



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Μοντελοποίηση Συστήματος Λειτουργίας Ανεμογεννήτριας
Wind Turbine Operational System Modelling

Υπό
ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΠΑΤΣΑΒΟΥΔΗΣ
ΛΕΩΝΙΔΑΣ ΚΥΖΙΡΙΔΗΣ

Επιβλέπων:
Βαγρόπουλος Στυλιανός, Επίκουρος καθηγητής

Πτυχιακή Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Πτυχίου του Τμήματος Συστημάτων Ενέργειας

Λάρισα, 2023

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Βαγρόπουλος Στυλιανός
(Επιβλέπων) Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Συστημάτων
Ενέργειας, Σχολή Τεχνολογίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Παπαδριανός Νικόλαος
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας, Σχολή
Τεχνολογίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Θεοδοσίου Θεοδόσιος
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας,
Σχολή Τεχνολογίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ

Με το παρόν κείμενο βεβαιώνουμε ότι οι κάτωθι υπογράφων είμαστε συγγραφείς της παρούσης πτυχιακής εργασίας, η οποία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των απαιτήσεων του προγράμματος σπουδών του Τμήματος Συστημάτων Ενέργειας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και η οποία παραδόθηκε, μετά από έγκριση του επιβλέποντας καθηγητή μας, σε έντυπη και ψηφιακή μορφή στη Γραμματεία του Τμήματος. Επίσης δηλώνουμε πως κάθε πηγή που χρησιμοποιήσαμε (βιβλιογραφία, αρθρογραφία, δικτυογραφία), για την υποστήριξη των υποθέσεων της μελέτης και της ερευνάς μας, είναι πλήρως συμβατή με τα ακολουθούμενα επιστημονικά πρότυπα και, επιπλέον, αναφέρεται ρητά, υπό μορφή αναφοράς-παραπομπής, σε όλο το φάσμα κειμένων της παρούσης εργασίας. Το αυτό ισχύει για τη χρήση δευτερογενών δεδομένων (πινάκων, διαγραμμάτων και εικόνων), ιδεών και λέξεων, τα οποία και αναφέρονται είτε ακριβώς όπως υπάρχουν στις πηγές είτε μεθερμηνεύονται από εμάς.

ΕΠΩΝΥΜΟ	ΠΑΤΣΑΒΟΥΔΗΣ ΚΥΖΙΡΙΔΗΣ
ΟΝΟΜΑ	ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΛΕΩΝΙΔΑΣ
ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ	2919014 2919093
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	5 /10/23
ΥΠΟΓΡΑΦΗ	

© 2023. ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΠΑΤΣΑΒΟΥΔΗΣ, ΛΕΩΝΙΔΑΣ ΚΥΖΙΡΙΔΗΣ

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας της Σχολής Τεχνολογίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ειλικρινείς ευχαριστίες μας στον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μας, Επίκουρος Καθηγητή κ. Βαγρόπουλο Στυλιανό, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της υλοποίησης της εργασίας μας.

Επίσης, είμαστε ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μας, για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μας και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Ευχαριστούμε τους φίλους μας Αρσένη Περπερίδη, Γεώργιο Καλαιτζή, Χρήστο Κωστίκα και Ιωάννη Τούμπανο για την ηθική υποστήριξή τους.

Τέλος, είμαστε ευγνώμων στους γονείς μας, Χρήστο Πατσαβούδη, Σοφία Κογιουμτζίδου, Γεώργιο Κυζιρίδη και Ευσταθία Μανδαλοπούλου για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Αφιερώνουμε αυτή την εργασία στους γονείς μας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται ευρέως σε όλο τον κόσμο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Συναντώνται σε δύο κατηγορίες (οριζοντίου και κάθετου άξονα) και σε 4 τύπους, αναλόγως τη λειτουργία σταθερών/μεταβλητών στροφών, του είδους του ηλεκτρικού κινητήρα και του ελέγχου του και της ύπαρξης ή μη διατάξεων μετατροπών ισχύος. Στην παρούσα πτυχιακή εργασία μοντελοποιείται μια ανεμογεννήτρια με Σύγχρονη Γεννήτρια Μονίμου Μαγνήτη (ΣΓΜΜ), χρησιμοποιώντας το προγραμματιστικό περιβάλλον του Simulink®. Η ανεμογεννήτρια ΣΓΜΜ είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη διαμόρφωση ανεμογεννήτριας λόγω της υψηλής απόδοσης και αξιοπιστίας της. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε μέσω του Simulink® επιτρέπει την προσομοίωση της ηλεκτρικής και μηχανικής συμπεριφοράς της ανεμογεννήτριας υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Έχουν μοντελοποιηθεί τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων του στροβίλου, τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας, το σύστημα ελέγχου του βήματος των πτερυγίων και το σύστημα ελέγχου για τη μετατροπή ισχύος. Η συμπεριφορά του μοντέλου επικυρώνεται μέσω σύγκρισης με πειραματικά δεδομένα και χρησιμοποιείται έπειτα για τη διερεύνηση των επιπτώσεων των αλλαγών την ταχύτητας του ανέμου και της γωνίας κλίσης των πτερυγίων στην απόδοση του συστήματος. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν την αποτελεσματικότητα του μοντέλου ανεμογεννήτριας ΣΓΜΜ το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, καθώς και για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και του ελέγχου τους.

Λέξεις-κλειδιά: ανεμογεννήτρια, ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα, έλεγχος βήματος, μοντελοποίηση, σύγχρονη γεννήτρια μονίμου μαγνήτη, Simulink®

Abstract

Wind Turbines are widely used all over the world to generate electricity. There are categorized into two general types (horizontal and vertical axis) and four types, based on the operation of fixed/variable speed, the type of electric generator, control and the presence of power converters. In this thesis. A wind turbine with a Synchronous Permanent Magnet Generator (PMSG) is modeled using the Simulink® programming environment. The PMSG wind turbine is widely used due to its high efficiency and reliability. The model developed through Simulink® allows for the simulation of the electrical and mechanical behavior of the wind turbine under various operating conditions. The aerodynamic characteristics of the rotor blades, electrical characteristics of the generator, blade pitch control system and power conversion control system have all been modeled. The model's behavior is validated by comparison with experimental data and is then used to investigate the effects of changes in wind speed and blade pitch angle on the systems performance. The results demonstrate the effectiveness of the PMSG wind turbine model, which can be used to predict the behavior under different operational conditions and also the optimization of the design and its control.

Key words: wind turbine, horizontal axis wind turbine, pitch control, modeling, synchronous permanent magnet generator, Simulink®

Πίνακας περιεχομένων

1. Εισαγωγή	11
1.1. Βασικές Αρχές.....	11
1.1.1. Φυσικές και μετεωρολογικές αρχές δημιουργίας των ανεμών	11
1.1.2. Τοπικοί παράγοντες επίδρασης στην κατεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου .	12
1.2. Παράγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο	12
1.3. Ταξινόμηση ανεμογεννητριών	14
1.3.1. Ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα (Horizontal axis)	14
1.3.2. Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα (Vertical axis)	20
1.4. Διάκριση Α/Γ	21
1.4.1. Α/Γ σταθερής και μεταβλητής ταχύτητας	21
1.4.2. Τύποι Α/Γ	22
1.4.2.1. Τύπος Α - Α/Γ σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού	22
1.4.2.2. Τύπος-Β Α/Γ περιορισμένης λειτουργίας μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα μεταβλητής αντίστασης δρομέα.....	24
1.4.2.3. Τύπος Γ – Α/Γ μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα διπλής τροφοδότησης και σύστημα μετατροπών ισχύος συνδεδεμένων στο δρομέα.....	24
1.4.2.4. Τύπος Δ – Α/Γ μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα ισχύος.....	25
1.5. Μέθοδοι ρύθμισης ισχύος.....	27
2. Ανάλυση της PMSG	28
2.1. Γενικά	28
2.2. Κατηγοριοποίηση Σύγχρονων μηχανών μόνιμου μαγνήτη	31
2.3. Υλικά μόνιμων μαγνητών	35
3. Μοντέλο Α/Γ στο Simulink	37
3.1. Wind turbine block.....	37
3.2. Pitch Angle Controller Block	40
3.3. Two mass drivetrain	44
3.4. One Mass Drivetrain	45
3.5. PMSG generator block.....	48
3.6. Επαλήθευση σωστής λειτουργίας του συστήματος.....	51
4. Σύνδεση με το δίκτυο για Α/Γ των 1.5MW.....	56
4.1. Μετατροπές και δημιουργία μοντέλου.....	56
4.2. Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	59
5. Συμπεράσματα.....	61

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1-1: Ηλιακή ακτινοβολία και δημιουργία ανέμου [1]

Εικόνα 1-2: Βασική δομή Α/Γ [2]

Εικόνα 1-3: Τα βασικά μέρη μιας Α/Γ οριζοντίου άξονα 1. Θεμελίωση, 2. Σύνδεση, 3. Πύργος, 4. Σκάλα πρόσβασης στο ανώτερο επίπεδο της Α/Γ, 5. Μηχανισμός ρύθμισης διεύθυνσης της πλήμνης,

6. Πλήμνη, 7. Γεννήτρια, 8. Ανεμόμετρο, 9. Φρένα, 10. Κιβώτιο ταχυτήτων, 11. Πτερύγια ρότορα, 12. Μηχανισμός ρύθμισης πτερυγίων, 13. Κεφαλή ρότορα [3]

Εικόνα 1-4: Σχηματικό διάγραμμα της μηχανής Α/Γ τύπου Darrieus [4]

Εικόνα 1-5: Σχηματικό διάγραμμα της μηχανής Α/Γ τύπου Savonius [4]

Εικόνα 1-6: Α/Γ σταθερής ταχύτητας [6]

Εικόνα 1-7: Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας [7]

Εικόνα 1-8: Α/Γ σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού και απ' ευθείας σύνδεση στο δίκτυο [8]

Εικόνα 1-9: Α/Γ μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα μεταβλητής αντίστασης δρομέα [8]

Εικόνα 1-10: Α/Γ μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα διπλής τροφοδότησης και σύστημα μετατροπών ισχύος συνδεδεμένων στο δρομέα [8]

Εικόνα 1-11: Α/Γ μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα ισχύος [8]

Εικόνα 1-12: Ενδεικτικές καμπύλες ισχύος Α) pitch control Β) passive stall control Γ) active stall control [11]

Εικόνα 2-1: Α/Γ μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα ισχύος [11]

Εικόνα 2-2: Δομή σύγχρονης γεννήτριας μονίμου μαγνήτη [14]

Εικόνα 2-3: Τομές RFPM μηχανής και κατεύθυνση ρεύματος και μαγνητικής ροής [15]

Εικόνα 2-4: Τομές AFPM μηχανής με κατευθύνσεις μαγνητικής ροής και ρεύματος [15]

Εικόνα 2-5: Τοπολογία TFPM μηχανής και κατευθύνσεις μαγνητικής ροής και ρεύματος [15]

Εικόνα 2-6: α) δρομέας και άξονες q και d με επιφανειακούς μαγνήτες, β) δρομέας και άξονες q και d με εσωτερικούς μαγνήτες [16]

Εικόνα 3-1: Wind Turbine Block

Εικόνα 3-2: Cp subsystem

Εικόνα 3-3: Cp-λ χαρακτηριστικές [18]

Εικόνα 3-4: Cut in & cut off subsystem

Εικόνα 3-5: Ανύψωση πτερύγιου σε σχέση με τον άνεμο [19]

Εικόνα 3-6: Pitch Angle Controller Block

Εικόνα 3-7: Pitch Angle Controller Block (1)

Εικόνα 3-8: Pitch Angle Controller Block (2)

Εικόνα 3-9: Pitch Angle Controller Block (3)

Εικόνα 3-10: Two Mass Drivetrain [20]

Εικόνα 3-11: Τα επιμέρη στοιχεία της νασέλας [21]

Εικόνα 3-12: one mass drivetrain [22]

Εικόνα 3-13: One Mass Drivetrain (1)

Εικόνα 3-14: One Mass Drivetrain (2)

Εικόνα 3-15: One Mass Drivetrain (3)

Εικόνα 3-16: One Mass Drivetrain (4)

Εικόνα 3-17: Μοντέλο σύγχρονης μηχανής μόνιμων μαγνητών στο Simulink

Εικόνα 3-18: Χαρακτηριστική καμπύλη (power curve)

Εικόνα 3-19: Σχέση C_p με παραγόμενη ισχύ

Εικόνα 3-20: Pitch angle και ισχύς για ταχύτητα ανέμου **8m/s**

Εικόνα 3-21: Pitch angle και ισχύς για ταχύτητα ανέμου **15m/s**

Εικόνα 3-22: Pitch angle και ισχύς για ταχύτητα ανέμου **30m/s**

Εικόνα 3-23: Γωνιακή ταχύτητα ρότορα και γεννήτριας για ταχύτητα ανέμου **6m/s**

Εικόνα 3-24: Γωνιακή ταχύτητα ρότορα και γεννήτριας για ταχύτητα ανέμου **15m/s**

Εικόνα 3-25: Ροπή ρότορα και γεννήτριας για ταχύτητα ανέμου **6m/s**

Εικόνα 3-26: Ροπή ρότορα και γεννήτριας για ταχύτητα ανέμου **15m/s**

Εικόνα 4-1: Νέος Υπολογισμός C_p

Εικόνα 4-2: Νέα σταθερές του PID Controller

Εικόνα 4-3: Σύνδεση PMSG με το δίκτυο [23]

Εικόνα 4-4: Control Subsystem [23]

Εικόνα 4-5: Προφίλ ανέμου

Εικόνα 4-6: Διάγραμμα ενεργούς και άεργους ισχύς

Εικόνα 4-7: Διαγράμματα τάσης-ρεύματος

Κατάλογος Συντομογραφιών

- Ανεμογεννήτρια (Α/Γ)
- Ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού (squirrel cage induction generator) [ΑΓΤΚ-SCIG]
- Ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα (wound rotor induction generator) [ΑΓΤΔ-WRIG]
- Σύγχρονη γεννήτρια μόνιμης διέγερσης (permanent magnet synchronous generator) [ΣΓΜΜ-PMSG]
- Ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα διπλής τροφοδότησης (double-fed induction generator) [ΑΓΔΤ-DFIG]

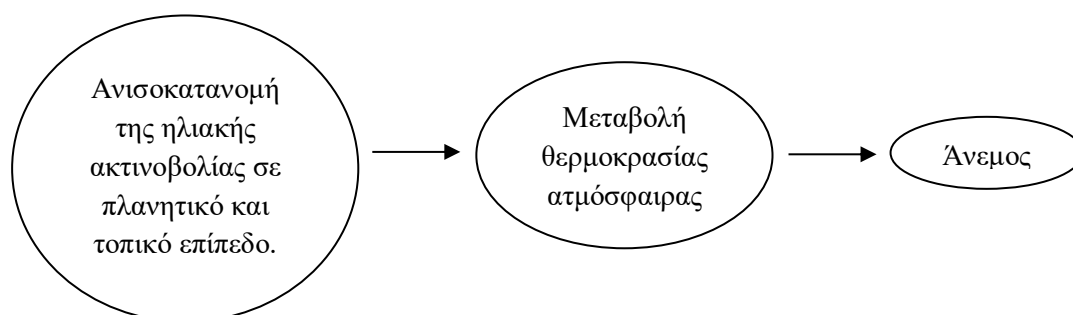
1. Εισαγωγή

1.1. Βασικές Αρχές

Η ανεμογεννήτρια (Α/Γ) είναι μια τεχνική διάταξη που αξιοποιεί ένα μέρος της κινητικής ενεργείας του ανέμου μετατρέποντας το σε πρώτο στάδιο σε κινητική ενεργεία των πτερυγίων και σε τελικό στάδιο σε ηλεκτρική ενεργεία [1].

1.1.1. Φυσικές και μετεωρολογικές αρχές δημιουργίας των ανεμών

Ονομάζουμε άνεμο την κίνηση της αέριας μάζας σε σχέση με την επιφάνεια της Γης. Είναι ένα φυσικό φαινόμενο που δημιουργείται εξαιτίας των μεταβολών της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας. Η θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα μεταβάλλεται εξαιτίας της ανομοιόμορφης θέρμανσης από την ηλιακή ακτινοβολία των διαφορών περιοχών της Γης, καθώς και των ποικίλων ατμοσφαιρικών στρωμάτων. Συγκεκριμένα οι περιοχές που βρίσκονται πιο κοντά στον Ισημερινό θερμαίνονται περισσότερο από την ηλιακή ακτινοβολία σε σχέση με περιοχές με μεγαλύτερο γεωγραφικό πλάτος, δημιουργώντας έτσι μια συνεχή κίνηση αερίων μαζών μεταξύ ισημερινού και πόλων, η οποία επηρεάζεται άμεσα από την περιστροφή της Γης γύρω από τον άξονα της και την συνεπαγόμενη δύναμη Coriolis. Σε τοπικό επίπεδο η διεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου επηρεάζονται άμεσα από τοπικούς παράγοντες όπως λίμνες, ποτάμια, το ανάγλυφο της περιοχής κλπ. [1].



Εικόνα 1-1: Ηλιακή ακτινοβολία και δημιουργία ανέμου [1]

Η γενική φυσική αρχή που ισχύει για την κίνηση μιας αέριας μάζας μέσα στην ατμόσφαιρα είναι ότι ο αέρας που θερμαίνεται, γίνεται ελαφρύτερος από τις ψυχρότερες γειτονικές μάζες αέρα και ανυψώνεται, ενώ οι γειτονικές ψυχρές αέριες μάζες παίρνουν τη θέση του. Αυτός ο μηχανισμός ουσιαστικά εξηγεί τις οριζόντιες και τις κατακόρυφες κινήσεις των αερίων μαζών [1].

1.1.2. Τοπικοί παράγοντες επίδρασης στην κατεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου

Όπως προαναφέρθηκε, η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου επηρεάζονται άμεσα από τις τοπικές ιδιομορφίες [1].

a. Εξάρτηση ταχύτητας του ανέμου από το υψόμετρο/τραχύτητα εδάφους

Η ροή του αέρα κοντά στο έδαφος επηρεάζεται από την τριβή που προκαλείται λόγω της επαφής του με αυτό, όπως και από φυσικά και τεχνητά εμπόδια όπως βλάστηση και κτίρια. Συνεπώς η ταχύτητα του ανέμου εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους [1].

b. Στροβιλισμός

Η ταχύτητα και η κατεύθυνση του αέρα μεταβάλλονται με γρήγορο ρυθμό όταν διασχίζει ανώμαλες-τραχιές επιφάνειες ή συνάντα φυσικά ή τεχνητά εμπόδια. Αυτό οφείλεται στο φυσικό φαινόμενο της δημιουργίας των στροβίλων. Η δημιουργία στροβιλισμού στον άνεμο μειώνει τη διαθέσιμη εκμεταλλεύσιμη αιολική ισχύ και προσθέτει φόρτια κόπωσης στις Α/Γ. Για αυτόν τον λόγο χρειάζεται εκτεταμένη και προσεκτική μελέτη της επιφάνειας του εδάφους καθώς και των εμποδίων πριν την χωροθέτηση της Α/Γ [1].

c. Χρονικές μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου

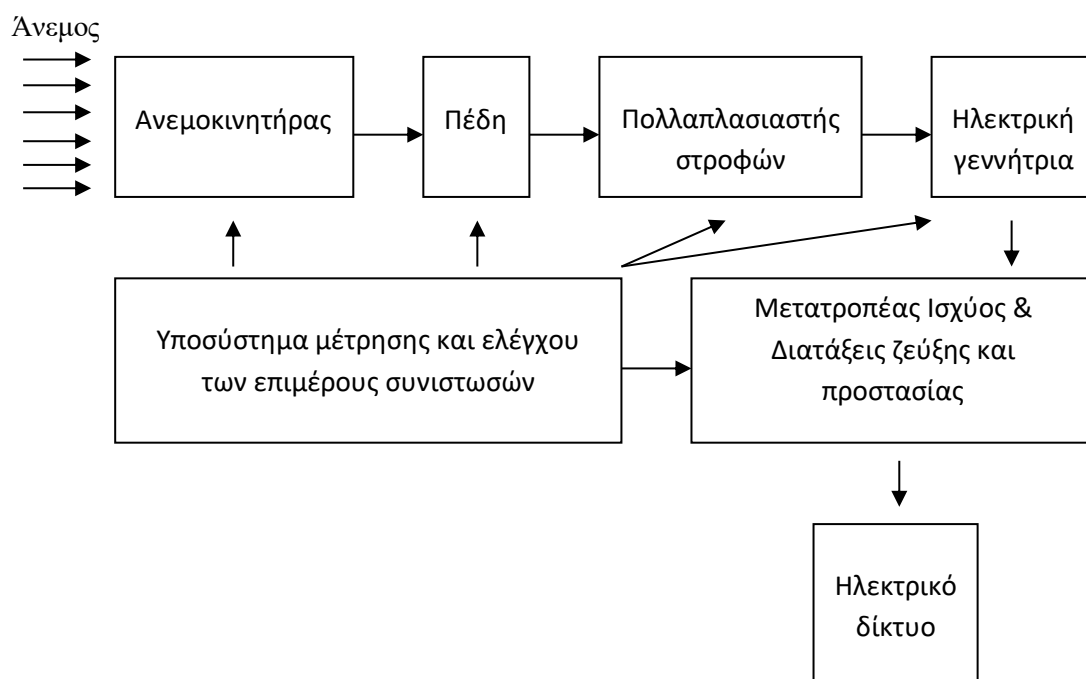
Η ταχύτητα καθώς και η κατεύθυνση του ανέμου μεταβάλλονται σε σχέση με τον χρόνο, μεταβαλλώντας την διαθέσιμη αιολική ισχύ. Οι μεταβολές αυτές μπορούν να είναι στιγμιαίες, μεταξύ νύχτας και μέρας, εποχιακές ή ακόμα και μεταβολές μεταξύ διαδοχικών χρόνων ή δεκαετίας. Οι αλλαγές αυτές βασίζονται στο τοπικό κλίμα της περιοχής. Η γνώση των μεταβολών αυτών είναι ιδιαίτερα σημαντική για την χωροθέτηση των Α/Γ [1].

1.2. Παράγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο

Η Α/Γ, αποτελεί την ηλεκτρομηχανική διάταξη για την μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου που προσπίπτει στην επιφάνεια των πτερυγίων σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι δύο βασικές συνιστώσες της είναι ο ανεμοκινητήρας και η ηλεκτρική γεννήτρια.

Ο ανεμοκινητήρας (Α/Κ) αποτελεί την αεροδυναμική διάταξη που μετατρέπει την κινητική ενέργεια του προσπίπτοντος αέρα στην επιφάνεια σάρωσης του σε ωφέλιμο μηχανικό έργο. Τα δυο κύρια τμήματα του ανεμοκινητήρα είναι ο δρομέας και τα πτερύγια. Η ηλεκτρική γεννήτρια μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια του δρομέα σε ηλεκτρική ενέργεια. Στις περισσότερες περιπτώσεις, μεταξύ του άξονα του Α/Κ και

του άξονα της γεννήτριας υπάρχει κατάλληλο κιβώτιο ταχυτήτων που λειτουργεί σαν πολλαπλασιαστής στροφών, για την προσαρμογή των χαμηλών στροφών του άξονα του Α/Κ στις ονομαστικές στροφές της γεννήτριας. Μια άλλη σημαντική συνιστώσα είναι ο μηχανισμός πέδησης (υδραυλικό φρένο) για προστασία σε περίπτωση υπερτάχυνσης, είτε σε περιπτώσεις αποσύζευξης της Α/Γ από το ηλεκτρικό δίκτυο λόγω σφαλματικών καταστάσεων, είτε σε υψηλές ταχύτητες ανέμου. Ο μηχανισμός αυτός τοποθετείται συνήθως στον άξονα χαμηλών στροφών. Πολλές φορές τοποθετείται επιπλέον μηχανισμός πέδησης στον άξονα των υψηλών στροφών, για επιπλέον προστασία και αξιοπιστία. Στους Α/Κ οριζοντίου άξονα απαιτείται διάταξη του προσανατολισμού της νασέλας, ώστε η επιφάνεια των πτερυγίων να είναι καθετή προς την διεύθυνση του ανέμου (yaw control), καθώς και του βήματος των πτερυγίων (pitch control). Όσο αφορά το κομμάτι της γεννήτριας και του δικτύου, απαιτούνται διατάξεις ζεύξης και προστασίας και ενδεχομένως ηλεκτρικοί μετατροπείς ισχύος. Η βασική δομή μιας Α/Γ δίνεται από το παρακάτω σχήμα, [Εικόνα 1-2] [1].



