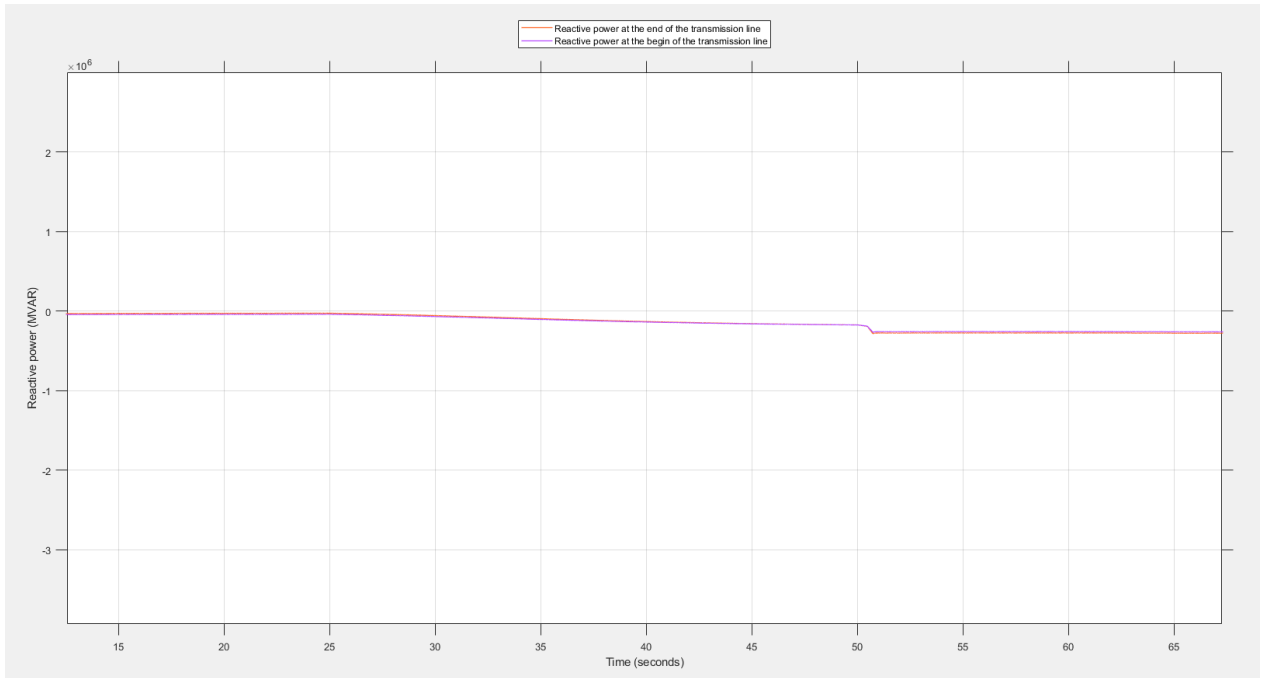
Εικόνα 61: Η άεργος ισχύς στην έξοδο της ανεμογεννήτριας.

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται η άεργος ισχύς στην έξοδο της γεννήτριας. Φαίνεται ότι η γεννήτρια οριακά τροφοδοτείται από το δίκτυο με άεργο ισχύ με το φαινόμενο να φαίνεται πιο ξεκάθαρα μετά τα 50 δευτερόλεπτα. Γενικά φαίνεται να είναι σταθερή η ροή άεργου ισχύος ακόμη και μετά την μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου.



Εικόνα 62: Η ενεργός ισχύς στην αρχή και στο τέλος της γραμμής μεταφοράς.

Στην εικόνα 61 απεικονίζεται η ενεργός ισχύς στην αρχή και στο τέλος της γραμμής μεταφοράς. Από την μορφή της κυματομορφής ταιριάζει ακριβώς με την κυματομορφή εξόδου ενεργού ισχύος της ανεμογεννήτριας με την διαφορά να είναι ότι στο σύνολο της είναι μειωμένη επειδή υπάρχουν οι απώλειες στην γραμμή μεταφοράς και στον μετασχηματιστή ανύψωσης τάσης ο οποίος κάνει ανύψωση από τα 575V στα 20kV.



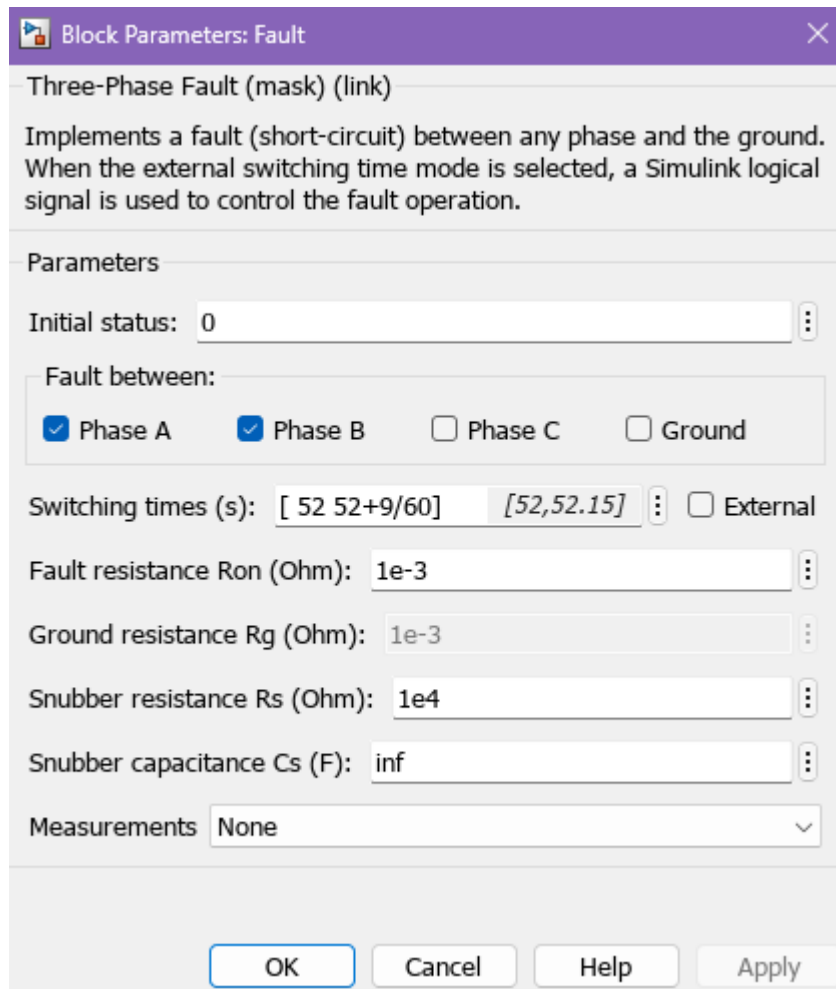
Εικόνα 63: Η άεργος ισχύς στην αρχή και στο τέλος της γραμμής μεταφοράς.

Όπως με την ενεργό έτσι και με την άεργο ισχύ η μορφή είναι σχεδόν ίδια με την διαφορά των απωλειών σε όλο το μήκος της.

Στη συνέχεια θα γίνει δοκιμή σε βραχυκυκλώματα

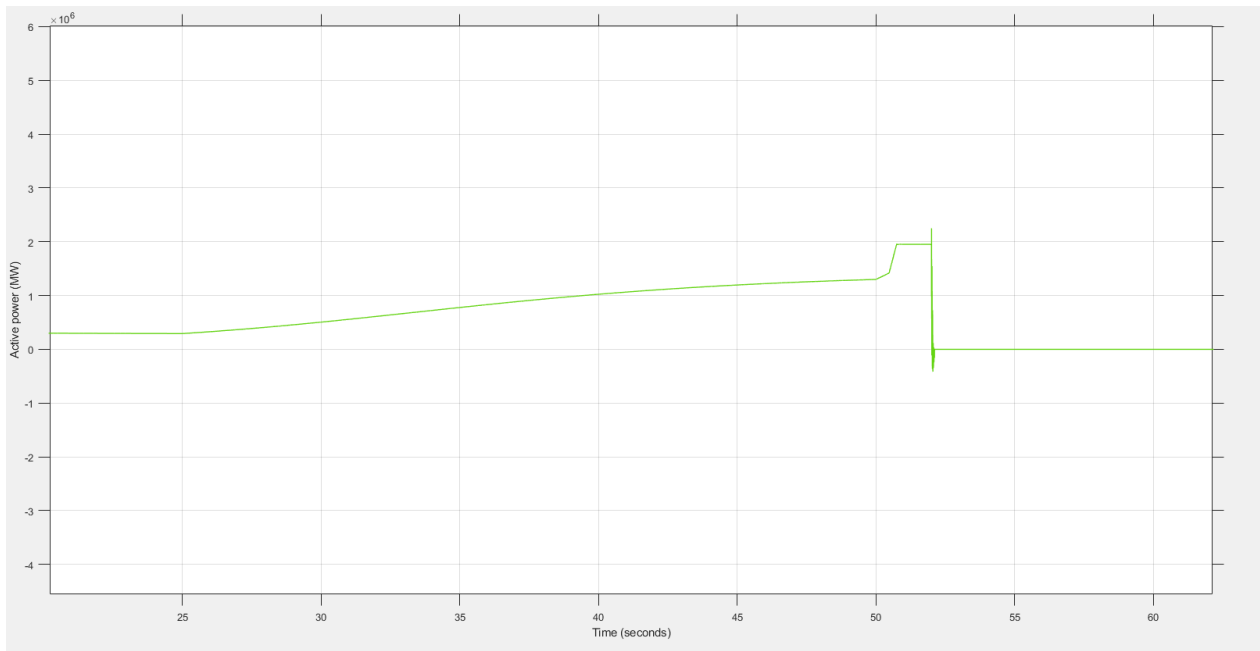
Το πρώτο βραχυκύκλωμα είναι πολικό δηλαδή να γίνει βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων.

Η δεύτερη δοκιμή είναι για βραχυκύκλωμα μεταξύ φάσης και γείωσης.



Εικόνα 64: Σφάλμα μεταξύ δύο φάσεων.

Στην παραπάνω φωτογραφία είναι το μενού από το μπλοκ το οποίο δημιουργεί βραχυκυκλώματα στο σύστημα. Όπως φαίνεται στην δεύτερη επιλογή γίνεται σφάλμα βραχυκύκλωσης μεταξύ των φάσεων 1 και 2. Το σφάλμα προκύπτει στα 52 δευτερόλεπτα όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι στα 20 m/s δηλαδή στην μέγιστη απόδοση της γεννήτριας.



Εικόνα 65: Ενεργός ισχύς της γεννήτριας με πολικό σφάλμα.