Εικόνα 1-2: Βασική δομή Α/Γ [2]

Το υποσύστημα μέτρησης και ελέγχου εξασφαλίζει την ομαλή και αποδοτική λειτουργία της Α/Γ μέσα στα επιτρεπόμενα όρια ταχυτήτων ανέμου που δίνονται από τον κατασκευαστή, την λειτουργία του συστήματος πέδησης, τον έλεγχο του μηχανισμού αλλαγής βήματος των πτερυγίων (pitch control), του συστήματος περιστροφής της νασέλας και του προσανατολισμού των πτερυγίων σε σχέση με τον άνεμο (yaw control), τον έλεγχο των διατάξεων ζεύξης και απόζευξης και των

διαφόρων προστασιών, καθώς επίσης και τον έλεγχο της ροής της ηλεκτρικής ισχύος προς το δίκτυο μέσω του αντιστοίχου ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος. Επιπλέον για την αποφυγή περιστροφής του δρομέα σε υψηλές ταχύτητες που μπορούν να προκαλέσουν καταπονήσεις στα πτερύγια, λόγω της δημιουργίας ισχυρών φυγοκεντρικών δυνάμεων, υπάρχουν αυτόματα συστήματα περιορισμού της ταχύτητας περιστροφής κάτω από την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή, αυτό επιτυγχάνεται είτε μέσω του ελέγχου βήματος των πτερυγίων είτε με τη χρήση ειδικών ρυθμιζόμενων ακροπτερυγίων και μεταπτερυγίων [1].

1.3. Ταξινόμηση ανεμογεννητριών

Τα πτερύγια των Α/Γ ακολουθούν την ίδια αεροδυναμική μορφή με τα πτερύγια των αεροπλάνων. Η κατηγοριοποίηση τους έχει να κάνει με τον προσανατολισμό του άξονα περιστροφής των πτερυγίων, σε σχέση με την επιφάνεια του εδάφους και την ταχύτητα του ανέμου. Διακρίνονται σε δυο βασικές κατηγορίες, σε Α/Γ οριζοντίου άξονα (horizontal axis) και κατακόρυφου άξονα (vertical axis).

Σε σύγκριση με τις Α/Γ οριζοντίου άξονα, οι εμπορικές εφαρμογές των Α/Γ κατακόρυφου άξονα είναι ιδιαίτερα περιορισμένες [2].

1.3.1. Ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα (Horizontal axis)

Οι Α/Γ οριζοντίου άξονα κυριαρχούν εδώ και πολλά χρόνια το εμπόριο, με την συντριπτική πλειοψηφία των εγκαταστάσεων Α/Γ να είναι αυτού του τύπου. Το ενδιαφέρον στην ερευνά και την ανάπτυξη της τεχνολογίας διεθνώς επικεντρώνεται στις Α/Γ οριζοντίου άξονα και έχει προκαλέσει σημαντική τεχνολογική ανάπτυξη στην κατασκευή και τα χαρακτηριστικά τους.

Μια Α/Γ οριζοντίου άξονα αποτελείται ουσιαστικά από τον πύργο (tower) και την πλήμνη (nacelle) η όποια τοποθετείται στην κορυφή του πύργου. Η πλήμνη βασικά αποτελείται από το ρότορα (rotor) μαζί με τα πτερύγια, τη γεννήτρια (generator) και το κιβώτιο ταχυτήτων (gear box) όταν αυτό υπάρχει [1].

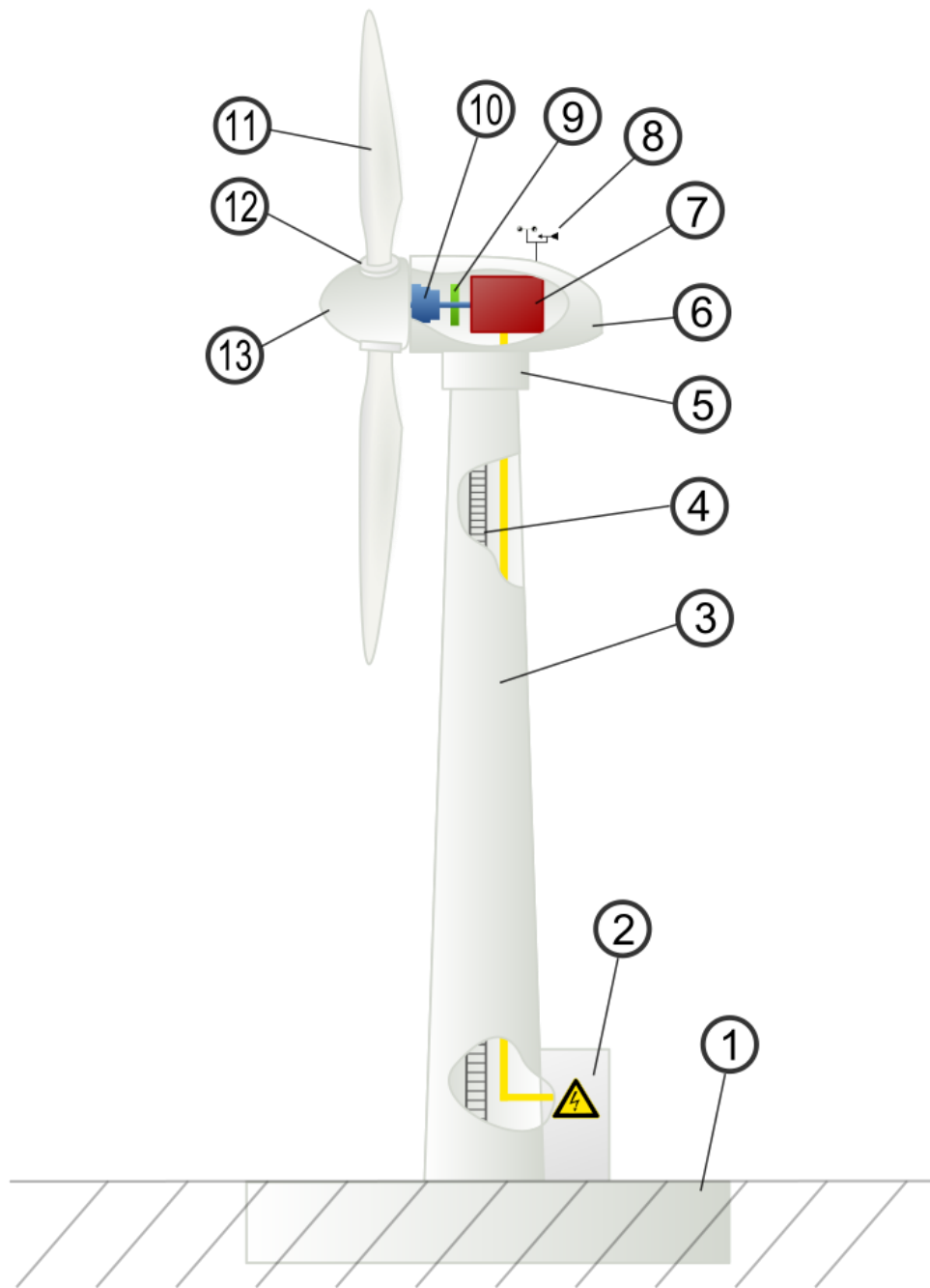
Οι Α/Γ οριζοντίου άξονα, διαθέτουν από ένα έως τρία πτερύγια, επομένως διακρίνονται σε μονόπτερες(single bladed), δίπτερες(two bladed) και σε τρίπτερες (three bladed). Τα πτερύγια έχουν την κατάλληλη συστροφή και μείωση της διατομής τους από την βάση προς τα άκρα.

Οι μονόπτεροι Α/Κ φέρουν υποχρεωτικά αντίβαρο, αντίθετα από το πτερύγιο, για την ισοστάθμιση του βάρους του πτερύγιου. Συγκριτικά με τις άλλες δυο κατηγορίες οι τριπτέριγες παρουσιάζουν τον μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης, έχουν λιγότερο αεροδυναμικό θόρυβο, μικρότερη αεροδυναμική φόρτιση των πτερυγίων καθώς και

καλύτερη ισοστάθμιση. Για τους λόγους αυτούς επικρατούν στην πλειοψηφία των εμπορικών κατασκευών Α/Γ οριζοντίου άξονα.

Στο εσωτερικό του κουβούκλιου βρίσκεται το σύνολο του ηλεκτρομαγνητικού εξοπλισμού. Ανάλογα με την ονομαστική τους ισχύ οι Α/Γ χωρίζονται σε δυο κατηγορίες, στις μικρής ισχύος για ονομαστική ισχύ μικρότερη των 100kW καθώς και της μεγάλης ισχύος για ονομαστική ισχύ μεγαλύτερη των 100kW. Παράδειγμα Α/Γ οριζόντιου άξονα για εμπορική εφαρμογή:

- Ονομαστική Ισχύ: 500-1100kW
- Διάμετρος Δρομέα: 40-120m
- Αριθμός πτερυγίων: Τρία (3)
- Ύψος πύργου: 50-120m
- Ονομαστική ταχύτητα ανέμου: 12-16m/s
- Εύρος ταχυτήτων δρομέα: 12-40rpm [2]



Εικόνα 1-3: Τα βασικά μέρη μιας Α/Γ οριζοντίου άξονα **1.** Θεμελίωση, **2.** Σύνδεση, **3.** Πύργος, **4.** Σκάλα πρόσβασης στο ανώτερο επίπεδο της Α/Γ, **5.** Μηχανισμός ρύθμισης διεύθυνσης της πλάνης, **6.** Πλήμνη, **7.** Γεννήτρια, **8.** Ανεμόμετρο, **9.** Φρένα, **10.** Κιβώτιο ταχυτήτων, **11.** Πτερύγια ρότορα, **12.** Μηχανισμός ρύθμισης πτερυγίων, **13.** Κεφαλή ρότορα [3]

Συστατικά μέρη Α/Γ:

A) Ρότορας (Rotor)

Ρότορας ονομάζεται το τμήμα της Α/Γ όπου η κινητική ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια της περιστροφής των πτερυγίων. Αποτελείται από δυο επιμέρους τμήματα, αυτό της κεφαλής του ρότορα (rotor hub) και αυτό των πτερυγίων (blades). Περισσότερο από το 95% των εγκατεστημένων Α/Γ διαθέτουν 3 πτερύγια, λόγω της αυξημένης τους απόδοσης σε σχέση με μονόπτερες ή δίπτερες Α/Γ.

Τα πτερύγια των Α/Γ είναι συνήθως κατασκευασμένα από πλαστικά υψηλής ποιότητας ενισχυμένα με ίνες γυαλιού, άνθρακα, κλπ. για να αντέχουν στις υψηλές καταπονήσεις κατά την διάρκεια της λειτουργίας της Α/Γ. Ανάλογα την επιλογή των υλικών και την σχεδίαση των πτερυγίων αλλάζουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά καθώς και το κόστος κατασκευής της Α/Γ.

Στη κεφαλή του ρότορα υπάρχει μηχανισμός ρύθμισης των πτερυγίων, ο οποίος μετακινεί τα πτερύγια ανάλογα με την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου για την λειτουργία της Α/Γ στη μέγιστη δυνατή απόδοση καθώς και την προστασία της σε περίπτωση ανεμών επικίνδυνων ταχυτήτων. Ανάλογα με τον αριθμό των πτερυγίων και το συνολικό σχεδιασμό της Α/Γ υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι i) rigid ή hingeless hub, ii) teetered hub, iii) flap ή lag hinge hub [1].

B) Κιβώτιο ταχυτήτων (Gear box)

Τυπικά η συχνότητα περιστροφής μιας Α/Γ είναι από 30 έως 50 r/min. Όμως κατά την λειτουργία τους στις περισσότερες περιπτώσεις η συχνότητα τους είναι από 1000 έως και 1500r/min. Συνεπώς για τον συγχρονισμό των δυο συχνοτήτων χρησιμοποιείται κιβώτιο ταχυτήτων, έτσι ώστε να πραγματοποιείται ομαλά η μεταφορά της μηχανικής ισχύς από το ρότορα στη γεννήτρια. Η απόδοση του κιβώτιου κυμαίνεται μεταξύ 95-98% όσον αφορά τη μεταφορά ενέργειας (απώλειες κύριος λόγω τριβής). Υπάρχουν και Α/Γ χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων (direct driven), οι οποίες χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο λόγω του μειωμένου τους θορύβου και της αυξημένης απόδοσης τους σχετικά με Α/Γ με κιβώτιο ταχυτήτων. Αυτές οι Α/Γ χρησιμοποιούν πολυπολική γεννήτρια δακτυλίου (multi pole ring generators) οι οποίοι μπορούν να λειτουργήσουν σε πολλαπλές συχνότητες περιστροφής [1].

Γ) Γεννήτρια (generator)

Η γεννήτρια μετατρέπει την κινητική-μηχανική ενεργεία περιστροφής του ρότορα σε ηλεκτρική ενέργεια και αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά τμήματα της Α/Γ. Για μικρές γεννήτριες της τάξης των kW χρησιμοποιούνται γεννήτριες συνεχούς ρεύματος

(DC generators). Σε μεγαλύτερες Α/Γ οι οποίες συνδέονται με το ηλεκτρικό δίκτυο χρησιμοποιούνται τριφασικές γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος (3 phase AC generators). Η λειτουργία αυτών των γεννητριών βασίζεται στο φαινόμενο της ηλεκτρικής επαγωγής, για αυτό και λέγονται επαγωγικές γεννήτριες (induction generators), και χωρίζονται σε δυο κυρίες κατηγορίες, τις σύγχρονες επαγωγικές γεννήτριες (synchronous induction generators) και ασύγχρονες επαγωγικές γεννήτριες (asynchronous induction generators) [1].

Δ) Μηχανισμός ρύθμισης διεύθυνσης της πλήμνης (wind direction yaw mechanism)

Η πλήμνη έχει την δυνατότητα να μετακινείται ανάλογα με την κατεύθυνση του ανέμου, μέσω μηχανισμού που υπάρχει στην βάση της εκεί που συνδέεται με το κομμάτι του πύργου. Ο μηχανισμός αυτός είναι είτε υδραυλικός είτε ηλεκτρομηχανικός και είναι εξοπλισμένος με σύστημα πέδησης σε περίπτωση που είναι απαραίτητη η σταθεροποίηση της πλήμνης [1].

Ε) Πύργος (tower)

Ο πύργος έχει δυο λειτουργίες, πρώτη και κυριότερη είναι η στήριξη της πλήμνης στο ιδανικό ύψος από την επιφάνεια του εδάφους και δεύτερη, η απορρόφηση της πίεσης και των κραδασμών που δέχεται το σύστημα από τον άνεμο. Η κατασκευή και η στήριξη του πύργου είναι θεμελιώδους σημασίας, διότι χωρίς τη σωστή λειτουργία του πύργου η υπόλοιπη εγκατάσταση είτε υπολειτουργεί είτε δεν μπορεί να λειτουργήσει καθόλου είτε και να μπορεί να λειτουργήσει είναι πολύ επικίνδυνο κάτι να πάει λάθος. Ο σχεδιασμός του πύργου καθώς και η θεμελίωση του στο έδαφος χρειάζονται ιδιαίτερη προσοχή και μελέτη ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα συντονισμού εξαιτίας του ανέμου που μπορούν να επηρεάσουν την ομαλή λειτουργία και απόδοση της Α/Γ η ακόμα και να την καταστρέψουν.

Οι περισσότεροι πύργοι είναι κατασκευασμένοι είτε από χάλυβα είτε από σκυρόδεμα. Ανάλογα το είδος της κατασκευής υπάρχουν δυο κύριοι τύποι, ο σωληνοειδής (tubular) και ο πλεγματικός-δικτυωτός (lattice). Επίσης, το ελάχιστο ύψος του πύργου καθορίζεται από την ακτίνα των πτερυγίων του ρότορα.

Συμπληρωματικά, για το μέγιστο ύψος του πύργου συνυπολογίζονται τόσο ο παράγοντας της μεγίστης ενεργειακής απόδοσης του συστήματος όσο και ο παράγοντας του κόστους, για την λήψη της τελικής βέλτιστης απόφασης. Αυτός είναι ο βασικός λόγος που το ύψος του πύργου είναι διαφορετικό μεταξύ των ποικίλων εγκαταστάσεων ανά τον κόσμο. Το ύψος του πύργου κυμαίνεται μεταξύ 40 και 80m,

όμως καθώς η ισχύ των Α/Γ συνεχώς αυξάνεται, πύργοι έως και 100m δεν είναι ασυνήθιστο φαινόμενο [1].

ΣΤ) Θεμελιώσεις του πύργου (foundations)

Παράγοντες όπως οι τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες, η μορφολογία και ο τύπος του εδάφους, το κόστος και το μέγεθος της εγκατάστασης παίζουν σημαντικό ρόλο στον τύπο της θεμελίωσης που επιλέγεται για μια εγκατάσταση. Οι θεμελιώσεις χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες, τη ρηχή (shallow) και τη βαθιά (deep) θεμελίωση, και οι δυο τύποι θεμελιώσεις είναι τεχνολογικά αναπτυγμένοι αλλά διαφέρουν όσο αφορά το κόστος.

Όσο αφορά τις Α/Γ που εγκαθίστανται σε αιολικά πάρκα μέσα στην θάλασσα (υπεράκτιες εγκαταστάσεις – off-shore) η θεμελίωση των πύργων είναι πολύ πιο κοποβόρα και μπορεί να είναι και πλωτή (float support) ή σε βάθη μικρότερα των 50m (όπου βρίσκονται σήμερα όλα τα υπεράκτια πάρκα) να είναι σταθερά στον πυθμένα (floor-mounted support) [1].

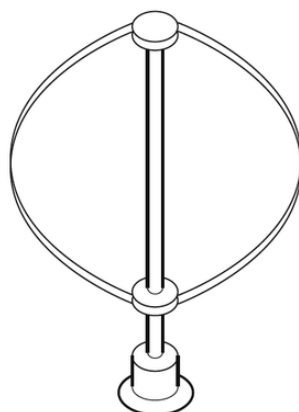
Ζ) Σύνδεση στο δίκτυο (grid connection)

Η σύνδεση των Α/Γ μπορεί να γίνει είτε με άμεση (direct connection) είτε με έμμεση σύνδεση (indirect connection) στο ηλεκτρικό δίκτυο (κεντρικό ή τοπικό). Το είδος της σύνδεσης εξαρτάται από το είδος της γεννήτριας που χρησιμοποιείται στην εγκατάσταση (σύγχρονη ή ασύγχρονη γεννήτρια) και τον γενικό σχεδιασμό της εγκατάστασης. Και οι δυο τρόποι σύνδεσης έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα (για παράδειγμα στην έμμεση σύνδεση η αεροδυναμική απόδοση του ρότορα της Α/Γ είναι ιδανική για εύρος περιστροφών που αντιστοιχεί στο 50-120% του ονομαστικού αριθμού περιστροφών, αλλά ταυτόχρονα υπάρχει αυξημένο κόστος και περισσότερες ηλεκτρικές απώλειες [1].

1.3.2. Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα (Vertical axis)

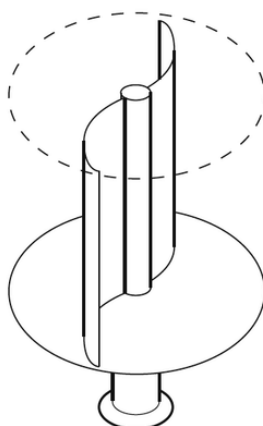
Ένας τύπος Α/Γ κατακόρυφο άξονα είναι οι λεγόμενες μηχανές Darrieus [Εικόνα 1-4], που παίρνουν το όνομα τους από τον Γάλλο μηχανικό Georges Jean Marie Darrieus που τις εφηύρε στη δεκαετία του 1920. Ένας ακόμα τύπος Α/Γ οριζοντίου άξονα είναι οι μηχανές Savonius [Εικόνα 1-5] οι οποίες πήραν το όνομα τους από τον Φιλανδό αρχιτέκτονα και εφευρέτη Sigurd J. Savonius και αναπτύχθηκαν την δεκαετία του 1970. Σοβαρά μειονεκτήματα όπως η μεγάλη διακύμανση της ωφέλιμης ροπής σε κάθε περιστροφή ή η μικρή δυνατότητα επιλογών για τη ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής των πτερυγίων σε υψηλές ταχύτητες ανέμων, δημιουργούσαν προβλήματα στην αποτελεσματική ενσωμάτωση των Α/Γ κυρίως σε μεγάλα αιολικά πάρκα που συνδέονται με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο [1].

Darrieus-Rotor



Εικόνα 1-4: Σχηματικό διάγραμμα της μηχανής Α/Γ τύπου Darrieus [4]

Savonius-Rotor



Εικόνα 1-5: Σχηματικό διάγραμμα της μηχανής Α/Γ τύπου Savonius [4]

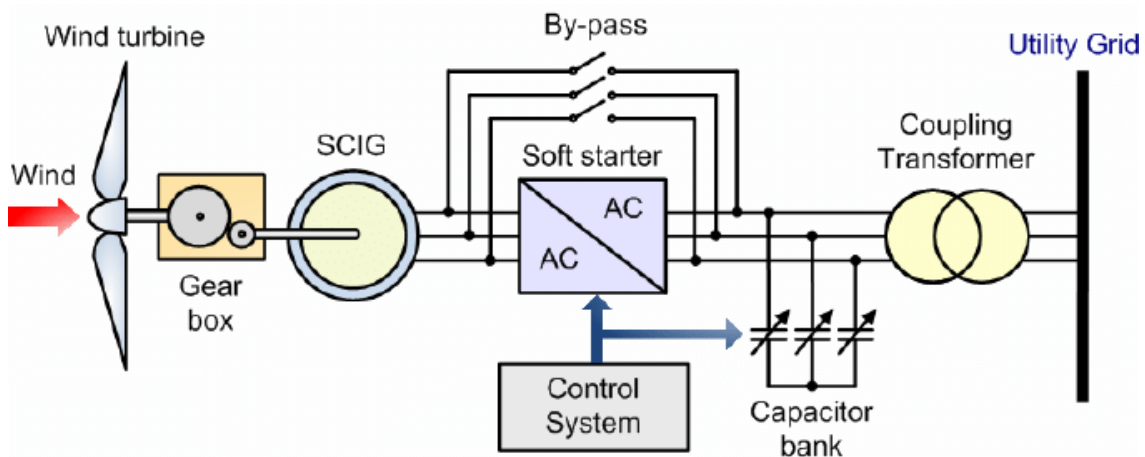
1.4. Διάκριση Α/Γ

1.4.1. Α/Γ σταθερής και μεταβλητής ταχύτητας

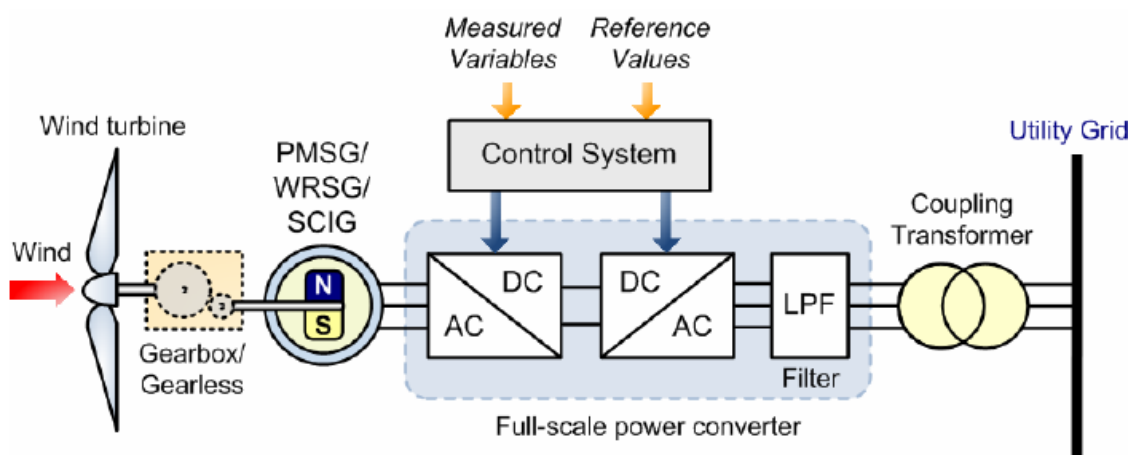
Οι Α/Γ χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Στις Α/Γ σταθερής ταχύτητας (fixed speed) και μεταβλητής ταχύτητας (variable speed). Όσο αφορά τις Α/Γ σταθερής ταχύτητας η μέγιστη απόδοση επιτυγχάνεται μόνο σε μια συγκεκριμένη ταχύτητα. Αυτό είναι ανεξάρτητο από τη ταχύτητα του ανέμου, η ταχύτητα του ρότορα της ανεμογεννήτριας είναι σταθερή και καθορίζεται από τον λόγο μετάδοσης (gear ratio), τη συχνότητα του δικτύου τροφοδοσίας και τον σχεδιασμό της γεννήτριας. Η συσκευή αποτελείται από μια επαγωγική γεννήτρια συνδεδεμένη απευθείας στο δίκτυο όπως φαίνεται στην [Εικόνα 1-6].