Στην παραπάνω κυματομορφή απεικονίζεται η ενεργός ισχύς που παράγει η γεννήτρια βλέπουμε ότι στα 52 δευτερόλεπτα γίνεται το βραχυκύκλωμα και έπειτα η ανεμογεννήτρια δεν επανέρχεται σε κανονική λειτουργία επειδή λόγω του βραχυκυκλώματος η τάση εξόδου έπεσε κάτω από το 75% της ονομαστικής δηλαδή κάτω από 431V.

Protection type:

1. Instantaneous AC Overcurrent
2. AC Overcurrent (positive-sequence)
3. AC Current Unbalance
4. AC Undervoltage (positive-sequence)
5. AC Overvoltage (positive-sequence)
6. AC Voltage Unbalance (Negative-sequence)
7. AC Voltage Unbalance (Zero-sequence)
8. DC Overvoltage
9. Under Speed
10. Over Speed

Parameters

Fundamental frequency f1 (Hz):

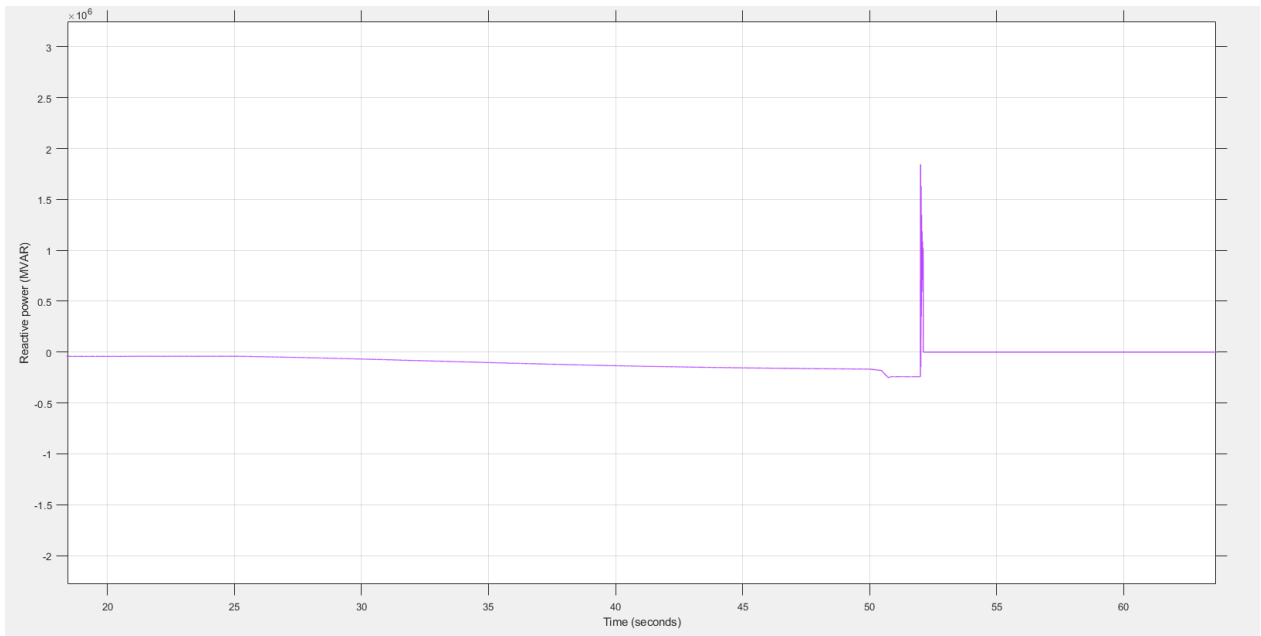
Instantaneous AC Overcurrent (pu):

Maximum AC Current [I1max(pu), Delay(s)]:
 [1.1,5]

Maximum AC Current Unbalance [I2/I1max(pu), Delay(s)]:
 [0.4,0.2]

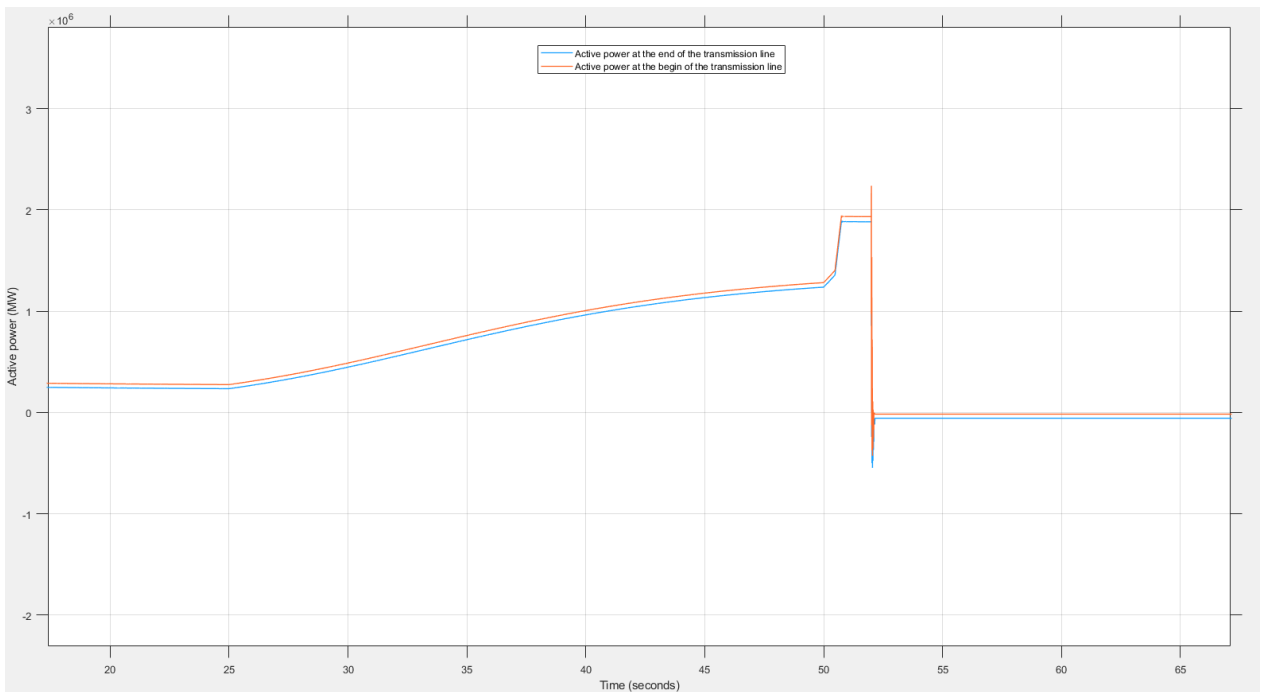
AC Under/Over Voltage [V1min(pu), V1max(pu), Delay(s)]:
 [0.75,1.1,0.1]