Οι Α/Γ σταθερής ταχύτητας έχουν αποδειχθεί ότι είναι απλές, αξιόπιστες, φθηνές και στιβαρές. Ακόμα, το κόστος των ηλεκτρικών εξαρτημάτων που χρησιμοποιούν είναι χαμηλό. Τα μειονεκτήματα είναι, ο περιορισμένος έλεγχος της ποιότητας ισχύος, ανεξέλεγκτη κατανάλωση άεργου ισχύος και μηχανικές καταπονήσεις λόγω της λειτουργίας της Α/Γ σε σταθερή ταχύτητα. Οι διακυμάνσεις στην ταχύτητα του ανέμου μεταδίδονται ως διακυμάνσεις στη μηχανική ροπή και στη συνέχεια προκαλούν διακυμάνσεις της ηλεκτρικής ισχύος στο δίκτυο.

Στις Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας η μέγιστη απόδοση επιτυγχάνεται σε ένα ευρύ φάσμα ταχυτήτων ανέμου. Ο σχεδιασμός του ηλεκτρικού συστήματος των Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας είναι σαφέστατα πιο περίπλοκος σε σύγκριση με τις Α/Γ σταθερής ταχύτητας. Η Α/Γ είναι εξοπλισμένη με επαγωγική - σύγχρονη γεννήτρια που συνδέεται με το δίκτυο μέσω ενός μετατροπέα ισχύος (power converter). Ο μετατροπέας ισχύος χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ταχύτητας της ηλεκτρικής γεννήτριας. Τα μειονεκτήματα των Α/Γ σταθερής ταχύτητας διορθώνονται στις Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας. Τα πλεονεκτήματα είναι η αυξημένη εκμετάλλευση ενεργείας, η βελτιωμένη ποιότητα ισχύος και η μειωμένη μηχανική καταπόνηση. Το υψηλό κόστος του εξοπλισμού, καθώς και η περιπλοκότητα του σχεδιασμού είναι τα μειονεκτήματα [5].



Εικόνα 1-6: A/G σταθερής ταχύτητας [6]



Εικόνα 1-7: A/G μεταβλητής ταχύτητας [7]

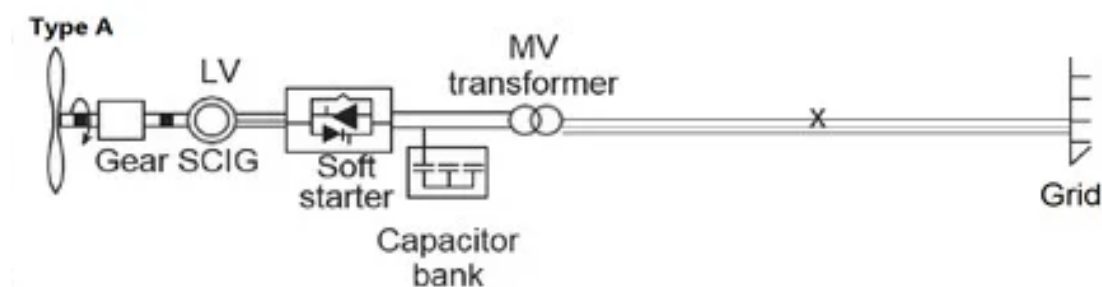
1.4.2. Τύποι A/G

Οι A/G ανάλογα με τον τύπο της γεννήτριας, εάν είναι σταθερών ή μεταβλητών στροφών και τον έλεγχο της, χωρίζονται σε τέσσερις κυρίες κατηγορίες. Οποιοσδήποτε τύπος τριφασικής γεννήτριας (3-phase generator) μπορεί να συνδεθεί με μια ανεμογεννήτρια. Οι γεννήτριες που χρησιμοποιούνται στις ανεμογεννήτριες είναι οι εξής:

1.4.2.1. Τύπος Α - A/G σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού

Ένας δρομέας με έλεγχο αεροδυναμικής ισχύος stall ή active stall συνδέεται μέσω κιβωτίου ταχυτήτων σε ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού (squirrel cage induction generator) [ΑΓΤΚ-SCIG], η οποία συνδέεται μέσω Μ/Σ στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Μια συστοιχία πυκνωτών χρησιμοποιείται για να παρέχει την αναγκαία αντιστάθμιση της άεργου ισχύος. Επίσης για την βελτίωση της συμβατότητας με το ηλεκτρικό δίκτυο χρησιμοποιείται εκκινητής ομαλής εκκίνησης (softstarter). Στην

[Εικόνα 1-8] απεικονίζεται αυτό το ευρέως χρησιμοποιημένο και πλέον συμβατικό τύπο Α/Γ [5].



Εικόνα 1-8: Α/Γ σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού και απ' ευθείας σύνδεση στο δίκτυο [8]

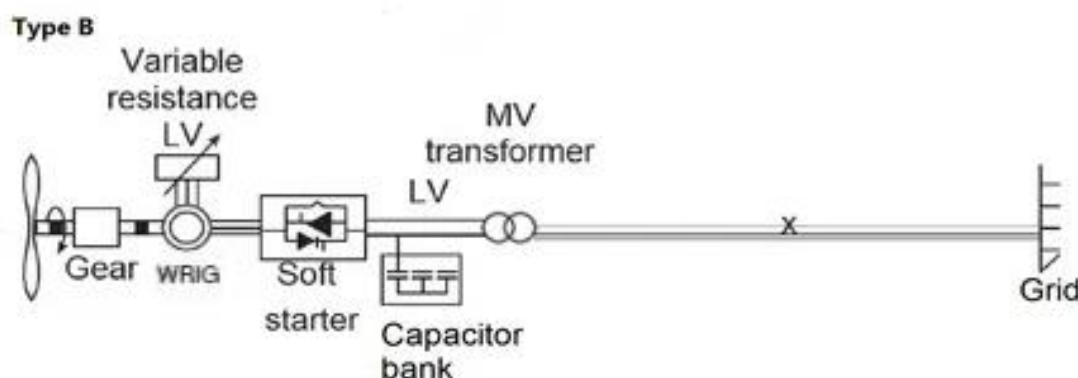
Η γεννήτρια λειτουργεί σε σταθερές στροφές και είναι απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς την ύπαρξη κάποιου μετατροπέα. Μικρές διακυμάνσεις στην ταχύτητα που ομαλοποιούν τόσο τη χαρακτηριστική καμπύλη της ροπής όσο και της ταχύτητας, επιτρέπονται λόγω της ολίσθησης. Η απόδοση της Α/Γ μεγιστοποιείται μόνο για συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου. Με σκοπό την αύξηση της απόδοσης, η γεννήτρια είναι συχνά εξοπλισμένη με δύο ομάδες τυλιγμάτων, ένα που χρησιμοποιείται για την λειτουργία της Α/Γ σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου (συνήθως 8 ζεύγη πόλων) και το άλλο για μέτριες και υψηλές στροφές (4 ή 6 ζεύγη πόλων).

Ο συγκεκριμένος τύπος Α/Γ ξεχωρίζει για την απλή του σχεδίαση, το χαμηλό του κόστος, την αξιοπιστία της λειτουργίας του και την ανθεκτικότητά του. Επίσης, ο έλεγχος του είναι ιδιαίτερα περιορισμένος. Λόγω του περιορισμένου ελέγχου, διακρίνονται διακυμάνσεις στην ηλεκτρική ισχύ που παρέχεται στο ηλεκτρικό δίκτυο, λόγω των διακυμάνσεων στην ταχύτητα του ανέμου. Οι μεταβολές αυτές υπάρχει περίπτωση να προκαλέσουν αντίστοιχες μεταβολές στην τάση στο σημείο σύνδεσης στο ηλεκτρικό δίκτυο, σε περίπτωση ασθενούς δικτύου. Εξαιτίας των διακυμάνσεων αυτών, αυξάνονται οι ηλεκτρικές απώλειες των γραμμών και οι μεταβολές της τάσης.

Ο αεροδυναμικός έλεγχος σε αυτού του τύπου τις Α/Γ επιτυγχάνεται με δυο τρόπους, την χρήση stall ή active stall ελέγχου. Σε Α/Γ όπου η ονομαστική ισχύ είναι μικρότερη ή περίπου ίση με 1MW συνηθίζεται να χρησιμοποιείται η στρατηγική stall, ενώ για Α/Γ μεγαλύτερης ισχύς, η active stall στρατηγική είναι προτιμότερη. Αυτό γίνεται, διότι τα υψηλά επίπεδα ισχύος απαιτούν ρύθμιση της γωνίας βήματος των πτερυγίων για την αποφυγή από εκτεταμένες καταπονήσεις των μηχανικών υποσυστημάτων που ολοκληρώνουν την Α/Γ.

Σύμφωνα με τον έλεγχο stall (ή passive stall), τα πτερύγια της Α/Γ είναι ασφαλισμένα στην πλήμνη του ρότορα υπό συγκεκριμένη γωνιά, ενώ είναι σχεδιασμένα με τέτοιο τρόπο ώστε όταν έχουμε αύξηση της ταχύτητας του ανέμου, το σχήμα των πτερυγίων σταδιακά ωθεί την υποχώρηση απέναντι στην τύρβη και τελικά στην απόρριψη της στήριξης (stall effect). Ενώ, στον έλεγχο τύπου active stall, ενσωματώνεται επιπλέον ένας μηχανισμός ρύθμισης της γωνίας βήματος των πτερυγίων [9].

1.4.2.2. Τύπος-B Α/Γ περιορισμένης λειτουργίας μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα μεταβλητής αντίστασης δρομέα

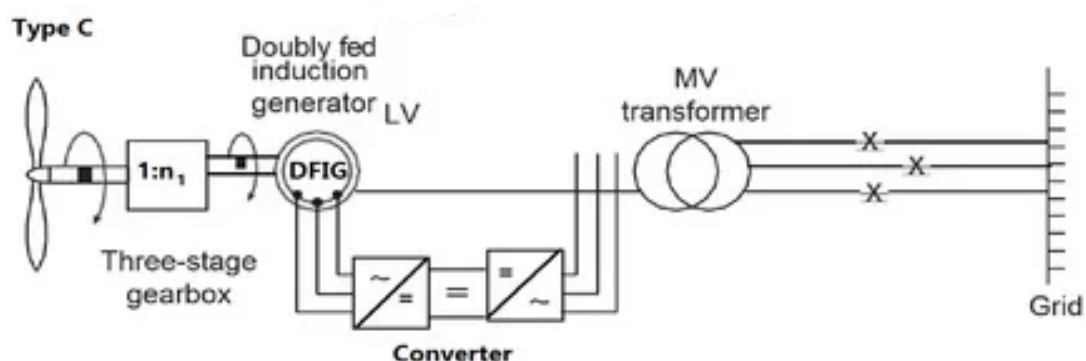


Εικόνα 1-9: Α/Γ μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα μεταβλητής αντίστασης δρομέα [8]

Ο Τύπος Β εμφανίστηκε στην αγορά στα μέσα της δεκαετίας του 1990 από τον Δανό κατασκευαστή Α/Γ Vestas Wind Systems με το όνομα OptiSlip. Η διαμόρφωση της Α/Γ Τύπου Β είναι παρόμοια με του Τύπου Α. Η διαφορά είναι ότι χρησιμοποιείται ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα (wound rotor induction generator) [ΑΓΤΔ-WRIG] με εξωτερική ρυθμιζόμενη αντίσταση δρομέα. Η ρυθμιζόμενη αντίσταση επιτρέπει τον περιορισμό της λειτουργίας μεταβλητών στροφών, σε εύρος 0-10% ανώτερο από αυτό της σύγχρονης ταχύτητας. Επομένως η ολίσθηση της γεννήτριας διαμορφώνει αυξημένες τιμές επιφέροντας έτσι αυξημένες ωμικές αντιστάσεις στις επιπλέον αντιστάσεις. Η ρύθμιση των εξωτερικών αντιστάσεων γίνεται με την χρήση μέσω ενός οπτικά ελεγχόμενου μετατροπέα τοποθετημένο στον δρομέα της γεννήτριας ή μέσω παθητικών στοιχείων. Η οπτική αυτή σύνδεση δεν χρειάζεται την εγκατάσταση δακτυλιδιών ολίσθησης (slip rings) που απαιτούν συντήρηση. Ακόμα οι απαιτήσεις σε άεργο ισχύ ικανοποιούνται από τη χρήση πυκνωτών αντιστάθμισης στον τερματικό ζυγό. Σε αντίθεση με τον Τύπο Α, στις Α/Γ Τύπου Β για τον περιορισμό της

αεροδυναμικής ισχύος για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής , εφαρμόζεται έλεγχος γωνίας βήματος των πτερυγίων [9].

1.4.2.3. Τύπος Γ – A/Γ μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα διπλής τροφοδότησης και σύστημα μετατροπών ισχύος συνδεδεμένων στο δρομέα



Εικόνα 1-10: A/Γ μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα διπλής τροφοδότησης και σύστημα μετατροπών ισχύος συνδεδεμένων στο δρομέα [8]

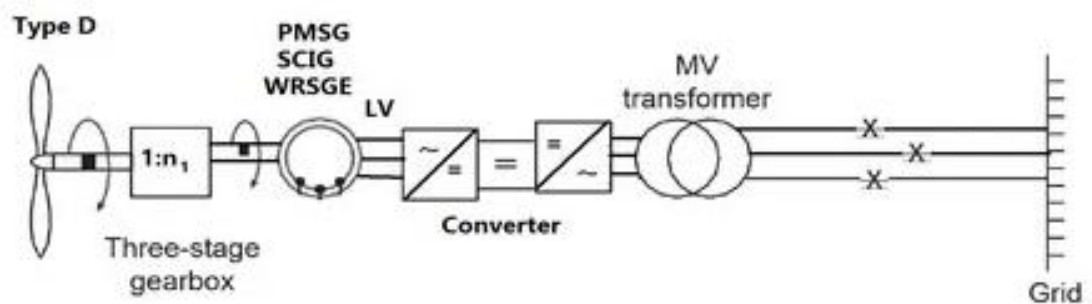
Στη διαμόρφωση αυτή χρησιμοποιείται A/Γ μεταβλητών στροφών όπου ο δρομέας με έλεγχο βήματος συνδέεται σε ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα διπλής τροφοδότησης (double-fed induction generator) [ΑΓΔΤ-DFIG] με μετατροπέα συχνότητας μερικής ισχύος. Ο μετατροπέας μεταφέρει μόνο την ισχύ του δρομέα προς το δίκτυο, και είναι σχεδιασμένος με ονομαστική ισχύ περίπου το 30% της ονομαστικής ισχύς της γεννήτριας και συνδέεται στο κύκλωμα του δρομέα, επιτρέποντας την αντιστάθμιση και έλεγχο της άεργου ισχύος καθώς και την ομαλή διασύνδεση στο δίκτυο. Το εύρος ταχύτητας της A/Γ είναι $\pm 30\%$ της σύγχρονης ταχύτητας, ενώ το περιορισμένο μέγεθος του μετατροπέα ισχύος καθιστά αυτόν τον τύπο εξαιρετικά ανταγωνιστικό και τον πλέον διαδεδομένο σήμερα στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας.

Το βασικό πλεονέκτημα της A/Γ Τύπου Γ σε σχέση με τις A/Γ Τύπου Α και Β είναι ότι η ενεργειακή απόδοση της A/Γ μεγιστοποιείται σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων, αυξάνοντας έτσι σημαντικά την ενεργειακή απόδοση της διάταξης. Η ροπή της γεννήτριας παραμένει σχεδόν σταθερή σε αντίθεση με τις A/Γ σταθερών στροφών όπως του Τύπου Α., με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε οι διακυμάνσεις στην ταχύτητα της γεννήτριας να απορροφάνε τις γρήγορες μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου. Αυτό το φαινόμενο πραγματοποιείται χάρις την λειτουργία του μετατροπέα ισχύος, ο οποίος μειώνει τις μηχανικές καταπονήσεις στα μέρη της A/Γ. Η λειτουργία της A/Γ σε χαμηλές στροφές της γεννήτριας καθώς και του δρομέα κατά τη διάρκεια χαμηλών

ταχυτήτων του ανέμου, μειώνει τον θόρυβο που δημιουργείται από τα στρεφόμενα πτερύγια, ο οποίος σε Α/Γ μεγέθους σαν τις σημερινές αποτελεί ιδιαίτερα σημαντική παράμετρο κατά τη σχεδίαση της Α/Γ.

Η [Εικόνα 1-9] απεικονίζει την διαμόρφωση της Α/Γ Τύπου Γ. Οι Α/Γ αυτού του τύπου είναι εξοπλισμένες με μια μεγάλη συλλογή λειτουργιών που επιτρέπει την συμβολή τους στη ρύθμιση των παραμέτρων του δικτύου, όπως απαιτείται και από τους διαχειριστές του ηλεκτρικού δικτύου, όσο αφορά με τον έλεγχο της ενεργού και της άεργου ισχύος, την γρήγορη απόκριση σε μεταβατικά και δυναμικά φαινόμενα της ηλεκτρικής ενέργειας, στα οποία συνδέονται, καθώς συμβάλουν στην εξασφάλιση των ΣΑΕ και βελτιώνουν την ποιότητα ισχύος (μειωμένες διακυμάνσεις στις τάσεις σύντομης και μακράς περιόδου, εξάλειψη αρμονικών χαμηλής τάξης και μειωμένα ρεύματα εκκίνησης και βραχυκύκλωσης). Παρόλα αυτά τα βασικά μειονεκτήματα αυτού του τύπου είναι, ότι χρειάζεται δακτυλίους σύνδεσης (slip rings) στο δρομέα της γεννήτριας για τη σύνδεση του με το μετατροπέα, η ανάγκη για σύστημα προστασίας κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στο δίκτυο και θέματα αξιοπιστίας καθώς και αυξημένου κόστους που προκύπτουν από την χρήση των μετατροπέων ισχύος [9].

1.4.2.4. Τύπος Δ – Α/Γ μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα ισχύος



Εικόνα 1-11: Α/Γ μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα ισχύος [8]

Στον τύπο αυτό, χρησιμοποιείται Α/Γ μεταβλητών στροφών, όπου ο δρομέας με έλεγχο γωνίας του βήματος των πτερυγίων συνδέεται μέσω κιβωτίου ταχυτήτων ή όχι σε σύγχρονη ή ασύγχρονη γεννήτρια και πλήρη μετατροπέα ισχύος που στην συνέχεια συνδέεται στο δίκτυο. Ο πλήρης μετατροπέας που είναι υπεύθυνος, τόσο για τον έλεγχο της άεργου ισχύος, όσο για την ομαλή διασύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο, επιτρέπει την Α/Γ να λειτουργεί σε μεταβλητές στροφές σε όλο το εύρος των ταχυτήτων.

Η διαμόρφωση αυτή διαφοροποιείται ανάλογα το είδος της γεννήτριας που χρησιμοποιείται. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα (wound rotor induction generator) [ΑΓΤΔ-WRIG] στον άξονα

μετάδοσης της κίνησης από το δρομέα στη γεννήτρια παρεμβάλλεται κιβώτιο ταχυτήτων. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σύγχρονη γεννήτρια μόνιμης διέγερσης (permanent magnet synchronous generator) [ΣΓΜΜ-PMSG], όπου το gear box μπορεί να παραλειφθεί εφόσον ο ρότορας της γεννήτριας περιστρέφεται σε χαμηλές στροφές όπως ακριβώς και ο δρομέας της Α/Γ.

Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του συγκεκριμένου τύπου Α/Γ είναι παρόμοια με του Τύπου Γ, που προαναφέρθηκε και σχετίζονται με τον μετατροπέα ισχύος. Η λειτουργία μεταβλητών στροφών στον Τύπο Δ είναι προφανώς εκτεταμένη σε σύγκριση με του Τύπου Γ, εφόσον δεν υπάρχει κανένα είδος σύνδεσης της γεννήτριας με τη συχνότητα του συστήματος. Επίσης, η προστασία της γεννήτριας από μεταβατικά φαινόμενα στο ηλεκτρικό δίκτυο στον τύπο αυτό είναι αυξημένη λόγω παρεμβολής του μετατροπέα ισχύος, σε αντίθεση με την Α/Γ του Τύπου Γ που είναι αναπόφευκτα εκτεθειμένη σε μεταβατικά φαινόμενα εξαιτίας της απευθείας σύνδεσης της με το ηλεκτρικό δίκτυο. Ακόμα, πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα του Τύπου Δ σε σύγκριση με τον Τύπο Γ είναι η αυξημένη απόδοση του, η αξιοπιστία που παρέχει και η συντήρηση του [9].

1.5. Μέθοδοι ρύθμισης ισχύος

- **Stall control (Passive)**

Πρόκειται για ένα ιδιαίτερα λιτό και φθηνό σύστημα που περιορίζει την παραγόμενη ισχύ στις μεγάλες ταχύτητες ανέμου, μέσω της αεροδυναμικής των πτερυγίων. Η γωνία κλίσης των πτερυγίων παραμένει σταθερή και μεταβάλλεται έτσι ώστε η τουρμπίνα να λειτουργεί στην ονομαστική της ισχύ για συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου [10].

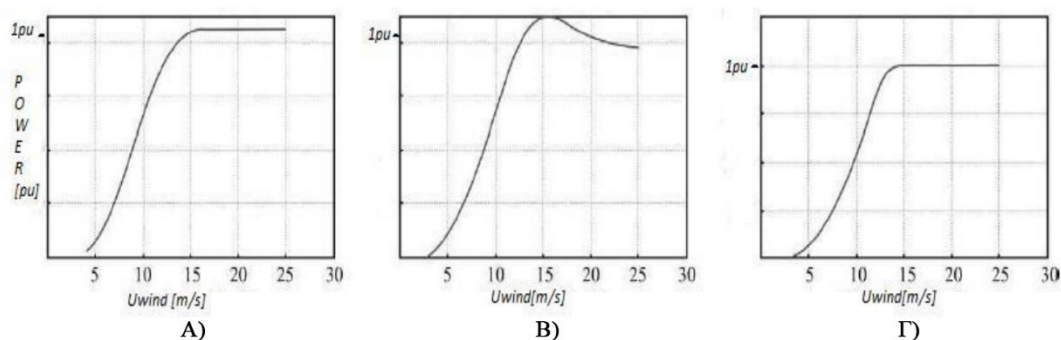
- **Pitch Control**

Η βασική λειτουργία του συστήματος αυτού είναι ο συνεχή έλεγχος των πτερυγίων, προσφέροντας έτσι καλύτερο έλεγχο ισχύος, εύκολες εκκινήσεις καθώς και άμεσο αεροδυναμικό φρενάρισμα σε περίπτωση κινδύνου. Ένα μέρος ή και ολόκληρο το πτερύγιο περιστρέφεται γύρω από τον άξονα του, μεταβάλλοντας έτσι τη γωνία πρόσπτωσης αρά και την παραγόμενη άντωση. Πλέον, αυτός ο τύπος ελέγχου βρίσκει συνεχείς χρήση από τις Α/Γ τελευταίας γενιάς. Ωστόσο τα μειονεκτήματά του, πέρα από το αυξημένο κόστος του σε σχέση με το stall control, είναι οι μεγάλες διακυμάνσεις της παραγόμενης ισχύος για μικρές αλλαγές της ταχύτητας του ανέμου σε υψηλές

ταχύτητες. Ο μηχανισμός δεν είναι αρκετά γρήγορος ώστε να αποφύγει εντελώς της μεταβολές στην ισχύος [10].

- **Active Stall control**

Το σύστημα αυτό εφαρμόζεται συχνά σε μεγάλες τουρμπίνες σταθερής ταχύτητας γιατί συνδυάζει τα βασικά χαρακτηριστικά του stall control, προσθέτοντας και μία επιπλέον λειτουργία που επιτρέπει το άμεσο αεροδυναμικό φρενάρισμα σε περίπτωση κινδύνου καθώς και εύκολες εκκινήσεις [10].



Εικόνα 1-12: Ενδεικτικές καμπύλες ισχύος Α) pitch control Β) passive stall control Γ) active stall control [11]

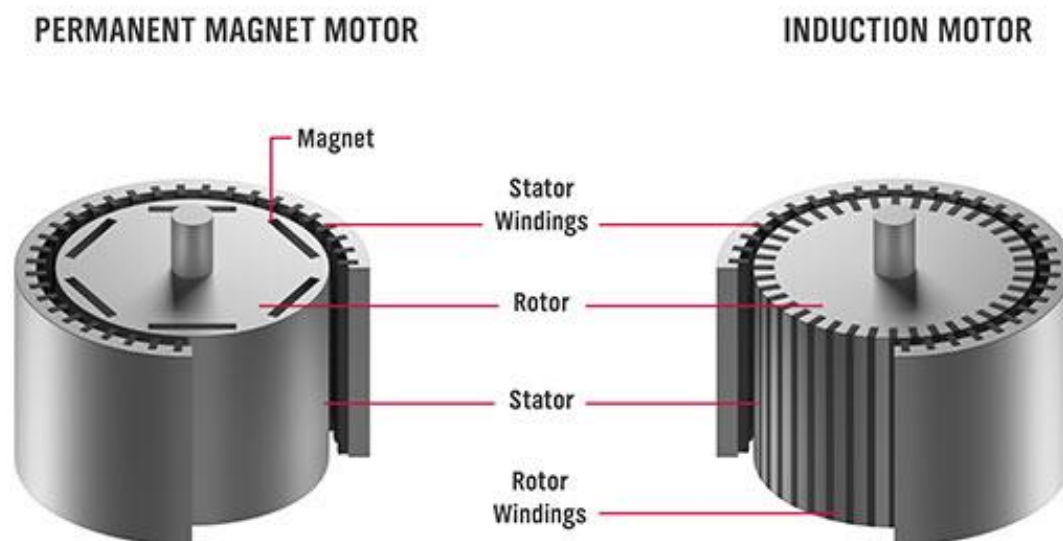
2. Ανάλυση της PMSG

2.1. Γενικά

Μέχρι και σήμερα, ο συχνότερα χρησιμοποιούμενος τύπος γεννήτριας είναι η ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα διπλής τροφοδότησης (DFIG), ωστόσο η χρήση σύγχρονων γεννητριών μόνιμου μαγνήτη (PMSG) αποτελεί νέα τάση στο χώρο των ανεμογεννητριών και έχει αυξήσει κατά πολύ το μερίδιο της στην αγορά τα τελευταία χρόνια. Οι ασύγχρονες γεννήτριες τυλιγμένου δρομέα διπλής τροφοδότης συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις μεγάλης ισχύος, ενώ οι σύγχρονες γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη χρησιμοποιούνται συχνότερα σε ανεμογεννήτριες μικρότερης κλίμακας.

Οι επαγωγικές γεννήτριες όπως η ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα διπλής τροφοδοσίας παρουσιάζουν απλότητα στο μηχανικό κομμάτι, είναι στιβαρές και έχουν ιδιαίτερα χαμηλό κόστος, πράγμα που οφείλεται στην ευρεία παραγωγή τους. Μεγάλο τους μειονέκτημα όπως προαναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο είναι ότι καταναλώνουν άεργο ισχύ (η άεργος ισχύς μπορεί να παρέχεται από το δίκτυο ή από συστοιχίες πυκνωτών ή από ένα κατάλληλο σύστημα ηλεκτρονικών ισχύος). Επιπλέον, οι επαγωγικές γεννήτριες δεν είναι αυτοδιεγερόμενες, δηλαδή πρέπει να τροφοδοτούνται με ένα ρεύμα μαγνήτισης για την δημιουργία του στρεφόμενου

μαγνητικού πεδίου στο διάκενο, το οποίο αυτό ρεύμα προέρχεται από το ηλεκτρικό δίκτυο [12].



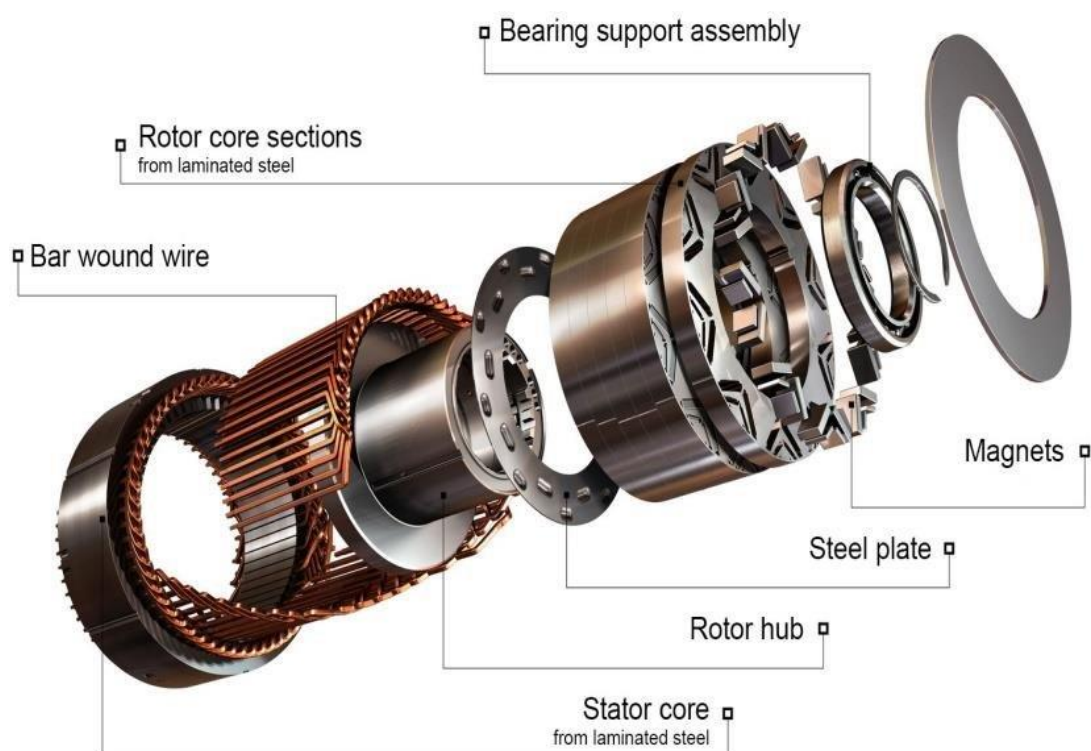
Εικόνα 2-1: Α/Γ μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα ισχύος [11]

Στις σύγχρονες γεννήτριες ο δρομέας τους περιστρέφεται σύγχρονα με την ταχύτητα του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου, από το γεγονός αυτό πήραν και το όνομα τους. Οι σύγχρονες γεννήτριες είναι ιδιαίτερα πολύπλοκες μηχανικά και ακριβές, ειδικότερα σε σχέση με αντίστοιχες επαγωγικές γεννήτριες παρόμοιου μεγέθους. Το απαραίτητο μαγνητικό πεδίο για τη λειτουργία της μηχανής μπορεί να δημιουργηθεί μέσω συμβατικού τυλίγματος διέγερσης στο δρομέα στην περίπτωση γεννήτριας WRSG ή με τη χρήση μόνιμων μαγνητών στην περίπτωση γεννήτριας PMSG. Οι σύγχρονες γεννήτριες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων, εάν είναι εξοπλισμένες με κατάλληλο αριθμό πόλων, όπως προαναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Συμπεραίνουμε, λοιπόν ότι η σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη, είναι εφοδιασμένη με μόνιμους μαγνήτες στο δρομέα (όπως φαίνεται και στην **[Εικόνα 2-1]**) οι οποίοι δημιουργούν το απαιτούμενο μαγνητικό πεδίο, χρίζοντας την αυτοδιεγείρομενη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην χρειάζεται επιπλέον παροχή ηλεκτρικού ρεύματος για τη διέγερση της μηχανής οπότε αποφεύγουμε τις απώλειες από το τυλίγμα διέγερσης και κατά συνέπεια ο βαθμός απόδοσής της είναι υψηλότερος από μία αντίστοιχη επαγωγική γεννήτρια. Επίσης, η απουσία του τυλίγματος διέγερσης υποδηλώνει την απουσία ψηκτρών και συλλέκτη με αποτέλεσμα την αυξημένη αξιοπιστία και την ελαχιστοποίηση των απαιτήσεων για συντήρηση. Ακόμα, με τη

χρήση μαγνητών επιτυγχάνεται υψηλή πυκνότητα ροής με άμεση συνέπεια μικρότερο βάρος και όγκος για μια μηχανή συγκεκριμένης ισχύος.

Παρ' όλα αυτά, ο συγκεκριμένος τύπος γεννήτριας έχει μειονεκτήματα τα οποία λειτουργούν σαν ανασταλτικός παράγοντας, εμποδίζοντας την διείσδυση του σε μεγαλύτερο βαθμό στην αγορά και πρέπει να αναφερθούν. Κυριότερος παράγοντας είναι ότι τα υλικά από τα οποία κατασκευάζονται οι μόνιμοι μαγνήτες είναι ιδιαίτερα ακριβά, καθώς προέρχονται από σπάνια υλικά. Επίσης η διαδικασία επεξεργασίας τους είναι αρκετά δαπανηρή λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους. Ακόμα, οι μόνιμοι μαγνητικές είναι ευαίσθητοι σε υψηλές θερμοκρασίες πράγμα το οποίο καθιστά απαραίτητη την χρήση συστήματος ψύξης. Πρόσθετο κόστος για μία Α/Γ μόνιμου μαγνήτη αποτελεί η απαραίτητη χρήση πλήρους μετατροπέα ισχύος για την προσαρμογή της τάσης και της συχνότητας της γεννήτριας στην τάση και στη συχνότητα του δικτύου, το πλεονέκτημα βέβαια στην περίπτωση αυτή είναι η δυνατότητα παραγωγής ενέργειας για κάθε ταχύτητα ανέμου. Αρνητικό είναι επίσης το γεγονός ότι η σύγχρονη φύση των σύγχρονων γεννητριών με μόνιμο μαγνήτη μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα κατά την εκκίνηση της μηχανής, το συγχρονισμό και τη ρύθμιση της τάσης, ενώ προκαλεί και ανώμαλη συμπεριφορά σε περίπτωση που η ταχύτητα του ανέμου δεν είναι σταθερή [12].



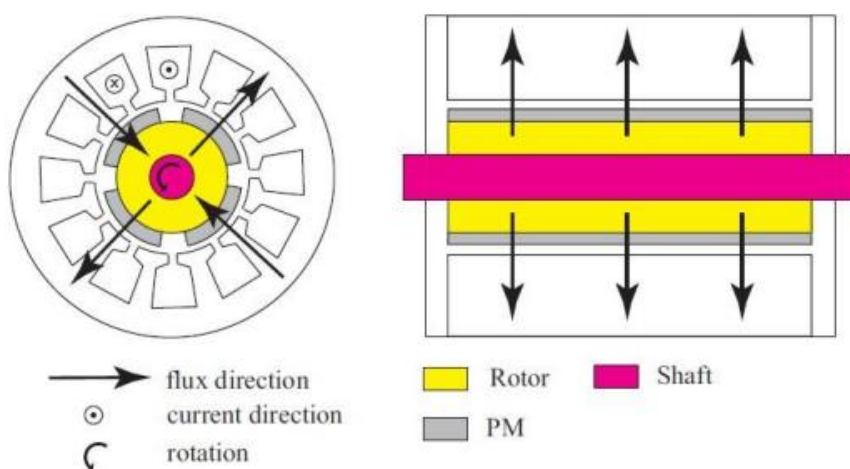
Εικόνα 2-2: Δομή σύγχρονης γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη [14]

2.2. Κατηγοριοποίηση Σύγχρονων μηχανών μόνιμου μαγνήτη

Οι σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη κατηγοριοποιούνται σε δυο στάδια, αρχικά σύμφωνα με την κατανομή του μαγνητικού τους πεδίου στο εσωτερικό τους και σε δεύτερο στάδιο είτε με βάση τη μορφή της επαγόμενης τάσης στο στάτη είτε με βάση την τοποθέτηση των μαγνητών στο δρομέα.

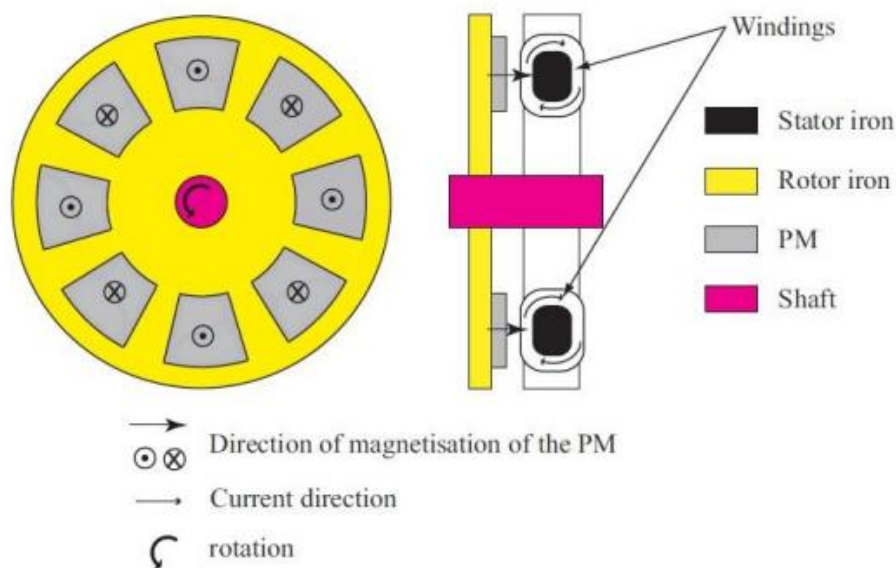
Επομένως με βάση την κατανομή του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό της μηχανής, οι μηχανές κατατάσσονται σε, μηχανές ακτινικής ροής, αξονικής ροής και σε εγκάρσιας ροής.

Ο πιο συνηθισμένος τύπος μηχανής μόνιμου μαγνήτη είναι η σύγχρονη μηχανή μόνιμου μαγνήτη ακτινικής ροής (Radial Flux Permanent Magnet, RFPM) και χρησιμοποιείται στις περισσότερες εφαρμογές άμεσης οδήγησης (direct driven), δηλαδή χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων. Σε σύγκριση με τους υπολοίπους τύπους μηχανών μόνιμου μαγνήτη, διαθέτει ευκολότερη κατασκευή και συγχρόνως είναι και η πιο φθηνή. Επιπλέον ένα μεγάλο πλεονέκτημα αυτού του τύπου μηχανής είναι το γεγονός ότι λόγω της δομής της η θερμότητα που αναπτύσσεται απομακρύνεται εύκολα και σχετικά γρήγορα από το στάτη. Παρ' όλα αυτά, οι μηχανές αυτές είναι διαθέτουν περισσότερο όγκο σε σχέση με τις μηχανές αξονικής και εγκάρσιας ροής πράγμα το οποίο επηρεάζει σημαντικά τόσο τους όρους του ενεργού βάρους της μηχανής όσο και στο μήκος του άξονά της. Στην **[Εικόνα 2-3]** φαίνονται δύο τομές μιας μηχανής ακτινικής ροής όπου απεικονίζονται οι κατευθύνσεις της ροής του μαγνητικού πεδίου και του ρεύματος. Όπως παρατηρούμε η μαγνητική ροή ρέει ακτινικά διαμέσου του διακένου μεταξύ του στάτη και του δρομέα της μηχανής, ενώ το ρεύμα κυκλοφορεί κατά μήκος της αξονικής κατεύθυνσης της μηχανής **[12]**.



Εικόνα 2-3: Τομές RFPM μηχανής και κατεύθυνση ρεύματος και μαγνητικής ροής **[15]**

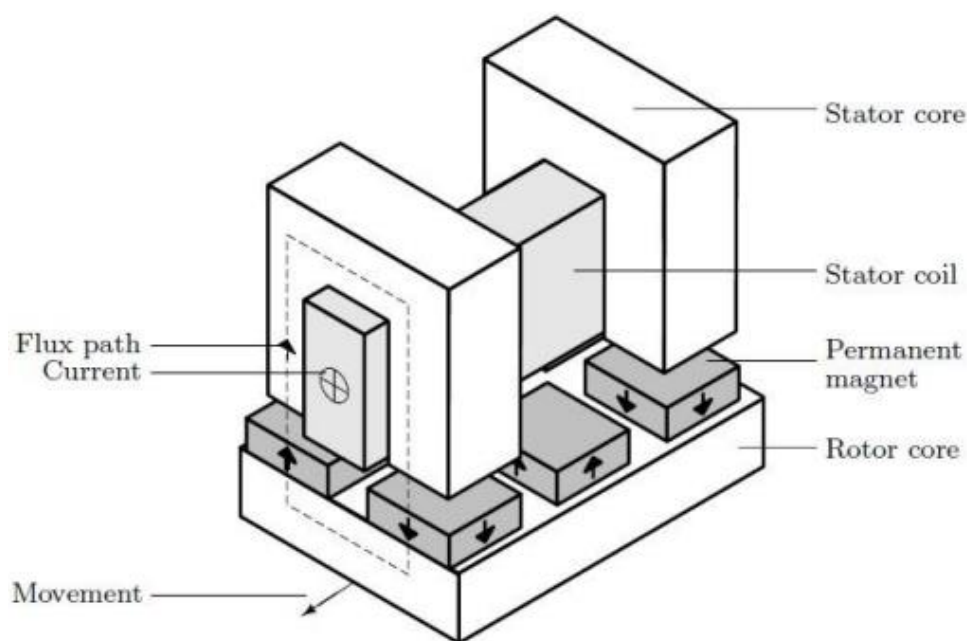
Βασικά χαρακτηριστικά της μηχανή μόνιμου μαγνήτη αξονικής ροής (Axial Flux Permanent Magnet, AFPM) είναι η μεγάλη διάμετρος της και το σχετικά μικρό μήκος της, ενώ η μαγνητική ροή που παράγει έχει κατεύθυνση κατά μήκος του άξονα της μηχανής. Συγκρίνοντας την με τις μηχανές ακτινικής ροής, οι μηχανές αξονικής ροής παρουσιάζουν κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως το ότι εμφανίζουν υψηλότερο λόγο ισχύος προς το συνολικό βάρος της μηχανής με αποτέλεσμα τη χρησιμοποίηση λιγότερου υλικού για την κατασκευή της μηχανής. Επίσης, λόγω της δομής τις μια μηχανή αξονικής ροής παρουσιάζει επίπεδο και διευκολύνει την ρύθμιση του διάκενου μεταξύ του στάτη και του δρομέα. Επιπλέον, συμπεριλαμβάνεται στα πλεονεκτήματα της το γεγονός της εμφάνισης χαμηλότερων επιπέδων θορύβου και δονήσεων συγκριτικά με τις μηχανές ακτινικής ροής. Ως μειονέκτημα μπορεί να θεωρηθεί ότι λόγω της μεγαλύτερης διαμέτρου της μηχανής γίνεται απαραίτητη και η χρήση περισσότερων μόνιμων μαγνητών. Στην **[Εικόνα 2-4]** απεικονίζονται δύο τομές της μηχανής αξονικής ροής όπου, όπως και πριν στην περίπτωση της μηχανής ακτινικής ροής, φαίνονται οι κατευθύνσεις της μαγνητικής ροής και του ρεύματος. Στην προκειμένη περίπτωση παρατηρούμε ότι η μαγνητική ροή ρέει κατά μήκος του άξονα της μηχανής, ενώ το ρεύμα ρέει κατά την ακτινική κατεύθυνση της μηχανής **[12]**.



Εικόνα 2-4: Τομές AFPM μηχανής με κατευθύνσεις μαγνητικής ροής και ρεύματος **[15]**

Στις μηχανές εγκάρσιας ροής (Transverse Flux Permanent Magnet, TFPM) η κατεύθυνση της μαγνητικής ροής είναι κάθετη στην κατεύθυνση της περιστροφής του δρομέα. Οι μηχανές αυτές είναι κατάλληλες για εφαρμογές χαμηλών ταχυτήτων και άμεσης οδήγησης, παρότι η χρήση τους είναι ακόμα αρκετά περιορισμένη. Η

βασικότερη διαφορά αυτού του τύπου μηχανής με της δύο προηγούμενες είναι ότι σε αυτήν επιτρέπεται η αύξηση του χώρου των τυλιγμάτων χωρίς να μειώνεται ο διαθέσιμος χώρος για την ανάπτυξη του κύριου μαγνητικού πεδίου. Επιπρόσθετα, τα τυλίγματα χαλκού της μηχανής εγκάρσιας ροής είναι πιο απλά από τα τυλίγματα των άλλων δύο τύπων μηχανών, οδηγώντας έτσι και σε λιγότερες απώλειες χαλκού και επιπλέον η ενεργός μάζα για μηχανή συγκεκριμένης ισχύος, είναι αισθητά μικρότερη από αντίστοιχη μηχανή άλλου τύπου. Τα βασικότερα μειονεκτήματα της μηχανής εγκάρσιας ροής είναι ο χαμηλός συντελεστής ισχύος που παρουσιάζει για υψηλές ροπές και η ιδιαίτερα περίπλοκη δομή της η οποία διαμορφώνει αυξημένο κόστος κατασκευής. Η τοπολογία ενός μέρους μιας μηχανής μόνιμου μαγνήτη εγκάρσιας ροής φαίνεται στην **[Εικόνα 2-5]**, όπου παρατηρούμε ότι η διεύθυνση της μαγνητικής ροής είναι κάθετη στην κίνηση του δρομέα, ενώ το ρεύμα ρέει κυκλικά κατά μήκος των τυλιγμάτων του στάτη **[12]**.