Εικόνα 66: Σταθερές ασφαλείας της ανεμογεννήτριας.

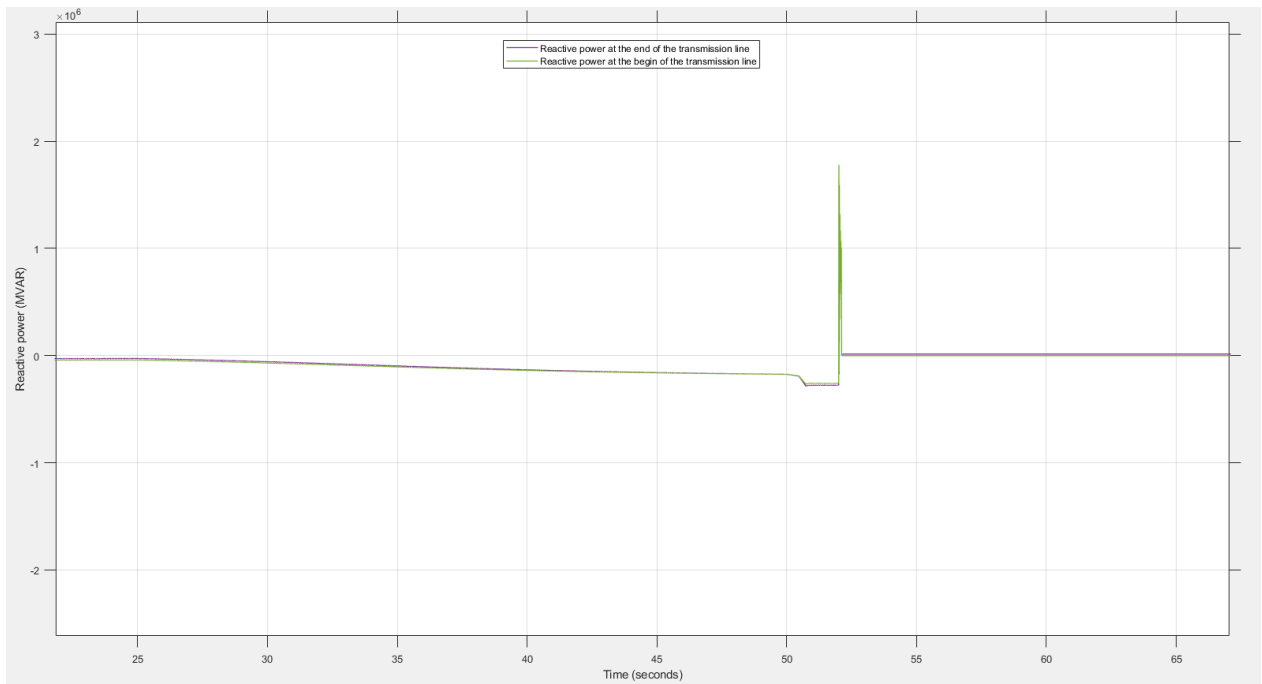


Εικόνα 67: Ανεργός ισχύς της γεννήτριας με πολικό σφάλμα.

Όπως και στην ενεργό έτσι και στην άεργο βλέπουμε το ίδιο φαινόμενο δηλαδή μετά το σφάλμα μηδενίζεται.