Εικόνα 2-5: Τοπολογία TFPM μηχανής και κατευθύνσεις μαγνητικής ροής και ρεύματος **[15]**

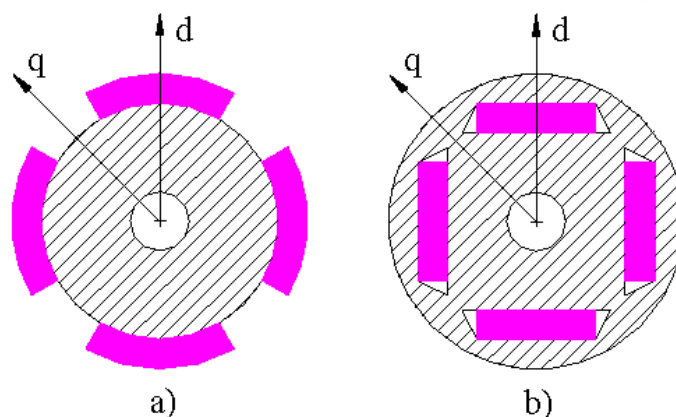
Βασιζόμενη στην μορφή της επαγόμενης τάσης στον στάτη έχουμε δύο κατηγορίες σύγχρονων μηχανών, τις τραπεζοειδείς μηχανές μόνιμου μαγνήτη (trapezoidal PMSM) και τις ημιτονοειδείς σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη (sinusoidal PMSM). Στις τραπεζοειδείς μηχανές, η τάση επαγωγής του στάτη είναι τραπεζοειδούς μορφής και τα φασικά ρεύματα του στάτη έχουν τετραγωνική μορφή. Αντιστοίχως στην ημιτονοειδή, τόσο η επαγωγική τάση όσο και τα φασικά ρεύματα στο στάτη έχουν ημιτονοειδή μορφή.

Ανάλογα με την θέση των μόνιμων μαγνητών στο δρομέα της μηχανής παρατηρούμε δυο μοντέλα. Στο πρώτο μοντέλο οι μαγνήτες τοποθετούνται επιφανειακά στο δρομέα (Surface-mounted magnets) και στο δεύτερο στο εσωτερικό του (Buried magnets).

Στην περίπτωση των επιφανειακών μαγνητών (Surface-mounted magnets) οι μόνιμοι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι στην εξωτερική επιφάνεια του δρομέα όπως φαίνεται στην **[Εικόνα 2-6]**. Αυτές οι δομές σχετικά εύκολη κατασκευή και δόμηση. Σε περίπτωση που οι μόνιμοι μαγνήτες είναι εγκατεστημένη στην επιφάνεια του δρομέα, η περιστροφική ταχύτητα της μηχανής θα πρέπει να περιοριστεί έτσι ώστε να μην διασπαστεί η συγκόλληση λόγω των φυγόκεντρων δυνάμεων που αναπτύσσονται. Η ακαμψία του δρομέα είναι δυνατόν να ενισχυθεί με την προσθήκη ενός ενισχυτικού ιμάντα γύρω από τον δρομέα, ο ιμάντας μπορεί να είναι κατασκευασμένος από ανθρακονήματα ή από ίνες γυαλιού, διαφορετικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί κύλινδρος από ανοξείδωτο χάλυβα. Οι μαγνήτες έχουν μαγνητική διαπερατότητα σχεδόν ίση με την μονάδα, για αυτό και θεωρούνται σαν αέρας για τα μαγνητικά κυκλώματα, έτσι παρόλο που είναι τοποθετημένοι στην επιφάνεια του δρομέα το διάκενο της μηχανής όπου αναπτύσσονται τα πεδία παραμένει μεγάλο. Επίσης, στις μηχανές αυτού του είδους συνηθίζεται να μην υπάρχει ανομοιογένεια στο μαγνητικό πεδίο και οι επαγωγές των κάθετων αξόνων d και q να είναι ίσες.

Στην περίπτωση των εσωτερικών μαγνητών (Buried magnets) οι μαγνήτες μόνιμης διέγερσης βρίσκονται στο εσωτερικό του δρομέα όπως μπορούμε να δούμε και στην **[Εικόνα 2-6]**. Αντίθετα με την παραπάνω περίπτωση, η κατασκευή του δρομέα μαζί με τους μόνιμους μαγνήτες είναι ιδιαίτερα ποιο σύνθετη. Τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου έναντι των επιφανειακών μαγνητών είναι ότι δεν υπάρχουν αυστηροί περιορισμοί της περιστροφικής ταχύτητας της μηχανής υπό το φόβο αποκόλλησης των μαγνητών ούτε είναι απαραίτητη η χρήση ενισχυτικού ιμάντα. Ακόμα, ο κίνδυνος να απομαγνητιστούν οι μόνιμοι μαγνήτες είναι μειωμένος καθώς περιβάλλονται από το σιδηρομαγνητικό υλικό του δρομέα και βρίσκονται σε απόσταση από το διάκενο. Επίσης, το υλικό από το οποίο περιβάλλονται οι μαγνήτες τους παρέχει μια σχετική προστασία έναντι της φθοράς και της διάβρωσης. Παρόλα αυτά, οι μηχανές αυτού του τύπου εμφανίζουν υψηλά ποσοστά διαρροής της μαγνητικής ροής στα άκρα των μαγνητών το οποίο οφείλετε στο υλικό του δρομέα που τους περιβάλλει. Τα ποσοστά αυτά μπορούν να μειωθούν με διάφορους τρόπους όμως δεν είναι δυνατόν να φτάσει στο επίπεδο των επιφανειακών μαγνητών. Ένα επιπλέον αρνητικό στοιχείο αυτής της

κατηγορίας είναι ότι υπάρχει μεγάλη δυσχέρεια στην ανακύκλωση των υλικών καθώς, οι μαγνήτες πολύ δύσκολα μπορούν να αποσπαστούν από το δρομέα [12].



Εικόνα 2-6: α) δρομέας και άξονες q και d με επιφανειακούς μαγνήτες, β) δρομέας και άξονες q και d με εσωτερικούς μαγνήτες [16]

2.3. Υλικά μόνιμων μαγνητών

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει οι μόνιμοι μαγνήτες χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές μηχανές για την δημιουργία του μαγνητικού πεδίου διεγέρσεως. Ένας καλός μόνιμος μαγνήτης χαρακτηρίζεται από την ικανότητά του να παράγει ισχυρό μαγνητικό πεδίο με την μικρότερη δυνατή μάζα και να αντιστέκεται σε εξωτερικές συνθήκες που προκαλούν την απομαγνήτιση του. Οι κυριότερες κατηγορίες μαγνητικών υλικών που εφαρμόζονται σε ηλεκτρικές μηχανές είναι τα κράματα AlNiCo (κράματα σπάνιων γαιών) και οι κεραμικοί μαγνήτες (ή σκληροί φερρίτες).

Το κράμα AlNiCo αποτελείται τα στοιχεία αργίλιο (Al), νικέλιο (Ni) και κοβάλτιο (Co) και αναπτύχθηκε από τον T.Mishima το 1931. Οι εξαιρετικές ιδιότητές του, όπως η αντοχή του σε υψηλές θερμοκρασίες και ο μεγάλος παραμένων μαγνητισμός, ήταν πολύ μπροστά για την εποχή του και βοήθησαν στη γρήγορη διάδοσή του στην αγορά και στη βιομηχανία και την εφαρμογή του αντί των προγενέστερων μαγνητών χάλυβα.

Μέσω της εξέλιξης της επιστήμης των υλικών μια καινούργια οικογένεια μόνιμων μαγνητών έκανε την εμφάνισή του τη δεκαετία του '50, γνωστή ως φερρίτες οι οποίοι και αντικατέστησαν τους AlNiCo μαγνήτες. Τα βασικότερα στοιχεία που τους χαρακτηρίζουν είναι οι καλές ιδιότητες του υλικού τους που τους οδηγεί να εμφανίζουν μεγαλύτερη αντοχή σε εξωτερικά πεδία απομαγνήτισης και το εξαιρετικά χαμηλό κόστος παραγωγής τους, πράγμα που τους κάνει μέχρι και σήμερα έναν από τους πιο εμπορικά ανταγωνιστικούς μόνιμους μαγνήτες.

Οι μόνιμοι μαγνήτες από σπάνιες γαίες αποτελούν την πιο επαναστατική εξέλιξη στο χώρο των μόνιμων μαγνητών. Ξεκίνησε τα τέλη της δεκαετίας του '60, με την

ανακάλυψη των κραμάτων Σαμάριου-Κοβάλτιου (Sm-Co). Οι μαγνήτες Sm-Co έχουν άριστη θερμική σταθερότητα και εμφανίζουν υψηλή αντίστασή στις επιρροές απομαγνήτισης, καθιστώντας τους ως μια από τις καλύτερες επιλογές για τις πιο απαιτητικές εφαρμογές. Παρ' όλα αυτά το Sm-Co αποτελείται από μεγάλο ποσοστό κοβάλτιου το οποίο είναι ιδιαίτερα ακριβό, καθιστώντας έτσι το Sm-Co ως το ακριβότερο είδος μόνιμων μαγνητών. Το ιδιαίτερα υψηλό κόστος των μαγνητών Sm-Co, είχε ως αποτέλεσμα το 1984 την διαμόρφωση ενός νέου μόνιμου μαγνήτη σπάνιων γαιών, του μόνιμου μαγνήτη Νεοδυμίου-Σιδήρου-Βορίου (Nd-Fe-B). Συγκρίνοντας τους μόνιμους μαγνήτες Sm-Co, παρατηρούνται όμοιες μαγνητικές ιδιότητες με τους μόνιμους μαγνήτες Nd-Fe-B διατηρώντας το πλεονέκτημα του πολύ χαμηλότερου κόστους. Τα άριστα μαγνητικά χαρακτηριστικά καθώς και η εξέλιξη των μόνιμων μαγνητών Nd-Fe-B ξεκίνησαν μια νέα τάση προς τη χρήση μηχανών μόνιμων μαγνητών σε εφαρμογές μεγάλης βιομηχανικής κλίμακας. Ως αποτέλεσμα, τα τελευταία χρόνια η χρήση μόνιμων μαγνητών Nd-Fe-B έχει επικρατήσει και σε σύγχρονες γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη που εφαρμόζονται σε ανεμογεννήτριες αιολικών συστημάτων, όπως η περίπτωση την οποία εξετάζουμε [12].

3. Μοντέλο A/Γ στο Simulink

3.1. Wind turbine block

Το Wind turbine block μοντελοποιεί την μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανικό έργο. Η τιμή της ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας μπορεί να δοθεί από τον παρακάτω τύπο :

$$P_m = 0.5 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad [\text{Εξ. 1}]$$

Όπου ρ είναι η πυκνότητα του αέρα, A είναι το εμβαδόν που καλύπτουν τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας κατά την περιστροφή τους, V η ταχύτητα του ανέμου και $C_p(\lambda, \beta)$ ο συντελεστής ισχύος όπου εκφράζει την σχέση μεταξύ της κλίσης των πτερυγίων (β), ως προς την κατεύθυνση του ανέμου με τον λόγο της ταχύτητας της αιχμής των πτερυγίων και της ταχύτητας του ανέμου (λ).

Ο λόγος λ υπολογίζεται από την σχέση :

$$\lambda = (\omega_t \cdot R) / v \quad [\text{Εξ. 2}]$$

Ο συντελεστής ισχύος υπολογίζεται με την χρήση του τύπου :

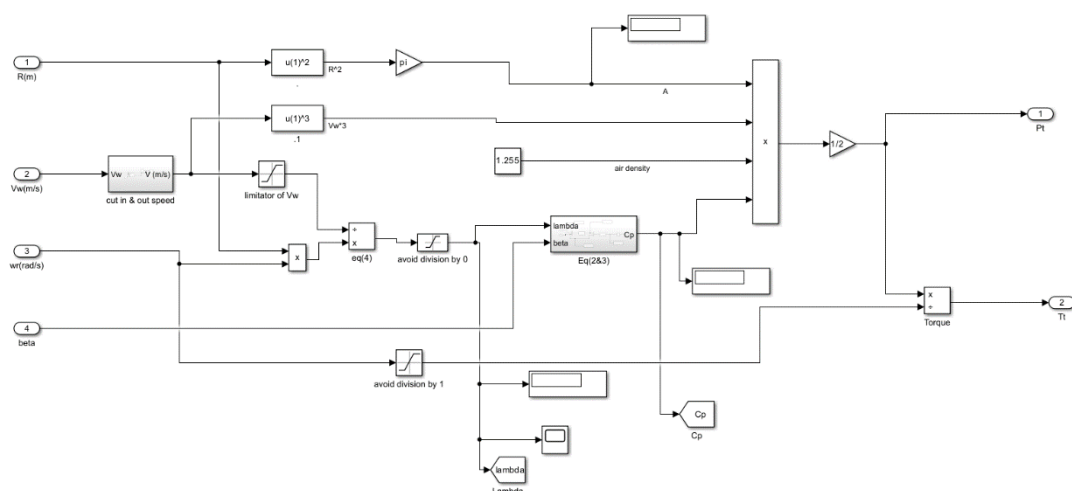
$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 (c_2 \cdot (1/\lambda_i - c_3 \cdot \beta - c_4 \cdot \beta^5 - c_6) \cdot e^{(-c_7 \cdot 1/\lambda_i)}) \quad [\text{Εξ. 3}]$$

Όπου C_1-7 είναι σταθερές της ανεμογεννήτριας και με το λ_i να υπολογίζεται από την εξίσωση :

$$1 / \lambda_i = 1 / (\lambda + 0.08 \cdot \beta) - 0.001 / (1 + \beta^3) \quad [\text{Εξ. 4}]$$

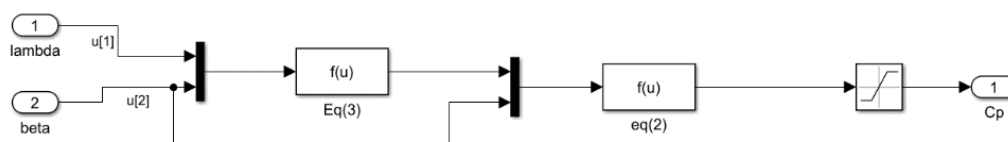
Έπειτα γνωρίζοντας την τιμή της γωνιακής ταχύτητας του ρότορα και την παραγόμενη μηχανική ενέργεια του συστήματος είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η τιμή της ροπής T_m που προσδίδεται στον άξονα από την σχέση :

$$T_m = P_m / \omega \quad [\text{Εξ. 5}][17]$$



Εικόνα 3-1: Wind Turbine Block

Στην παραπάνω εικόνα έχουν αποτυπωθεί οι προαναφερόμενη τύποι με τη μορφή μπλοκ με την προσθήκη ελεγκτών για την αποφυγή διαίρεσης με το 0. Επίσης στην [Εικόνα 1-12] αποτυπώνεται το υποσύστημα υπολογισμού του C_p με τις δυο εξισώσεις του λ_i και C_p αντίστοιχα να υπολογίζονται με τη χρήση δυο function block όπου επιτρέπουν τον υπολογισμό σύνθετων εξισώσεων [17].



Εικόνα 3-2: C_p subsystem

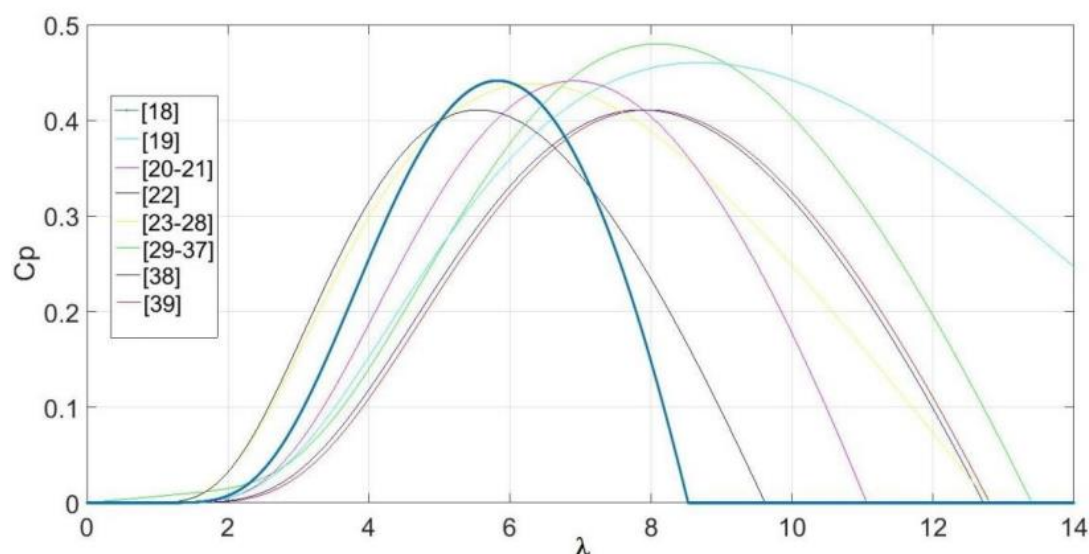
Υπολογισμός σταθερών C_p :

Ο συντελεστής ισχύος C_p υπολογίζει το ποσοστό της παραγόμενης ισχύς όπου μπορεί να εκμεταλλευτεί η ανεμογεννήτρια από τον άνεμο που δέχεται στα πτερύγια της, με τη μέγιστη θεωρητική ικανότητα εκμετάλλευσης σύμφωνα με τη θεωρία του Betz να είναι κοντά στο 60% της συνολικής δύναμης του ανέμου, καθορίζοντας τη σταθερά Betz όπου $C_{pBetz}=0.593$.

Κατά την λειτουργία της, θέλουμε το C_p της ανεμογεννήτρια να επιτυγχάνει την μέγιστη δυνατή απόδοση της ανεμογεννήτριας ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου, και έπειτα να διαμορφώνει την τιμή της για τη διατήρηση της μέγιστης απόδοσης σύμφωνα με της διακυμάνσεις του ανέμου. Για τον υπολογισμό του C_p έχουν διαμορφωθεί διάφορα μοντέλα με σκοπό τη καλύτερη αποτύπωση του. Στο συγκεκριμένο σύστημα έχει γίνει χρήση του εκθετικού μοντέλου λόγω της απλότητας, της ευρείας χρήσης του και της αξιοπιστίας που προσφέρει.

Η διαφοράς μεταξύ των καμπυλών του C_p σχετίζονται με τις τιμές των συντελεστών που λαμβάνονται υπόψη στη συνάρτηση που ορίζεται για το C_p , οι οποίες λαμβάνονται με στατιστική ανάλυση των δεδομένων από μια πραγματική τουρμπίνα και πεπερασμένα στοιχεία προσομοιώσεων. Κάθε καμπύλη επομένως αντιπροσωπεύει ανεμογεννήτριες όπου διαμορφώνουν τη μέγιστη απόδοση τους για διαφορετική τιμή του λ . Επομένως γνωρίζοντας το λ για το οποίο η ανεμογεννήτρια μας πετυχαίνει τη μέγιστη απόδοση κατά την λειτουργία της, συμπεραίνουμε ότι η καμπύλη {19} και οι

σταθερές C1-7 είναι οι σταθερές για την λειτουργία της υπό μελέτη ανεμογεννήτριας με τιμές $c1=0.44$, $c2=125$, $c3=0.4$, $c4=0$, $c5=0$, $c6=6.94$ και $c7=17.05$ [18].



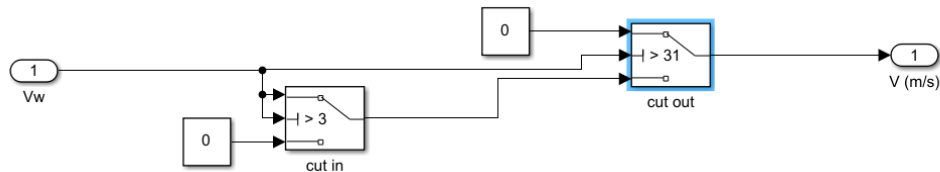
Εικόνα 3-3: Cp-λ χαρακτηριστικές [18]

Επίσης από την παραπάνω **[Εικόνα 3-3]** παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή του Cp δεν υπερβαίνει την τιμή 0,5 για καμία από τις καμπύλες. Με το Cp να μπορεί να πάρει τιμές μέχρι την τιμή 0,48, υποδηλώνοντας ότι η μέγιστη δυνατή ισχύς που γίνεται να αντλήσουμε από τον άνεμο είναι περίπου 48% της συνολικής του, λόγω διαφόρων αεροδυναμικών απωλειών συνυφασμένα με την κατασκευή, όπως για παράδειγμα ο αριθμός και το σχήμα των λεπίδων, το βάρος και ο βαθμός ακαμψίας [18].

Cut in και cut off speed:

Σε πολύ χαμηλές ταχύτητες ανέμου, δεν ασκείται επαρκής ροπή από τον άνεμο στα πτερύγια της ανεμογεννήτριας για να κινηθούν, καθώς η ταχύτητα αυξάνεται, τα πτερύγια θα αρχίσουν να περιστρέφονται και η γεννήτρια θα αρχίσει να παράγει ενέργεια. Η ταχύτητα για την οποία ο στρόβιλος αρχίζει να περιστρέφεται και να παράγει ενέργεια ονομάζεται ταχύτητα αποκοπής (CUT IN SPEED) και είναι συνήθως κοντά στα τρία μέτρα ανά δευτερόλεπτο (m/s).

Αντίστοιχα με την ταχύτητα του ανέμου να αυξάνεται η λειτουργία θα διακοπεί όταν η τιμή της φτάσει την ταχύτητα αποκοπής (CUT OUT SPEED) όπου κυμαίνεται κοντά στα τριανταένα μέτρα ανά δευτερόλεπτο (m/s), για να μην υπερβεί την ισχύς για την οποία είναι ικανή η ηλεκτρική γεννήτρια [17].

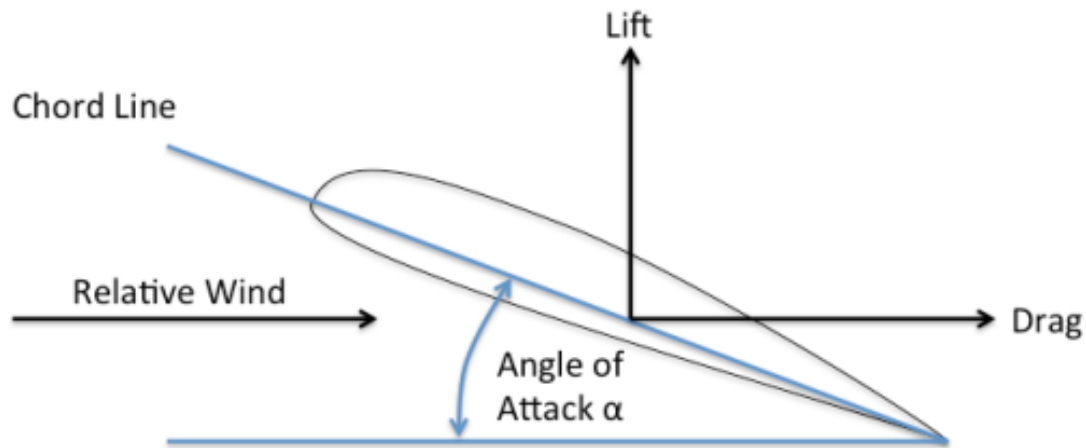


Εικόνα 3-4: Cut in & cut off subsystem

Το σύστημα αυτό θα εισαχθεί σαν υποσύστημα στο μπλοκ λειτουργώντας σαν φρένο καθώς θα διακόπτει την λειτουργία του αν η ταχύτητα υπερβεί την τιμή της cut out παραμέτρου και αντίστοιχα δεν θα επανέλθει σε λειτουργία αν δεν υπερβεί την τιμή της cut in [17].

3.2. Pitch Angle Controller Block

Το σύστημα αεροδυναμικού ελέγχου συντελεί σημαντικό ρόλο στη ρύθμιση των μηχανικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στο σύστημα. Η αρχή λειτουργίας του ελεγκτή κλίσης βασίζεται στην αλλαγή της γωνίας των πτερυγίων για τις ταχύτητες του ανέμου που υπερβαίνουν την μέγιστη ταχύτητα της γεννήτριας. Ο ελεγκτής με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου θα μειώσει την γωνία προσβολής των πτερυγίων μειώνοντας έτσι την διαφορά πίεσης μπροστά και πίσω από τα πτερύγια έχοντας σαν αποτέλεσμα τη μείωση των ανυψωτικών δυνάμεων [17].

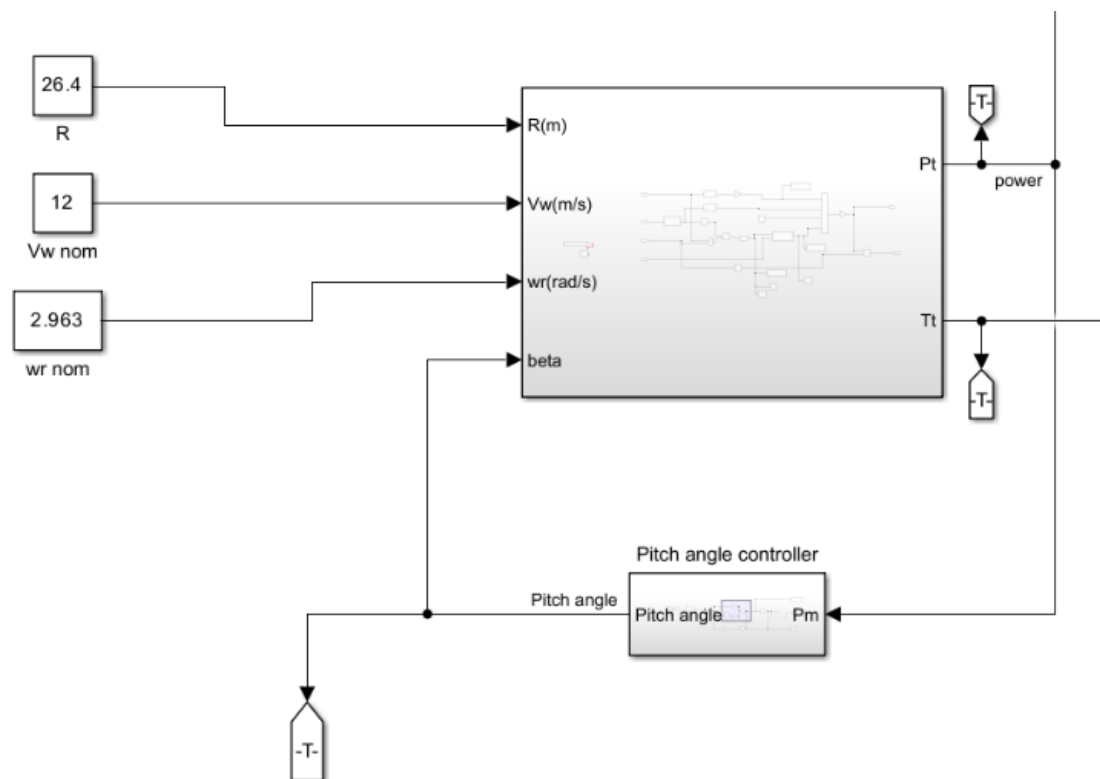


Εικόνα 3-5: Ανύψωση πτερύγιου σε σχέση με τον άνεμο [19]

Επομένως στην περίπτωση όπου αυξηθεί υπερβολικά η παραγόμενη ισχύς του συστήματος ο ελεγκτής στέλνει σήμα στον μηχανισμό περιστροφής των πτερυγίων στρέφοντας τα μακριά από τον άνεμο μέχρι η ταχύτητα του να επανέλθει στα επιθυμητά επίπεδα ξεκινώντας ξανά την λειτουργία παραγωγής. Ο μηχανισμός περιστροφής των πτερυγίων βρίσκεται στις βάσεις τους και χρησιμοποιεί συνήθως υδραυλικά ή ηλεκτρικά μοτέρ βήματος. Τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου ελέγχου

είναι ο καλός έλεγχος ισχύος και η διακοπή έκτακτης ανάγκης. Ο μέγιστος ρυθμός μεταβολής της γωνίας κλίσης είναι της τάξης των 3 έως 10 μοίρες/δευτερόλεπτο.

Το μοντέλο του ελεγκτή στο σύστημα παρατηρούμε ότι έχει ως είσοδο την ισχύς του συστήματος και ως έξοδο την κλίση των πτερυγίων [17].

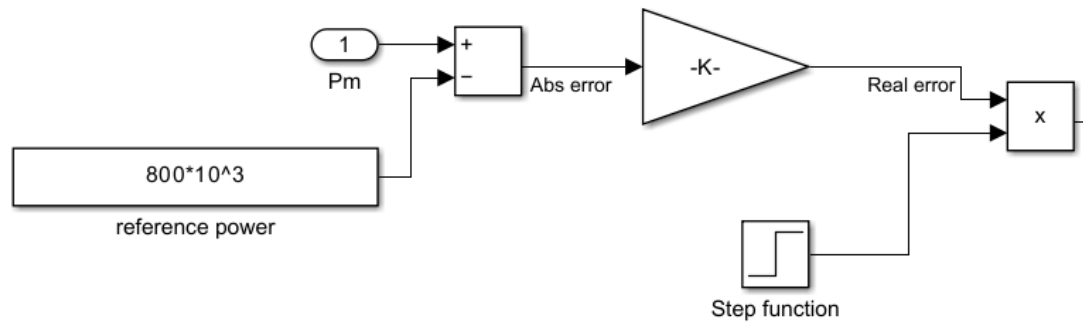


Εικόνα 3-6: Pitch Angle Controller Block

Ο Pitch controller απαρτίζεται από έναν ελεγκτή PI, μια βηματική συνάρτηση, έναν περιορισμό για τις τιμές του β και ένα anti-windup system, και η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στον υπολογισμό σφάλμα σήματος. Αρχικά ο ελεγκτής δέχεται την παραγόμενη ισχύς (P_m) του συστήματος και την ονομαστική ισχύς του (P_{ref}) από μια ορισμένη σταθερά, έπειτα υπολογίζεται η διαφορά τους με ένα add block με αποτέλεσμα να προκύπτει η διαφορά μεταξύ τους ή το απόλυτο σφάλμα σε μονάδες Watt. Το απόλυτο σφάλμα διαιρείται με το P_{ref} με αποτέλεσμα να προκύπτει το σχετικό σφάλμα το οποίο θα τροφοδοτηθεί στον ελεγκτή PI [17].

$$Error_{abs} = P_m - P_{ref} \text{ [Εξ. 6]}$$

$$Error_{rel} = (P_m - P_{ref})/P_{ref} \text{ [Εξ. 7]}$$



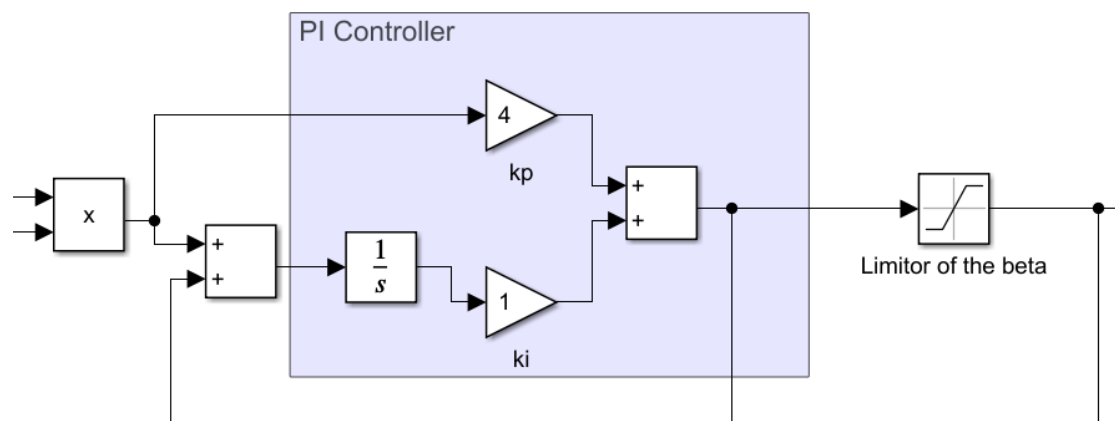
Εικόνα 3-7: Pitch Angle Controller Block (1)

Ο ελεγκτής δεν θα ξεκινήσει να λειτουργεί με την εκκίνηση της προσομοίωσης, για αυτόν το λόγο το μπλοκ της βηματικής συνάρτησης έχει τοποθετηθεί με τελική τιμή τη μονάδα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να πολλαπλασιάζει το σχετικό σφάλμα μέχρι το βήμα της συνάρτησης να έχει την τιμή 1. Με αυτήν την λειτουργία δίνεται χρόνος στο σύστημα για να σταθεροποιηθεί πριν την εκκίνηση του ελεγκτή και την αλλοίωση της τιμής ισχύος.

Έπειτα ο ελεγκτής PI περιέχει δυο παραμέτρους το K_p (proportional parameter) και το K_i (integral parameter). Οι παράμετροι αυτοί προσαρμόζονται σύμφωνα με το σύστημα που διαθέτουμε και η εξίσωση του PI διαμορφώνεται ως εξής :

$$\text{PI controller} = K_p + K_i * (1/s) \text{ [Εξ. 8]}$$

Το K_p πολλαπλασιάζει το σήμα σφάλματος που δίνεται. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή που έχουμε τόσο ταχύτερη είναι η απόκριση του συστήματος αλλά και μικρότερο το σφάλμα του στην στατική του κατάσταση. Αντίστοιχα η παράμετρος K_i πολλαπλασιάζει το εισαγόμενο σφάλμα, εισάγοντας έναν ολοκληρωτή, ο οποίος όπως υποδηλώνει και το όνομα του ολοκληρώνει το σφάλμα. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της μεταβλητής K_i τόσο μικρότερο είναι το σφάλμα σε στατική κατάσταση. [17].

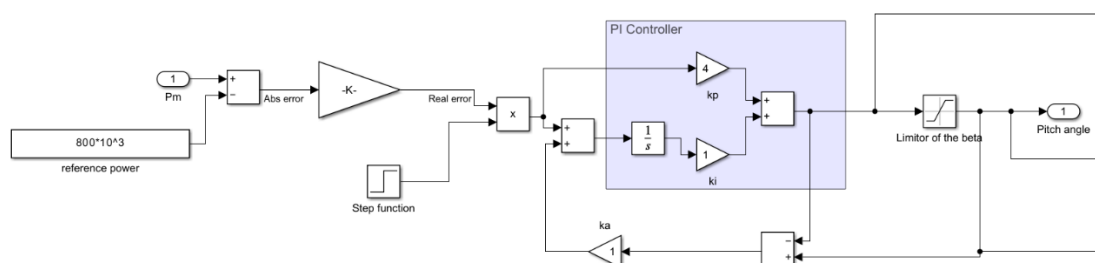


Εικόνα 3-8: Pitch Angle Controller Block (2)

Για την οριστικοποίηση των τιμών της $K_p=4$ και $K_i=1$ χρησιμοποιείται η μέθοδος δοκιμής και σφάλματος λόγω της ευκολίας χρήσης της μέσω του προγράμματος. Αρχικά οι τιμές τους θα είναι μηδενικές. Για τον υπολογισμό του K_p θα πρέπει να αρχίσουμε να αυξάνουμε τη τιμή του αναλογικού μέρους μέχρι το σύστημα να αρχίσει να ταλαντώνεται και επομένως να μην μπορεί να φτάσει σε μια ακριβή τιμή. Στην συνέχεια για τον υπολογισμό του K_i γίνεται χρήση της ίδιας μεθόδου, η διαδικασία σταματάει για την τιμή του K_i όπου τα αποτελέσματα του συστήματος είναι ρεαλιστικά με βάση τους περιορισμούς του.

Τέλος εφαρμόζεται στο σύστημα με την χρήση πολλαπλασιαστών και αθροιστών ένα anti-windup loop για την αποφυγή υπερφόρτωση του ολοκληρωτή. Χωρίς την εφαρμογή του με την εκκίνηση της προσομοίωσης το απόλυτο σφάλμα θα συσσωρεύεται για της περιόδους που το σύστημα θα βρισκόταν σε αδράνεια, με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν προβλήματα στον ελεγκτή και τον υπολογισμό λάθος αποτελεσμάτων. Επίσης με την εφαρμογή του αποφεύγεται και η ανάγκη αναμονής του ελεγκτή καθώς στην περίοδο λειτουργίας του δεν θα είναι σε θέση να ενεργήσει αμέσως, καθώς θα πρέπει να εξαλείψει με επαναλήψεις το σφάλμα που έχει συσσωρευτεί.

Ο σκοπός λειτουργίας του Pitch angle controller είναι η προστασία της γεννήτριας από υπερφόρτωση για της υψηλές ταχύτητες του ανέμου. Η βέλτιστη γωνία για την ταχύτητα του ανέμου κάτω από την ονομαστική τιμή είναι περίπου μηδέν και στη συνέχεια αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Η λειτουργία του επομένως έχει σημαντικό αντίκτυπο στον συντελεστή απόδοσης και στην τιμή της ροπής του στροβίλου καθώς με την αλλαγή της κλίσης των πτερυγίων μεταβάλλεται ο συντελεστής ισχύος του συστήματος [17].

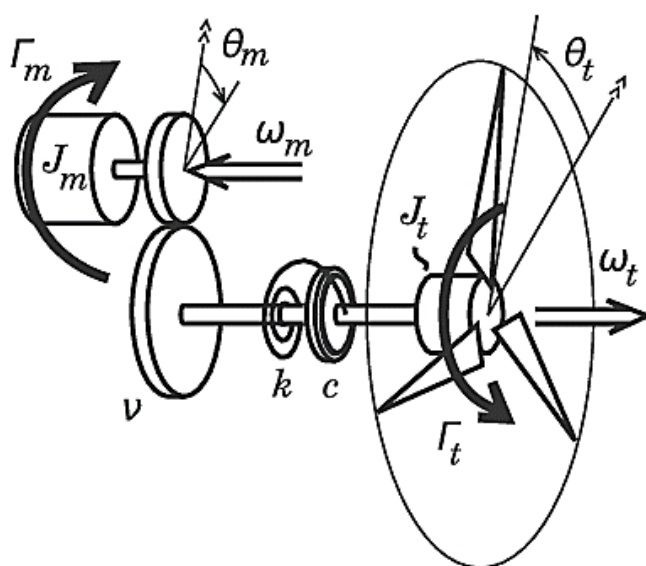


Εικόνα 3-9: Pitch Angle Controller Block (3)

3.3. Two mass drivetrain

Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται περισσότερο σε προσομοιώσεις για την μοντελοποίηση ανεμογεννητριών είναι το μοντέλο μιας μάζας και το μοντέλο δυο μαζών. Οι παράμετροι του μοντέλου των δυο μαζών επικεντρώνονται σε ολόκληρο το μηχανικό σύστημα που συνδέεται με τον άξονα χαμηλής ταχύτητας. Τα στοιχεία που διακρίνονται στην [Εικόνα 3-10] είναι το κιβώτιο ταχυτήτων και η γεννήτρια. Στα στοιχεία αυτά θα μπορούσαμε να ερμηνεύσουμε ότι η μάζα στα αριστερά του σχήματος αντιπροσωπεύει τα πτερύγια και την πλήμνη, ενώ η μάζα στα δεξιά αντιπροσωπεύει τον άξονα υψηλής ταχύτητας, το κιβώτιο ταχυτήτων και τον ρότορα της γεννήτριας.

Στο σύστημα ασκούνται ισχυρές δυνάμεις από τον άνεμο που εισάγουν σημαντικές επιδράσεις στο σύστημα μετάδοσης κίνησης όπου μπορούν να υπολογισθούν με την εισαγωγή διαφορικών εξισώσεων ή με την χρήση προσεγγιστικών παραμέτρων για την προσομοίωση τους. Η δεύτερη μέθοδος χρησιμοποιείται συχνότερα καθώς έχει λιγότερο φόρτο πράξεων. Ένας τρόπος προσέγγισης είναι να θεωρήσουμε το μηχανικό σύστημα ως μάζες σε σειρά συνδεδεμένες μέσω συνδέσμων λαμβάνοντας υπόψιν την δυσκαμψία και τις αποσβέσεις τους [17].

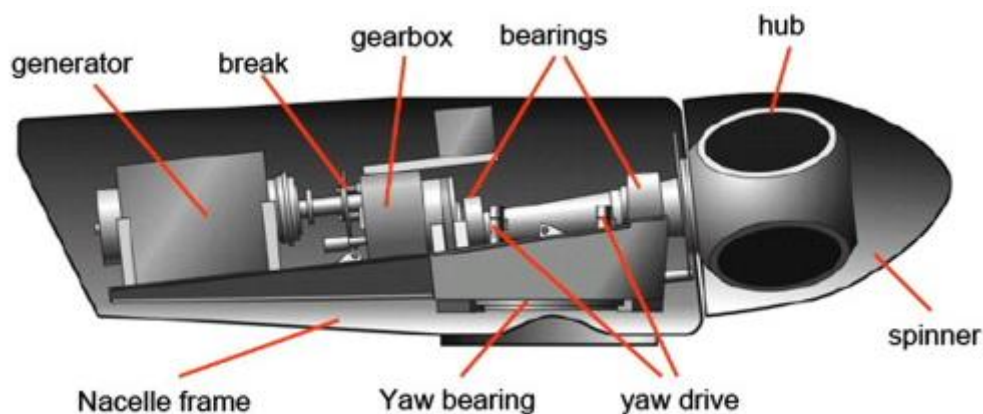


Εικόνα 3-10: Two Mass Drivetrain [20]

Στην εικόνα μπορούμε να δούμε το τμήμα των πτερυγίων και του άξονα χαμηλών στροφών που φαίνεται στην δεξιά πλευρά και το τμήμα του άξονα υψηλής ταχύτητας όπου διακρίνεται στην αριστερή πλευρά. Κάθε μια από τις μάζες έχει τη δική της σταθερά αδράνεια J_t και J_m και τη δική της γωνιακή ταχύτητα ω_t και ω_m . Επιπλέον, η δυσκαμψία k και η απόσβεση c αντιπροσωπεύονται στη ζεύξη και ο λόγος μετάδοσης αντιπροσωπεύεται από την παράμετρο ν .

3.4. One Mass Drivetrain

Το σύστημα μετάδοσης κίνησης (Drive train) είναι ένα απαραίτητο εξάρτημα για την ανεμογεννήτρια, καθώς είναι υπεύθυνο για τη μετατροπή όλης της περιστροφικής ενέργειας των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας σε μηχανική ενέργεια. Τα συστήματα αυτά διαφέρουν ανάλογα με την εφαρμογή τους καθώς υπάρχουν διαφορετικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Για να σχεδιαστεί ένα λεπτομερές μοντέλο μετάδοσης κίνησης για μια ανεμογεννήτρια θα πρέπει να ληφθούν υπόψη μεταβλητές όπως η ελαστικότητα και η ευκαμψία των πτερυγίων καθώς και η επίδραση άλλων μηχανικών μέσων όπως η περιστροφή των αξόνων, με αποτέλεσμα να καθιστά την σχεδίαση τέτοιου μοντέλου εξαιρετικά πολύπλοκη. Η απλοποίησή του γίνεται συνήθως με την αντικατάσταση του κλασικού μοντέλου από διάφορα επιμέρους μοντέλα που συνδέονται μεταξύ τους. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η αποσύνθεση του στα κύρια δομικά συστατικά του και η αναπαράσταση του καθενός με το δικό του μοντέλο. Το Drive train αποτελείται από διάφορα στοιχεία, με το καθένα να έχει ένα συγκεκριμένο έργο, και με την συνδυασμένη τους λειτουργία να πρέπει να είναι αρμονική, καθώς αν ένα από αυτά παρουσιάσει βλάβη, τα υπόλοιπα εξαρτήματα δεν θα μπορέσουν να συνεχίσουν να λειτουργούν, καθιστώντας κάθε ένα στοιχείο εξίσου σημαντικό. Το drive train επιτρέπει την μεταφορά φορτίου ροπής από ένα αρχικό φορτίο με διαφορετική γωνιακή ταχύτητα [17].

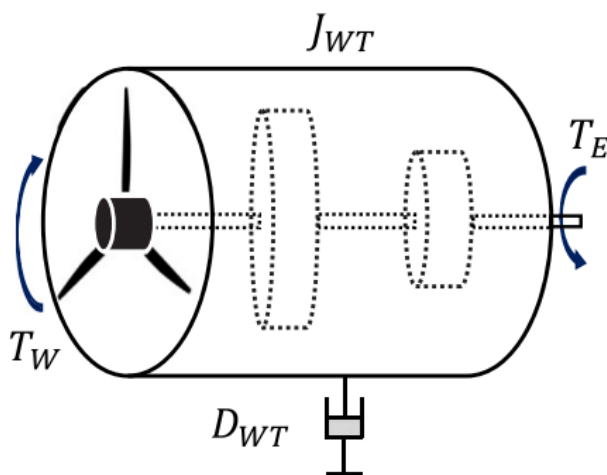


Εικόνα 3-11: Τα επιμέρη στοιχεία της νασέλας [21]

Υπάρχουν διάφορα μοντέλα συστημάτων μετάδοσης κίνησης τα οποία διαφέρουν μεταξύ τους σε μεγάλο βαθμό ως προς την πολυπλοκότητά τους. Κάποια από αυτά τα μοντέλα είναι το σύστημα μετάδοσης κίνησης έξι μαζών, το σύστημα δύο μαζών, το σύστημα τριών μαζών και το σύστημα μιας μάζας, όπου κάθε μάζα αντιπροσωπεύει ένα διαφορετικό εξάρτημα του συστήματος. Όσο περισσότερες μάζες διαθέτει τόσο πιο περίπλοκο και αναλυτικό γίνεται το μοντέλο που χρησιμοποιείται, καθώς το κάθε

εξάρτημα διαθέτει λειτουργικά μέρη με της δικές του σταθερές και αποσβέσεις. Παρότι οι διαφορές πολυπλοκότητας είναι πολύ μεγάλες μεταξύ των μοντέλων τα αποτελέσματα διαφέρουν ελάχιστα. Επομένως, η χρήση λεπτομερών μοντέλων δεν είναι πάντα απαραίτητη στην μοντελοποίηση διότι απλούστερα μοντέλα μας παρέχουν αποτελέσματα πολύ παρόμοια με την πραγματικότητα.

Στο σύστημα το μοντέλο μετάδοσης κίνησης που χρησιμοποιείται είναι μιας μάζας (one mass drive train) ,καθώς είναι το απλούστερο μοντέλο καθώς αντιπροσωπεύει όλα τα εξαρτήματα του μηχανισμού μετάδοσης κίνησης με μια μάζα διαμορφώνοντας μόνο μια σταθερά αδράνειας για όλα τα εξαρτήματα. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για λόγους χρονικής απόδοσης και ακρίβειας, για εκτενέστερη μελέτη των μηχανικών καταπονήσεων πρέπει να ληφθούν υπόψη όλα τα εξαρτήματα ξεχωριστά, επομένως σε τέτοιες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται μοντέλα δυο ή και περισσότερων μαζών [17].