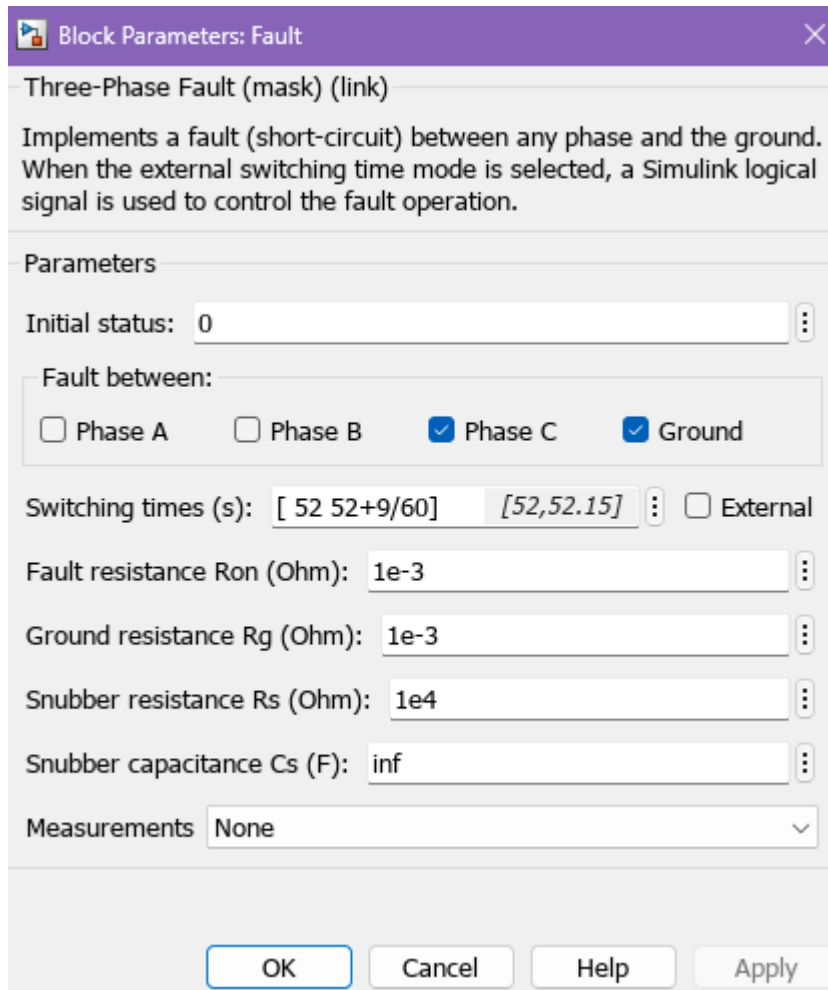
Εικόνα 68: Η ενεργός ισχύς στην αρχή και στο τέλος της γραμμής μεταφοράς σε δοκιμή πολικού βραχυκυκλώματος.

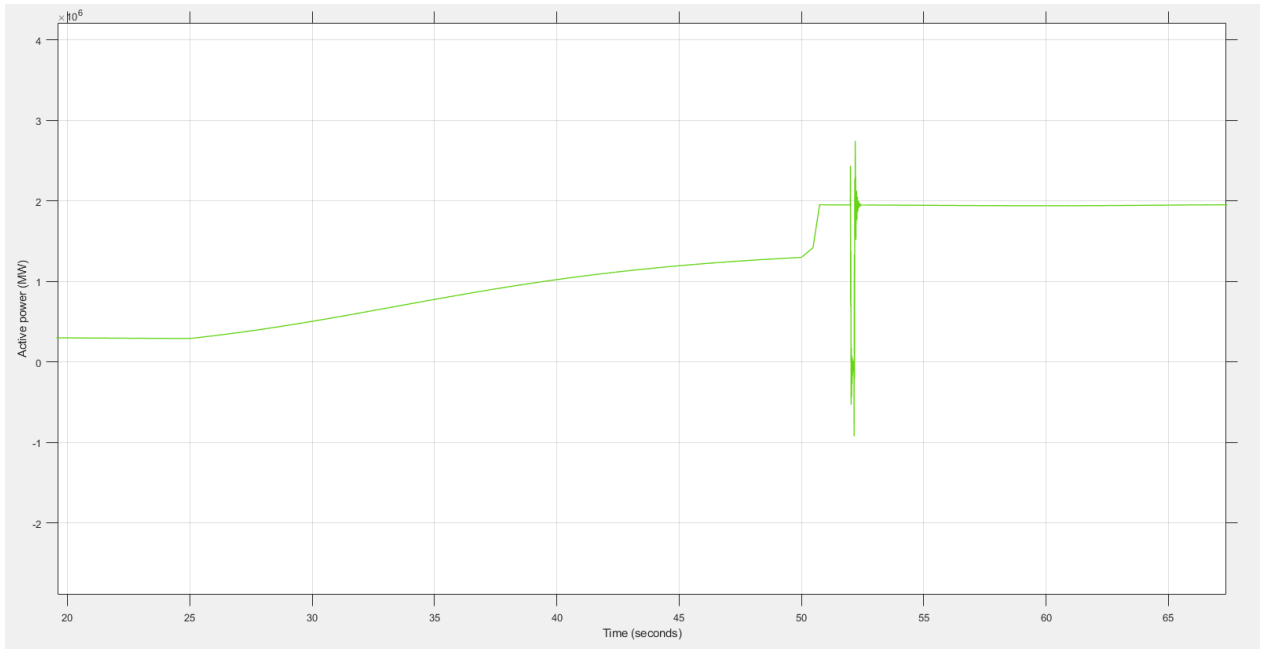


Εικόνα 69: Η άεργος ισχύς στην αρχή και στο τέλος της γραμμής μεταφοράς σε δοκιμή πολικού βραχυκυκλώματος.

Στις κυματομορφές ενεργού και άεργου ισχύος στο δίκτυο βλέπουμε ότι είναι ίδιες με τις αρχικές κυματομορφές χωρίς σφάλμα, στη συνέχεια στα 52 δευτερόλεπτα γίνεται το σφάλμα και έπειτα μηδενίζονται.