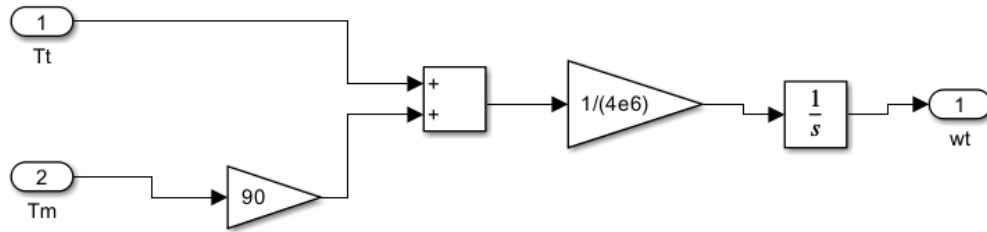


Εικόνα 3-12: One mass drivetrain [22]

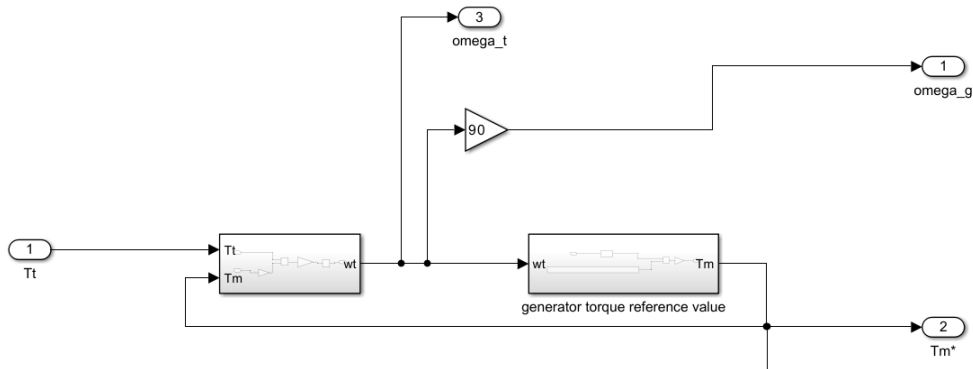
Η μαθηματική εξίσωση που εκφράζει το σύστημα μιας μάζας είναι :

$$\omega_t = (v/J_g)*T_m + (1/J_g)*T_t = (v/J_g*T_m) + (1/j_g)*T_t \text{ [Εξ. 9]}$$

Με το ω_t να είναι η γωνιακή ταχύτητα της γεννήτριας, $v=90$ να αντιπροσωπεύει την αναλογία μετασχηματισμού του κιβώτιου ταχυτήτων, $J_g=4*10^6$ να είναι η σταθερά αδράνειας για το σύστημα μιας μάζας. Στην παρακάτω εικόνα παρατηρούμε το μοντέλο αναπαράστασης της εξίσωσης για το πρόγραμμα. Έχει γίνει προσθήκη ενός ολοκληρωτή που του δίνεται μια τιμή εκκίνησης ίση με την ονομαστική γωνιακή ταχύτητα του ρότορα ώστε να μην καταρρεύσει το σύστημα κατά την προσομοίωση [17].



Εικόνα 3-13: One Mass Drivetrain (1)



Εικόνα 3-14: One Mass Drivetrain (2)

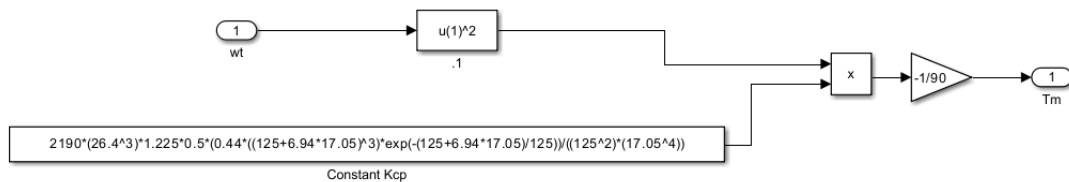
Η ροπή T_m είναι η ροπή αναφοράς της γεννήτριας και τροφοδοτείται στο drivetrain από τον ελεγκτή MPPT (Maximum Power Point) όπου με τη μέθοδο λειτουργίας του επιτρέπει την γεννήτρια να λειτουργεί στη μέγιστη δυνατή ισχύς χωρίς μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου [17].

Ο βασικός τρόπος ελέγχου γίνεται με την χρήση της εξίσωσης :

$$T_m = (1/v) * KCp * \omega_t^2 \text{ [Εξ. 10]}$$

Με το KCp να υπολογίζεται από την σχέση :

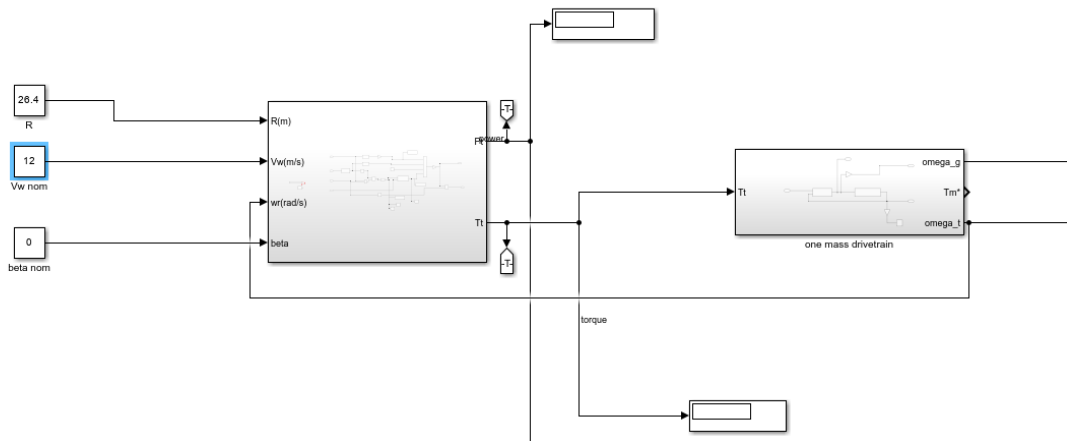
$$Kc p = 0.5 * \rho * A * R^3 * [c1 * (c2 + c6 * c7)^3 * e^{-(c2 + c6 * c7)/c2}] / [c2^2 * c7^4] \text{ [Εξ. 11]}$$



Εικόνα 3-15: One Mass Drivetrain (3)

Με την εισαγωγή του drivetrain δημιουργείται ένας βρόχος για τον υπολογισμό του ω κατά την διάρκεια της προσομοίωσης που σημαίνει ότι η τιμή του κατά την εκκίνηση θα είναι μηδενική επομένως θα χρειαστεί να δοθεί μια αρχική τιμή στο σύστημα. Από την [Εικόνα 3-16] παρατηρούμε την ανατροφοδότηση της γωνιακής ταχύτητας του

ρότορα από το drivetrain με έξοδο omega_t [15].



Εικόνα 3-16: One Mass Drivetrain (4)

3.5. PMSG generator block

Για την μοντελοποίηση της σύγχρονης γεννήτριας μόνιμων μαγνητών θα εξετάσουμε αρχικά το μηχανικό της κομμάτι όπου η εξίσωση που το περιγράφει διαμορφώνεται από την εφαρμογή του δεύτερου νόμου του Newton και είναι :

$$J \frac{d\omega_R}{dt} = T_e - B\omega_R - T_M \text{ [Εξ. 12]}$$

όπου J είναι η ροπή αδράνειας της γεννήτριας, B είναι η σταθερά της τριβής, ω_R είναι η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, T_M η μηχανική ροπή που εισέρχεται στην γεννήτρια και T_e η ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας.

Για την προσομοίωση του ηλεκτρομαγνητικού μέρους της γεννήτριας χρησιμοποιούνται σχέσεις για την λειτουργία της από το d-q πλαίσιο αναφοράς του στάτη στο τριφασικό σύστημα a-b-c. Οι σχέσεις που διαμορφώνουν τη λειτουργία της μηχανής στο τριφασικό σύστημα a-b-c είναι:

$$\begin{pmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{pmatrix} = R_s \begin{pmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \lambda_{sa} \\ \lambda_{sb} \\ \lambda_{sc} \end{pmatrix} \text{ [Εξ. 13]}$$

όπου στα αριστερά της [Εξ. 13] έχουμε τις φασικές τάσεις του στάτη και στα δεξιά τα ρεύματα (i_s) και τις μαγνητικές ροές (λ_s) του στάτη της γεννήτριας. Και οι ροές του στάτη στους d και q άξονες του πλαισίου αναφοράς δίνονται από τις σχέσεις:

$$\lambda_{sd} = L_d i_{sd} + \lambda_m \text{ [Εξ. 14]}$$

$$\lambda_{sq} = L_q i_{sq} \text{ [Εξ. 15]}$$

όπου L_d , L_q είναι οι επαγωγές των αξόνων d και q αντίστοιχα και λ_m είναι μαγνητική ροή που οφείλεται στους μόνιμους μαγνήτες της γεννήτριας η οποία είναι μη μηδενική μόνο στον d άξονα και έχει σταθερή τιμή όποτε προκύπτει ότι $d\lambda_m/dt=0$.

Όμως για την χρήση των εξισώσεων που προαναφέρθηκαν είναι απαραίτητος ο μετασχηματισμός τους λόγω του συστήματος του μοντέλου που χρησιμοποιεί το d-q πλαίσιο αναφοράς το οποίο περιστρέφεται με την γωνιακή ταχύτητα του δρομέα. Ο μετασχηματισμός αυτός γίνεται με τη χρήση της αντίστροφης μήτρας Park η οποία δίνεται ως εξής:

$$\mathbf{P}_x^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos\theta_x & \sin\theta_x & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_x - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_x - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_x + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_x + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad [\text{Εξ. 16}]$$

όπου προκύπτει από την γενική μορφή της μήτρας:

$$\mathbf{P}_x = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos\theta_x & \cos(\theta_x - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_x + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin\theta_x & \sin(\theta_x - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_x + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad [\text{Εξ. 17}]$$

όπου θ_x είναι η γωνία που σχηματίζει ο στάτης (θ_s) με το σύστημα αναφοράς που έχει επιλεγεί. Ο δείκτης x υποδηλώνει για το αν η μήτρα μετασχηματισμού αναφέρεται για τη μετατροπή των μεγεθών του στάτη ($x=s$). Ο συντελεστής $\sqrt{2/3}$ ενσωματώνεται στις παραπάνω μήτρες έτσι ώστε να ισχύει η σχέση $\mathbf{P}_x * \mathbf{P}_x^{-1} = \mathbf{I}$. Επίσης σε συμμετρικά ηλεκτρικά συστήματα, όπως αυτό της προσομοίωσης, η μηδενική συνιστώσα που προκύπτει από το μετασχηματισμό είναι μηδέν και παραλείπεται. Εφαρμόζοντας στην προηγούμενη εξίσωση, [Εξ. 17], το μετασχηματισμό Park παίρνουμε το δυναμικό μοντέλο της γεννήτριας στο σύγχρονα στρεφόμενο d-q πλαίσιο αναφοράς, διαμορφώνοντας τις σχέσεις :

$$\mathbf{V}_{sd} = \mathbf{R}_s \mathbf{i}_{sd} + \frac{d\lambda_{sd}}{dt} - \omega_e \lambda_{sq} \quad [\text{Εξ. 18}]$$

$$\mathbf{V}_{sq} = \mathbf{R}_s \mathbf{i}_{sq} + \frac{d\lambda_{sq}}{dt} + \omega_e \lambda_{sd} \quad [\text{Εξ. 19}]$$

όπου $\mathbf{V}_{sd-sq}$ και $\mathbf{i}_{sd-sq}$ είναι οι τάσεις και τα ρεύματα του στάτη στους d και q άξονες αντίστοιχα, $\mathbf{R}_s$ είναι η αντίσταση των τυλιγμάτων του στάτη, ω_e είναι η ηλεκτρική ταχύτητα περιστροφής του δρομέα η οποία είναι και η σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής του πλαισίου και λ_{sd} , λ_{sq} είναι οι ροές του στάτη στους άξονες d και q αντίστοιχα [12].

Έπειτα αντικαθιστώντας τις σχέσεις [Εξ. 14] και [Εξ. 15] στις σχέσεις [Εξ. 18] και [Εξ. 19] αντίστοιχα και λαμβάνοντας υπόψιν και τις σχέσεις των γωνιακών ταχυτήτων υπολογίζουμε τα $\mathbf{V}_{sd}$ και $\mathbf{V}_{sq}$ ως:

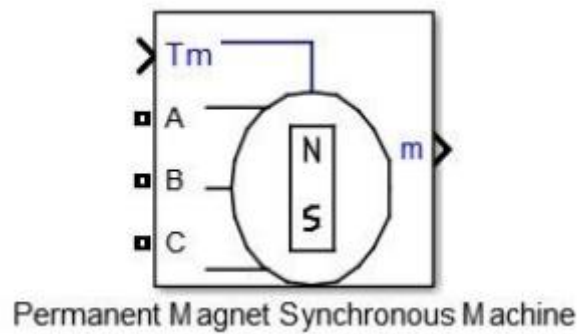
$$\frac{d}{dt} i_{sd} = \frac{1}{L_d} V_{sd} - \frac{R_s}{L_d} i_{sd} + \frac{L_q}{L_d} p \omega_R i_{sq} \quad [\text{Εξ. 20}]$$

$$\frac{d}{dt} i_{sq} = \frac{1}{L_q} V_{sq} - \frac{R_s}{L_q} i_{sq} - \frac{L_d}{L_q} p \omega_R i_{sd} - \frac{\lambda_m}{L_q} p \omega_R \quad [\text{Εξ. 21}]$$

Τέλος, η ηλεκτρομαγνητική ροπή T_e που αναπτύσσεται στη γεννήτρια υπολογίζεται από τη σχέση :

$$T_e = \frac{3}{2} p (\lambda_m i_{sq} + (L_d - L_q) i_{sd} i_{sq}) \quad [\text{Εξ. 22}]$$

Όπου παρατηρείται πως η ροπή εκφράζεται ως το άθροισμα της ηλεκτρομαγνητικής ροπής που παράγεται μέσω της αλληλεπίδρασης μεταξύ του μαγνητικού πεδίου που δημιουργούν οι πόλοι της μηχανής και της ροπής αντίδρασης [12].

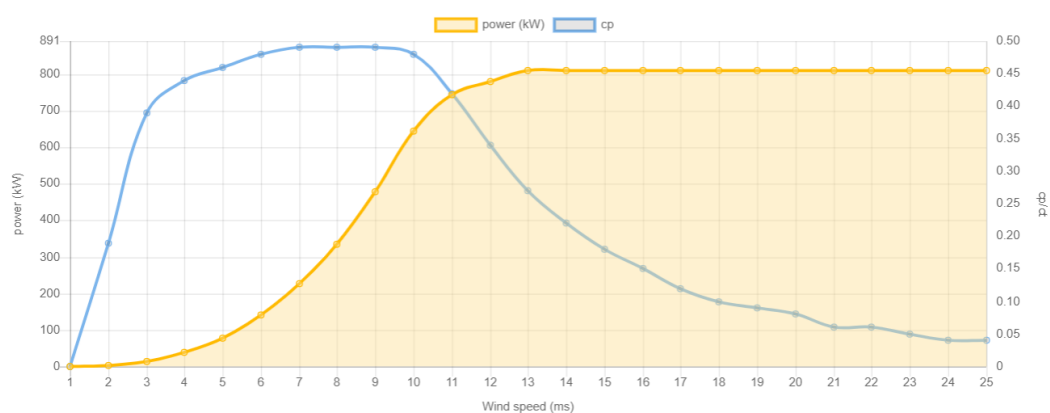


Εικόνα 3-17: Μοντέλο σύγχρονης μηχανής μόνιμων μαγνητών στο Simulink

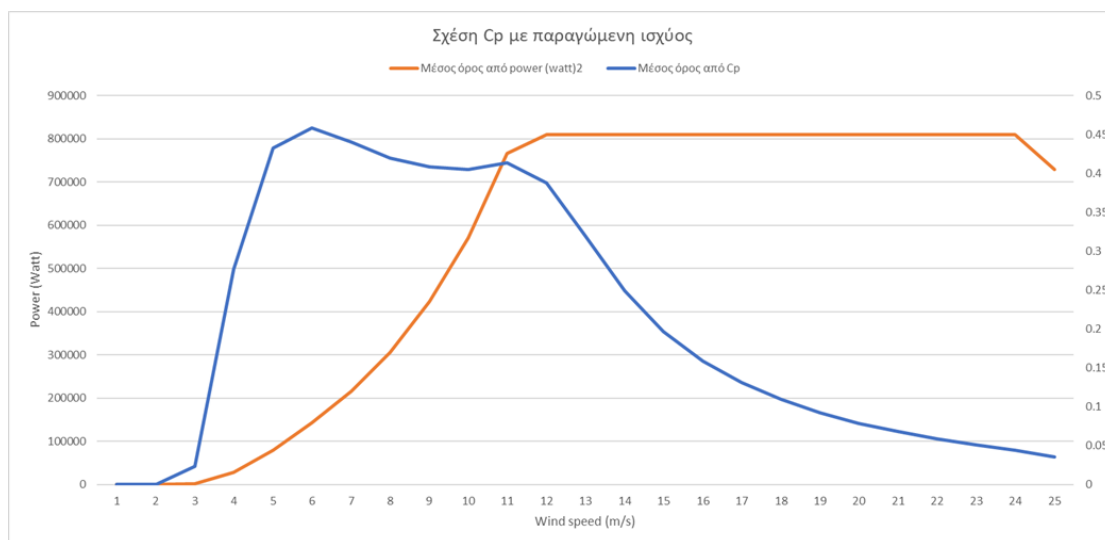
3.6. Επαλήθευση σωστής λειτουργίας του συστήματος

Για την προσομοίωση, έχει χρησιμοποιηθεί η ανεμογεννήτρια της Enercon E-53 με ονομαστική ισχύς 800kW η οποία έχει ονομαστική ταχύτητα ανέμου 12 m/s, και ταχύτητα εκκίνησης 3 m/s , ταχύτητα διακοπής 34 m/s. Έχοντας υπόψιν την καμπύλη ισχύος που δίνεται για την ανεμογεννήτρια έγινε σύγκριση της με τις τιμές που παρήγαγε το σχεδιασμένο αεροδυναμικό μοντέλο για την επαλήθευση της σωστής λειτουργίας του. Για καλύτερη αναπαράσταση και σύγκριση των αποτελεσμάτων έγινε εξαγωγή των τιμών σε αρχείο excel με σκοπό το φιλτράρισμα των σφαλμάτων εκκίνησης κατά την εναλλαγή τον ταχυτήτων ανέμου [17].

Power curve



Εικόνα 3-18: Χαρακτηριστική καμπύλη (power curve)



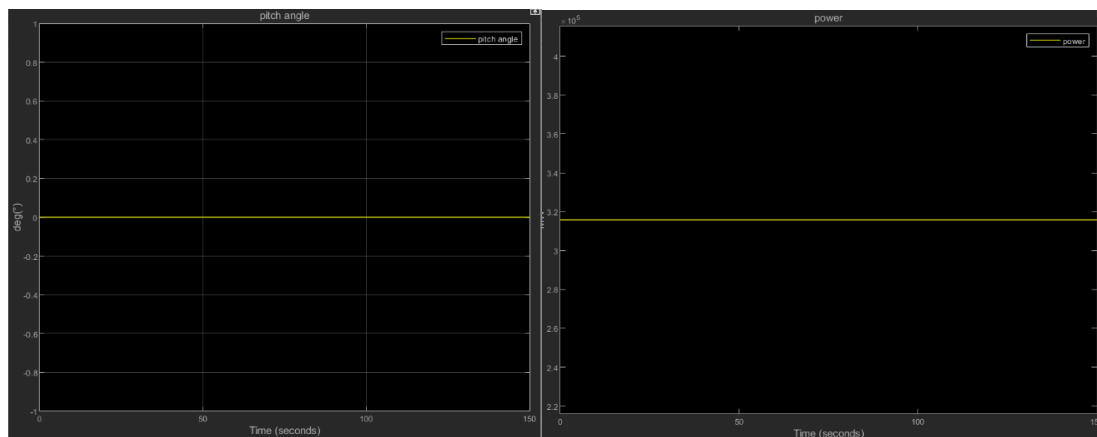
Εικόνα 3-19: Σχέση Cp με παραγόμενη ισχύ

Παρατηρούμε ότι οι μετρήσεις του σχεδιασμένου μοντέλου διαμορφώνουν παρόμοιες τιμές με την πραγματική καμπύλη ισχύος με την διαφορά ότι έχουμε μετρήσεις δέκα δευτερολέπτων για την κάθε ταχύτητα του ανέμου και λόγω του

περιορισμού εκκίνησης για ταχύτητα 3 m/s η προσομοίωση δεν μας δίνει τιμές σε αντίθεση με την πραγματική λειτουργία της [17].

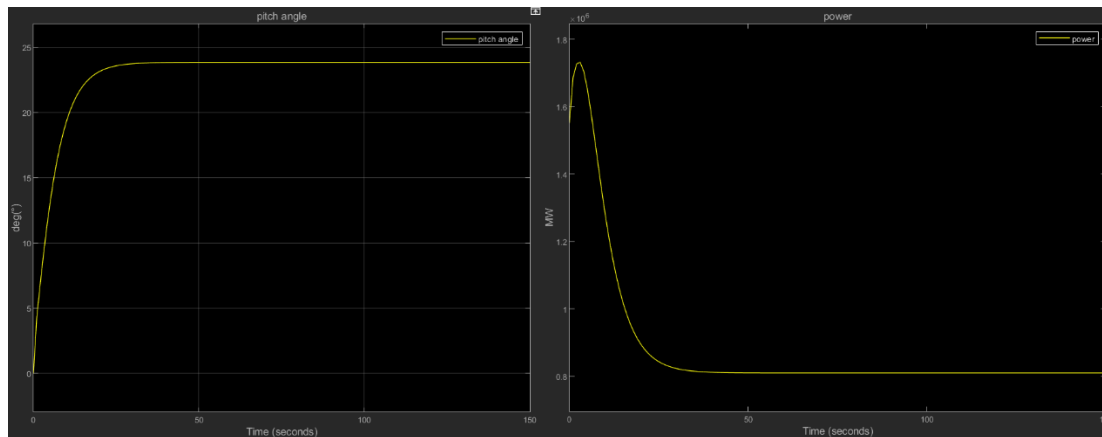
Pitch angle controller

Για να εξετάσουμε την λειτουργία του pitch controller το συνδέσαμε με το σύστημα κρατώντας τη γωνιακή ταχύτητα σταθερή ώστε να διακρίνουμε τις αντιδράσεις του ελεγκτή για διαφορετικές ταχύτητες του ανέμου. Αρχικά για ταχύτητες μικρότερες της ονομαστικής ταχύτητας του ανέμου ο ελεγκτής δεν θα πρέπει αντιδράει και να διατηρεί την κλίση του στις 0° καθώς η λειτουργία του βασίζεται στην αλλαγή της γωνίας κλίσης σε περίπτωση όπου το σύστημα υπερβεί την τιμή της παραγόμενης ονομαστικής ισχύς. Όπως παρατηρείται και στην [Εικόνα 3-20] για ταχύτητα ανέμου στα 8 m/s δεν έχουμε αλλαγή της γωνίας. [17]

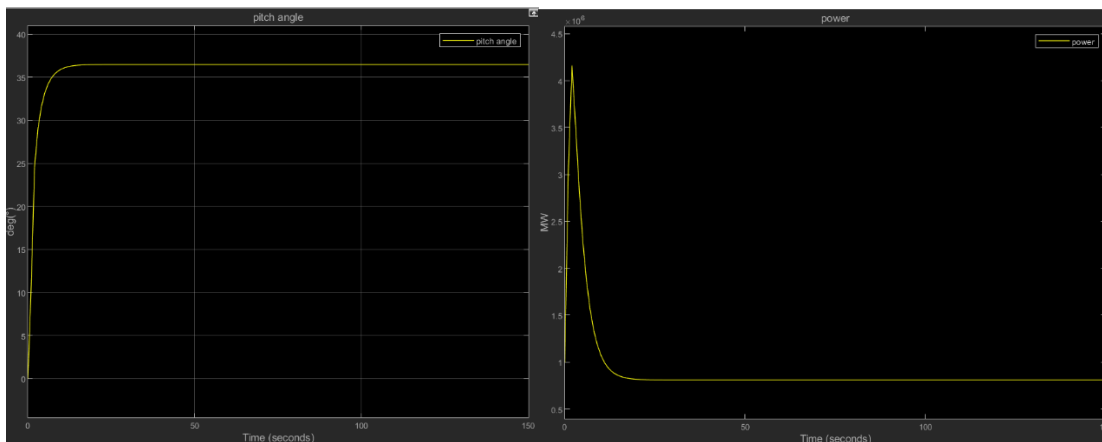


Εικόνα 3-20: Pitch angle και ισχύς για ταχύτητα ανέμου 8m/s

Έπειτα δοκιμάζοντας τον ελεγκτή για διαφορετικές ταχύτητες του ανέμου παρατηρούμε την αλλαγή της γωνίας ώστε να επιβραδύνει τη γεννήτρια για να διατηρήσει τη λειτουργία της στην ονομαστική της για ισχύς στα 810 kW. Στους παρακάτω πίνακες διακρίνονται τα αποτελέσματα για τη λειτουργία του συστήματος στα 18 m/s και στα 30 m/s αντίστοιχα, όπου λόγω της υπέρβασης της ονομαστικής ταχύτητας λειτουργίας έχουμε μεταβολή της κλίσης αντίστοιχη με το μέγεθος της υπέρβασης που έχει γίνει. Επιπλέον παρατηρούμε από τα αποτελέσματα ότι για ταχύτητες όπως τα 30 m/s όπου βρίσκονται πολύ κοντά στην ταχύτητα cut-off της γεννήτριας ο ελεγκτής δεν υπερβαίνει τα όριο των 45° καταφέροντας να εξισορροπήσει την λειτουργία στην ονομαστική της ισχύ και διατηρώντας τον χρονικό περιορισμό περιστροφής του που είναι στις 5°/sec [17].