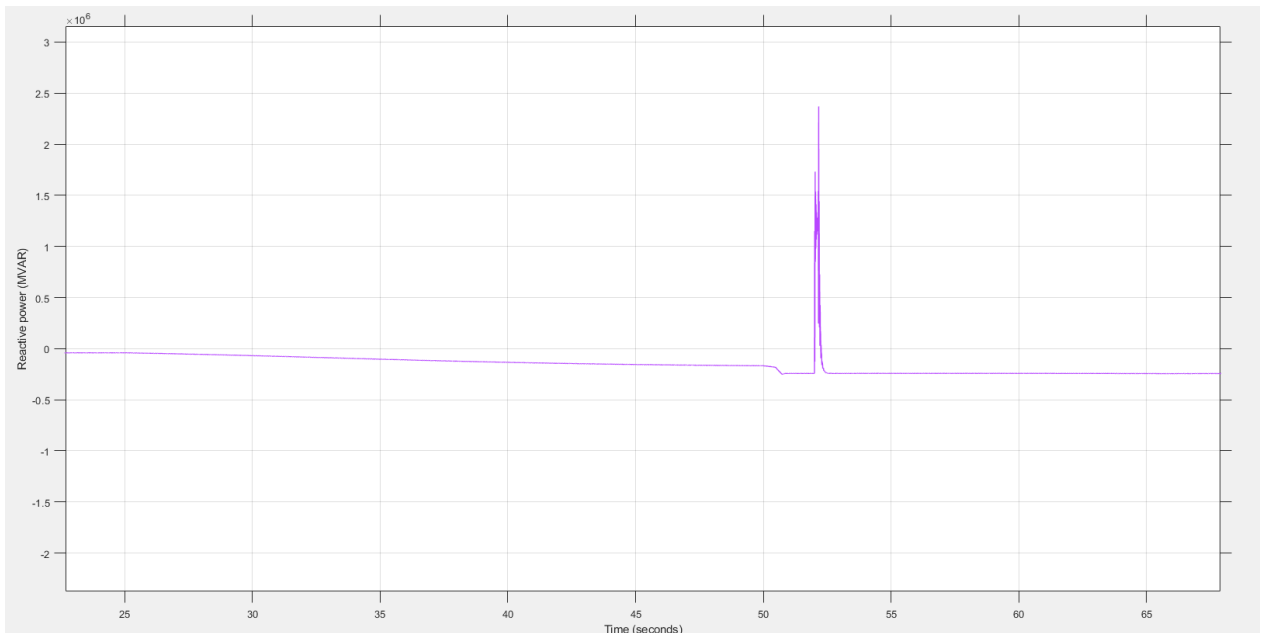
Στη δεύτερη δοκιμή θα γίνει σφάλμα με φασικό βραχυκύκλωμα στο σύστημα. Το φασικό βραχυκύκλωμα είναι όταν μια φάση βραχυκυκλώνεται με την γη. Θα γίνει ξανά στα 52 δευτερόλεπτα και θα γίνει βραχυκύκλωμα μεταξύ της γης και της τρίτης φάσης.



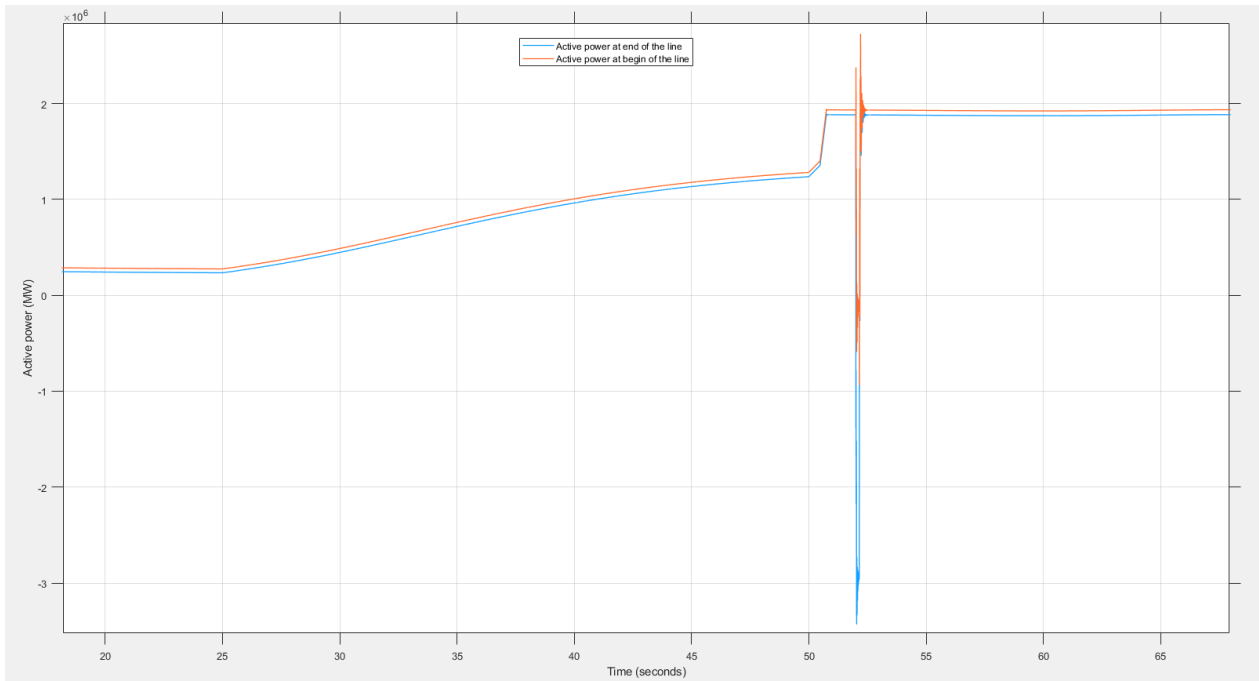


Εικόνα 70: Ενεργός ισχύς της γεννήτριας με φασικό σφάλμα.

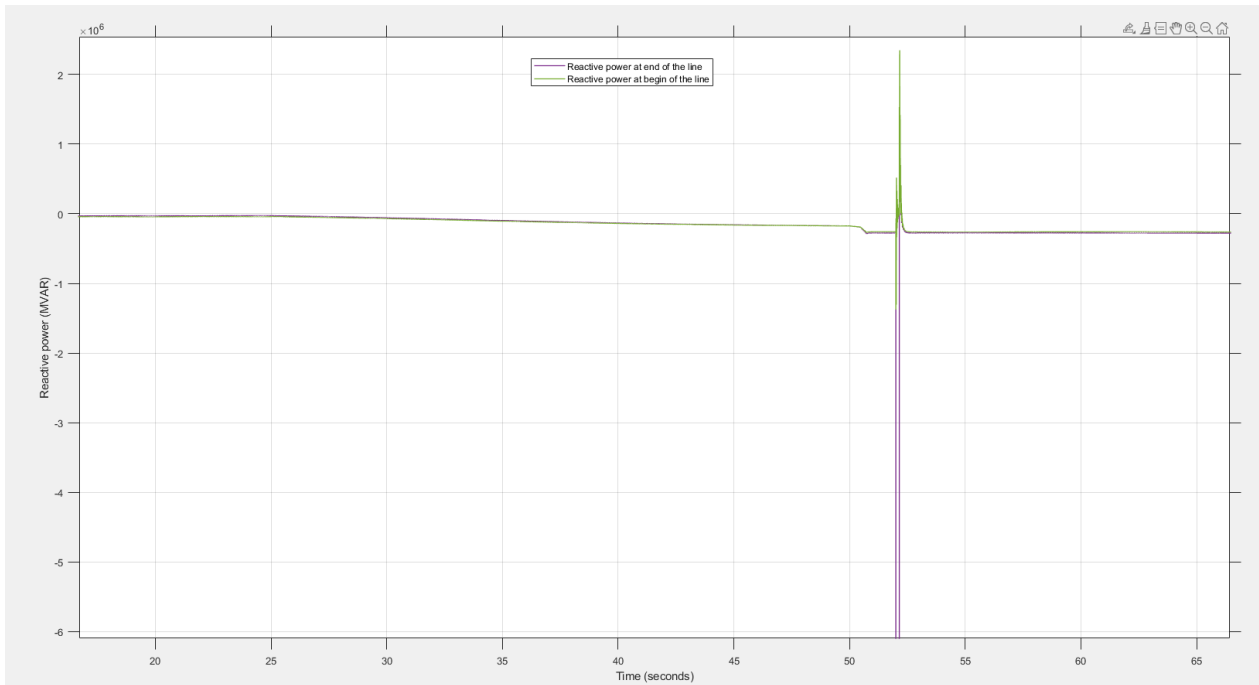
Σε αυτή τη περίπτωση σφάλματος βλέπουμε ότι στις κυματομορφές εξόδου ενεργού και άεργου ισχύος μετά το βραχυκύκλωμα δεν σταματάει να λειτουργεί η ανεμογεννήτρια αυτό οφείλεται στο ότι δεν πραγματοποιήθηκε καμία συνθήκη ασφαλείας έτσι ώστε να σταματήσει να λειτουργεί η ανεμογεννήτρια.



Εικόνα 71: Άεργος ισχύς της γεννήτριας με φασικό σφάλμα.



Εικόνα 72: Η ενεργός ισχύς στην αρχή και στο τέλος της γραμμής μεταφοράς σε δοκιμή φασικού βραχυκυκλώματος.



Εικόνα 73: Η άεργος ισχύς στην αρχή και στο τέλος της γραμμής μεταφοράς σε δοκιμή φασικού βραχυκυκλώματος.

Στις κυματομορφές ενεργού και άεργου ισχύος στο δίκτυο βλέπουμε ότι και αυτές μετά στο βραχυκύκλωμα ακολουθούν τις κυματομορφές εξόδου της ανεμογεννήτριας.
Τη στιγμή που γίνεται το σφάλμα παρατηρείται ότι γίνεται ιδιαίτερα μεγάλη αυξομείωση τόσο της ενεργού τόσο και της άεργου ισχύος.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο SIMULINK, που αφορούν την μοντελοποίηση μιας ανεμογεννήτριας η οποία χρησιμοποιεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας διπλά τροφοδοτούμενη επαγωγική γεννήτρια με παραγωγή ισχύος 2MW, όπου στην οποία θα εφαρμόστηκαν σφάλματα βραχυκύκλωσης πολικά και φασικά, προέκυψαν σημαντικά αποτελέσματα.

Από το διάγραμμα της ενεργού ισχύος εξόδου της ανεμογεννήτριας συναρτήσει του χρόνου προκύπτει ότι καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου το σύστημα προσπαθεί να έρθει σε ισορροπία είτε ρυθμίζοντας την ισχύ εξόδου είτε μέσω της ρύθμισης της κλίσης των πτερυγίων. Στην αρχική δοκιμή χωρίς σφάλματα από την οποία προέκυψαν οι εξής κυματομορφές, ταχύτητας ανέμου και χρόνου, ταχύτητα περιστροφής πτερυγίων και χρόνου, κλίσης πτερυγίων ως προς τον άνεμο και χρόνου και ενεργού και άεργου ισχύος ως προς τον χρόνο, στην έξοδο της ανεμογεννήτριας, πριν την γραμμή μεταφοράς 20kV και στο τέλος της. Σε αυτή τη δοκιμή προκύπτει ότι για 7m/s ταχύτητα ανέμου η ανεμογεννήτρια παράγει 300kW και ισορροπεί σε αυτά στα 5 δευτερόλεπτα, έπειτα με την πρώτη αλλαγή της ταχύτητας στα 12 m/s ισορροπεί στα 1,3MW και στην δεύτερη αλλαγή για 20m/s φτάνει στο μέγιστο της παραγωγής στα 1,95MW. Η άεργος ισχύς πάλι στην αρχή ισορροπεί στα 47 kVAR, έπειτα στα 165 kVAR και τέλος 242 kVAR.

Στο δίκτυο υπάρχει ο μετασχηματιστής ανύψωσης στα 20kV και μια γραμμή 10 χιλιομέτρων, έτσι λαμβάνοντας υπόψη τις κυματομορφές έχουμε 1,93MW στον μετασχηματιστή άρα 20kW απώλειες και στην γραμμή μεταφοράς έχουμε 1,9MW άρα 30kW απώλειες, έτσι στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας το σύστημα προσφέρει 1,9MW.

Η άεργος ισχύς μεταβάλλεται στη γεννήτρια είναι 24kVAR ,στον μετασχηματιστή είναι 26kVAR και στην αρχή της γραμμής είναι 27,5kVAR στο τελευταίο στάδιο της δοκιμής.

Στις δοκιμές με σφάλματα βραχυκύκλωσης έγιναν 2 διαφορετικές δοκιμές με διαφορετικά σφάλματα. Πάνω στις ίδιες συνθήκες όταν το σύστημα παράγει την μέγιστη ισχύ γίνεται σφάλμα στην μια περίπτωση πολικό βραχυκύκλωμα και στην άλλη φασικό.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στο πολικό σφάλμα η ανεμογεννήτρια δεν επανήλθε σε κανονική λειτουργία διότι πραγματοποιήθηκε η συνθήκη της ελάχιστης τάσης δικτύου η οποία ισχύει όταν για πάνω από 0.1 δευτερόλεπτα πέσει η τάση κάτω από το 75% της ονομαστικής τάσης, έτσι με το βραχυκύκλωμα έγινε μεγαλύτερη πτώση τάσης από το επιτρεπόμενο.

Αντίθετα με την περίπτωση του φασικού βραχυκυκλώματος η ανεμογεννήτρια συνέχισε να λειτουργεί κανονικά μετά από το σφάλμα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλίο 1: Ιορδάνης Ν. Κιοσκερίδης – ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, 2^η έκδοση
ISBN : 978-960-418-852-9

Βιβλίο 2: Β. Μπιτζιώνης – ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ, 2^η έκδοση
ISBN : 978-960-418-468-2

Βιβλίο 3: Bin Wu, Yongqiang Lang, Navid Zargari, Samir Kouro – Power Conversion and Control of Wind Energy Systems
ISBN : 978-1-118-02899-5(ePDF), 978-0-470-59365-3(hardback)

Βιβλίο 4: Κ. ΒΟΥΡΝΑΣ, Κ. ΠΑΠΑΔΑΚΗΣ, Κ.ΝΤΕΛΚΗΣ – ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ – ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ, Εκδόσεις Συμμετρία
ISBN : 978-960-266-305-9

Βιβλίο 5: Παντελής Β. Μαλατέστας, ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, 2^η έκδοση, εκδόσεις Τζιόλα.
ISBN : 978960-418-590-0

Paper 1: Ming Cheng, Ying Zhu, The state of the art of wind energy conversion systems and technologies: A review, Energy Conversion and Management.

Paper 2: Venkata Yaramasu, Bin Wu, Paresh C. Sen, Samir Kouro, Mehdi Narimani, High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies

- https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power
- https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_wind_power
- <https://openclass.teiwm.gr/modules/document/file.php/ME-ID107/%CE%95%CE%BD%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B1%206%20%CE%95%CF%80%CE%B5%CE%BE%CE%B5%CF%81%CE%B3%CE%B1%CF%83%CE%AF%CE%B1%20%26%20%>
- <https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/ENV304/8.%20%CE%91%CE%B9%CE%BF%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CF%8C%20%CE%94%CF%85%CE%BD%CE%B1%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CF%8C.pdf>
- <https://www.luvside.de/en/hawt-advantage-disadvantage/>
- <https://www.elprocus.com/horizontal-axis-wind-turbine/>
- <https://patents.google.com/patent/US20110142627A1/en>
- <https://patents.google.com/patent/DE4122771A1/en>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Doubly_fed_electric_machine

- <https://vortexbladeless.com/>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Vertical-axis_wind_turbine
- https://en.wikipedia.org/wiki/Savonius_wind_turbine
- https://en.wikipedia.org/wiki/Darrieus_wind_turbine
- <https://en.wikipedia.org/wiki/Vortex>
- https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/2020/11/FEK2464B_2008_RES.pdf
- https://en.wikipedia.org/wiki/Betz%27s_law
- https://en.wikipedia.org/wiki/Weibull_distribution
- <http://drømstørre.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/tour/wres/weibull.htm>
- <https://wind-data.ch/tools/weibull.php?lng=en>