Εικόνα 3-21: Pitch angle και ισχύς για ταχύτητα ανέμου **15m/s**



Εικόνα 3-22: Pitch angle και ισχύς για ταχύτητα ανέμου **30m/s**

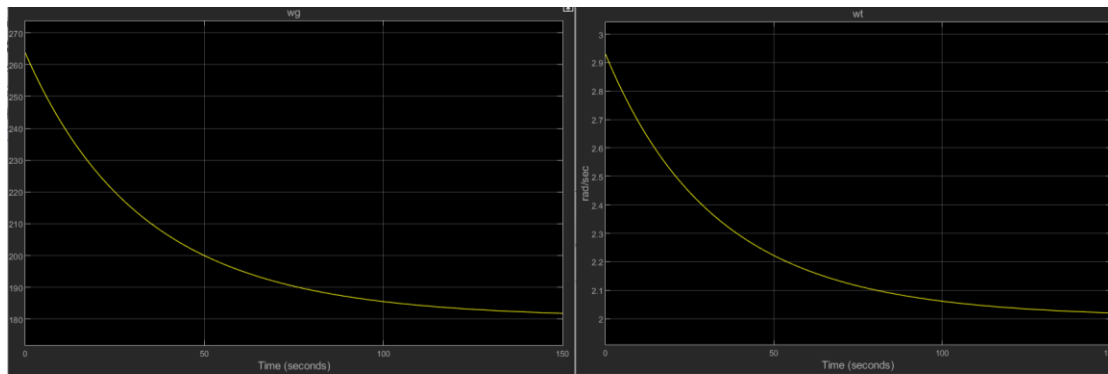
Drivetrain

Για την επαλήθευση της σωστής λειτουργίας του συστήματος μετάδοσης κίνησης όπου διαθέτει και τον ελεγκτή MPPT εξάχθηκαν μετρήσεις για ταχύτητες ανέμου 6 m/s και 15 m/s διατηρώντας την γωνία κλίσης 0°.

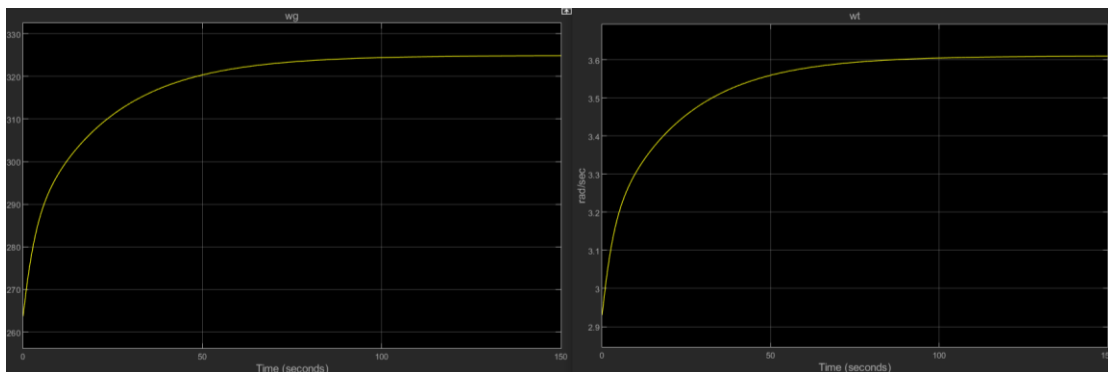
Αρχικά η γωνιακή ταχύτητα της γεννήτριας πρέπει να είναι, σύμφωνα με την αναλογία μετασχηματισμού του κιβωτίου ταχυτήτων V , 90 φορές μεγαλύτερη της γωνιακής ταχύτητας του ρότορα [17].

Επομένως έχουμε την σχέση:

$$\omega_g = V * \omega_t \text{ [Εξ. 23]}$$



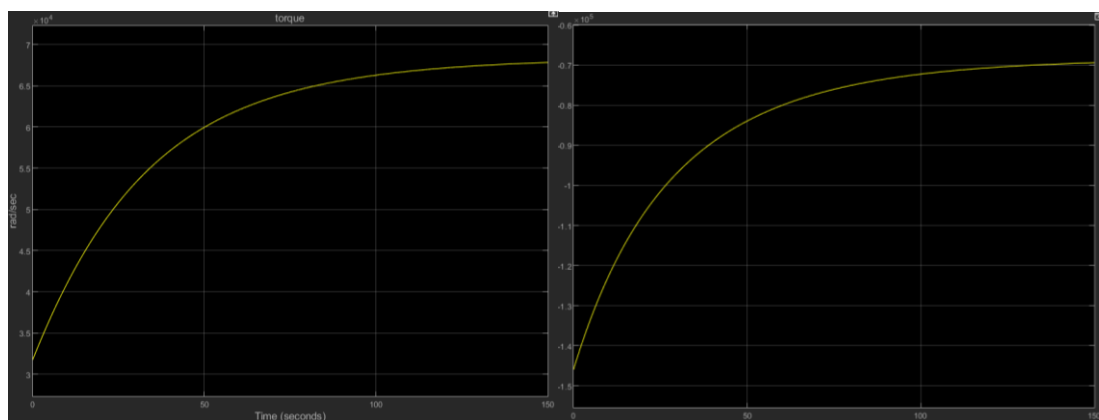
Εικόνα 3-23: Γωνιακή ταχύτητα ρότορα και γεννήτριας για ταχύτητα ανέμου **6m/s**



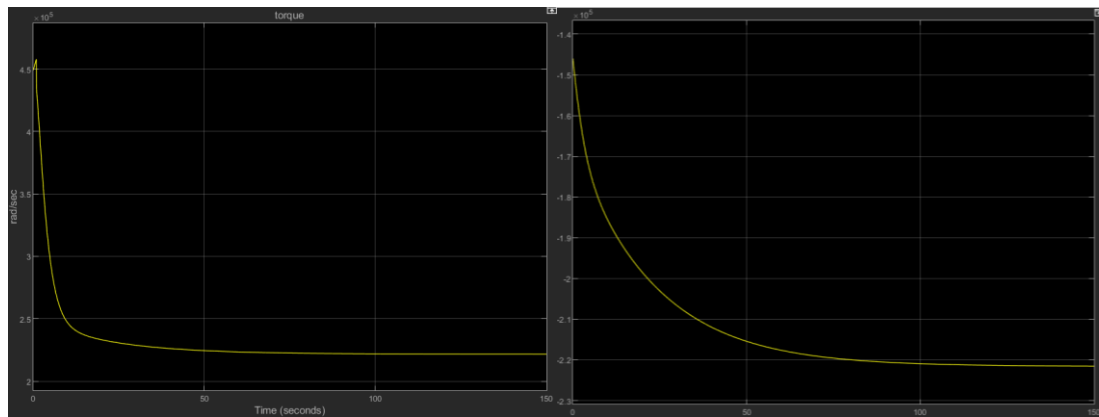
Εικόνα 3-24: Γωνιακή ταχύτητα ρότορα και γεννήτριας για ταχύτητα ανέμου **15m/s**

Στις παραπάνω εικόνες παρατηρούμε ότι η σχέση μεταξύ των γωνιακών ταχυτήτων για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου διαμορφώνουν σωστά την αναλογία μεταξύ τους αποδεικνύοντας την σωστή λειτουργία του συστήματος.

Επίσης, η ροπή που εισάγεται στο drivetrain, καθώς και η ροπή που εισάγεται στην γεννήτρια θα πρέπει να έχουν ίδια τιμή αλλά αντίθετο πρόσημο. Για την σύγκριση τους πρέπει να υπολογίσουμε την εσωτερική τιμή της ροπής του drivetrain αφαιρώντας την αναλογία μετασχηματισμού του κιβωτίου ώστε να είναι και οι δυο τιμές την ροπών στην ίδια μηχανική αναφορά [17].



Εικόνα 3-25: Ροπή ρότορα και γεννήτριας για ταχύτητα ανέμου **6m/s**



Εικόνα 3-26: Ροπή ρότορα και γεννήτριας για ταχύτητα ανέμου **15m/s**

Συγκρίνοντας τις τιμές των μετρήσεων, διαπιστώνεται ότι, οι ροπές που δέχεται και εξάγει το σύστημα μετάδοσης κίνησης είναι ίσες και αντίθετες με τις τιμές που εξάγει, επαληθεύοντας έτσι την ορθή λειτουργία του συστήματος [17].

4. Σύνδεση με το δίκτυο για Α/Γ των 1.5MW

4.1. Μετατροπές και δημιουργία μοντέλου

Σε αυτό το κεφάλαιο, με τη χρήση του ήδη υπάρχοντος επαληθευμένου μοντέλου από το προηγούμενο κεφάλαιο εξετάζουμε τη διασύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο για την περίπτωση μιας Α/Γ των 1.5MW. Το μοντέλο είναι όμοιο με την Α/Γ τύπου Δ – Α/Γ μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα ισχύος όπως φαίνεται και στην [Εικόνα 1-11].

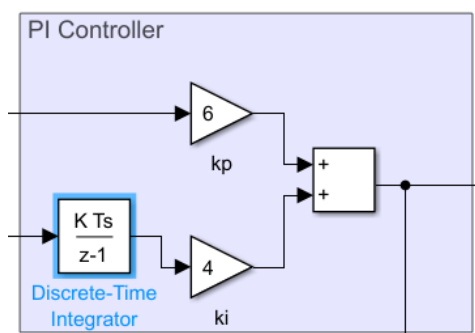
Υπήρξαν κάποιες αλλαγές σε σχέση με το προηγούμενο μοντέλο. Αρχικά, για την διαμόρφωση του συντελεστή ισχύος C_p , χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω τύπος:

$$C_p = 0.44 - 0.167 * \beta * \sin\left(\frac{\pi * \lambda - 3}{15 - 0.3} * \beta\right) - 0.00184 * (\lambda - 3) * \beta \quad [\text{Εξ. 24}] [23]$$



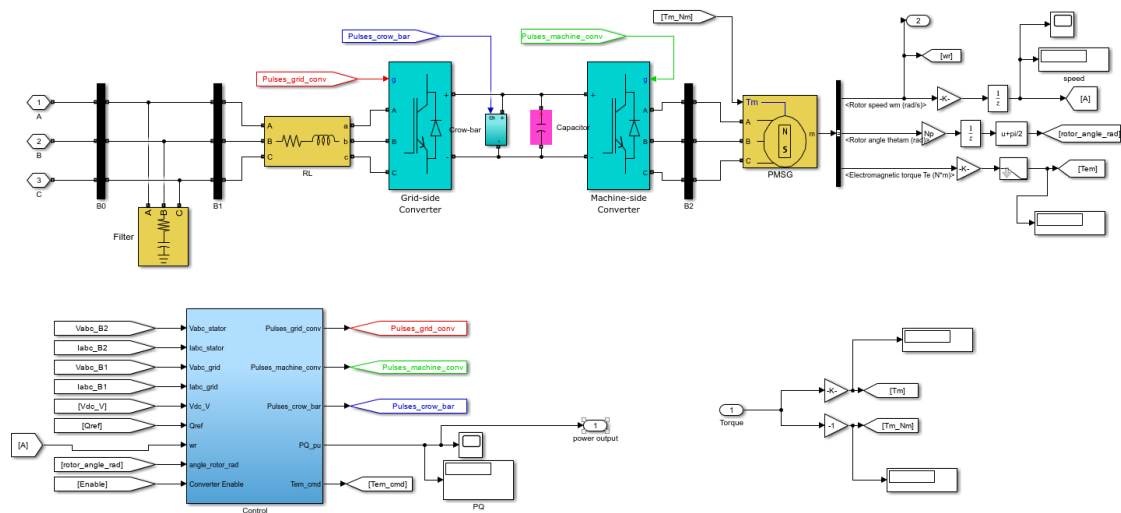
Εικόνα 4-1: Νέος Υπολογισμός C_p

Επίσης, για την σωστή και ταχύτερη ανταπόκριση του PID Controller ρυθμίστηκαν οι σταθερές K_p και K_i , σε 6 και 4 αντίστοιχα.



Εικόνα 4-2: Νέα σταθερές του PID Controller

Το σύστημα μας τροφοδοτεί με μηχανική ενέργεια την ηλεκτρική γεννήτρια PMSG η οποία με την σειρά της δημιουργεί ηλεκτρικό φορτίο. Για την διασύνδεση με το δίκτυο χρησιμοποιείται η παρακάτω διάταξη, η οποία αποτελείται από έναν μετατροπέα από την πλευρά της γεννήτριας, έναν μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου, έναν πυκνωτή και από δύο τριφασικούς RLC κλάδους. Επίσης για την σωστή λειτουργία του συστήματος χρησιμοποιείται ένα κύκλωμα crowbar και μια σειρά από ελεγκτές που βρίσκονται στο subsystem με όνομα control.



Εικόνα 4-3: Σύνδεση PMSG με το δίκτυο [23]

Συνοπτική περιγραφή των επιμέρους υποσυστημάτων:

- **Μετατροπέας από την πλευρά της γεννήτριας (Machine-Side Converter)**

Πρόκειται για ένα universal bridge block του Simulink, το οποίο αναπαριστά το ένα μέρος ενός αντίστροφου μετατροπέα, γνωστός και ως «back-to-back converter» στα αγγλικά.

Ο μετατροπέας από την πλευρά της γεννήτριας ελέγχει την ταχύτητα του ρότορα ή τη ροπή για να διατηρήσει τη μέγιστη δυνατή παραγωγή ισχύς. Επίσης, μετατρέπει τη μεταβαλλόμενη συχνότητα και τάση εξόδου της PMSG, η οποία επηρεάζεται από τις μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου σε μια σταθερή τάση συνεχούς ρεύματος ή εναλλασσόμενου ρεύματος με σταθερή συχνότητα. Ακόμα, εμπεριέχει μηχανισμούς για την προστασία του μετατροπέα και της γεννήτριας [24].

- **Μετατροπέας από την πλευρά του δικτύου (Grid-Side Converter)**

Πρόκειται επίσης για ένα universal bridge block του Simulink, το οποίο αναπαριστά το δεύτερο κομμάτι του αντίστροφου μετατροπέα, από την πλευρά του δικτύου.

Ο μετατροπέας από την πλευρά του δικτύου ρυθμίζει και σταθεροποιεί την DC τάση, η οποία είναι η τάση που μεσολαβεί μεταξύ του PMSG και του μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου. Με τη διατήρηση μιας σταθερής DC τάσης, εξασφαλίζεται η σωστή λειτουργία του μετατροπέα και επιτρέπεται η ομαλή μεταφορά ισχύος μεταξύ του PMSG και του δικτύου. Επίσης, ελέγχει τον συντελεστή ισχύος που εισάγεται στο δίκτυο. Ο συντελεστής ισχύος αντιπροσωπεύει τον βαθμό αποδοτικής χρήσης της ηλεκτρικής ισχύος. Ρυθμίζοντας τη φάση μεταξύ των κυμάτων τάσης και ρεύματος, ο μετατροπέας από την πλευρά του δικτύου μπορεί να εξασφαλίσει ότι το PMSG εισάγει

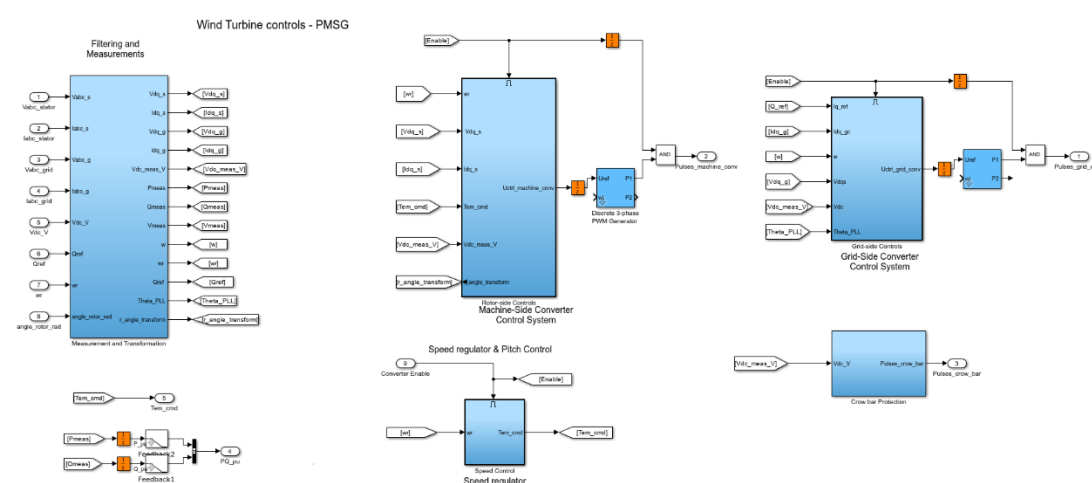
ισχύ στο δίκτυο με τον επιθυμητό συντελεστή ισχύος, κοντά στη μονάδα (1). Αυτό βοηθά στη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος συνολικά [24].

- **RL**

Πρόκειται για ένα Three-Phase RLC Branch του Simulink, το οποίο εφαρμόζει τρεις ισορροπημένους κλάδους που ο καθένας αποτελείται είτε από μία αντίσταση, είτε από έναν επαγωγέα, είτε από ένα πυκνωτή [25].

- **Filter**

Πρόκειται για ένα Three-Phase RLC Load Block του Simulink, το οποίο εφαρμόζει ένα ισορροπημένο φορτίο τριών φάσεων ως συνδυασμό στοιχείων RLC. Σε καθορισμένη συχνότητα, το φορτίο παρουσιάζει σταθερή αντίσταση [26].



Εικόνα 4-4: Control Subsystem [23]

- **Control**

Εμπεριέχει ένα υποσύστημα το οποίο φιλτράρει και υπολογίζει τις απαραίτητες μεταβλητές, οι οποίες χρησιμοποιούνται σαν είσοδος στους αισθητήρες. Οι αισθητήρες αυτοί χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του μετατροπέα από την πλευρά της γεννήτριας, για τον έλεγχο του μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου και για τον έλεγχο της ταχύτητας της γεννήτριας.

- **Crowbar**

Ένα κύκλωμα Crowbar είναι ένα κύκλωμα προστασίας τροφοδοσίας που βραχυκυκλώνει γρήγορα τη γραμμή τροφοδοσίας εάν η τάση ή/και το ρεύμα υπερβαίνουν τα καθορισμένα όρια. Στην πράξη, το βραχυκύκλωμα που προκύπτει πυροδοτεί μια ασφάλεια ή ενεργοποιεί κάποια άλλη προστασία, διακόπτοντας ουσιαστικά την παροχή [27].

4.2. Αποτελέσματα προσομοίωσης

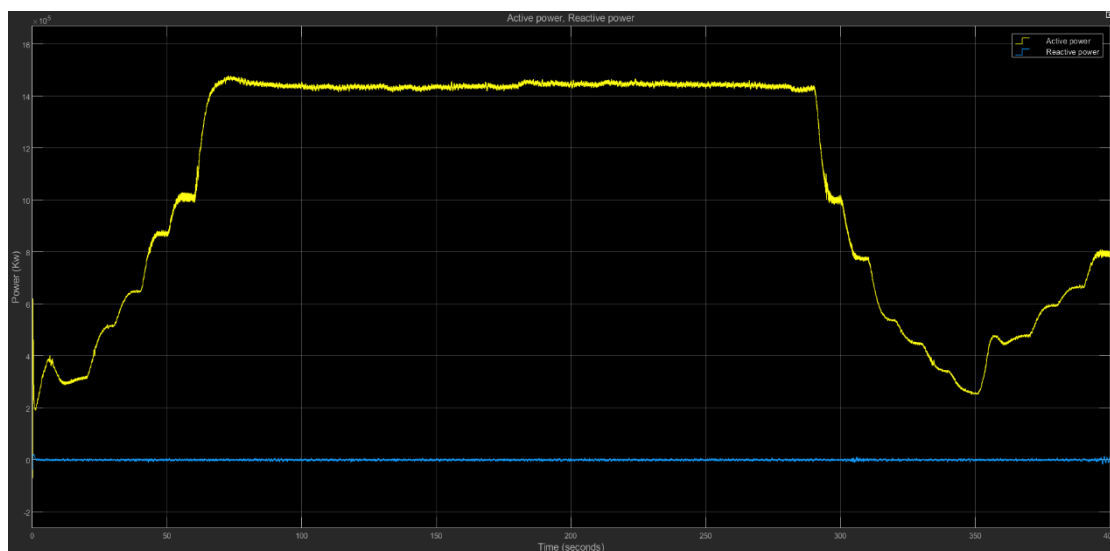
Το παρακάτω προφίλ ανέμου είναι για 40 διαφορετικές τιμές, ανά 10 δευτερόλεπτα, για συνολικά 400 δευτερόλεπτα. Χρησιμοποιήσαμε το συγκεκριμένο προφίλ ανέμου, με μεγάλο εύρος τιμών και αρκετές διακυμάνσεις, προκειμένου να επιβεβαιωθεί η σωστή λειτουργία του συστήματος.

Μέση Ταχύτητα [m/s]	Χρόνος
7.8	10:00:00 π.μ.
8.4	10:00:10 π.μ.
9.8	10:00:20 π.μ.
10.6	10:00:30 π.μ.
11.7	10:00:40 π.μ.
12.3	10:00:50 π.μ.
13.7	10:01:00 π.μ.
14.6	10:01:10 π.μ.
15.7	10:01:20 π.μ.
16.8	10:01:30 π.μ.
18.1	10:01:40 π.μ.
19.3	10:01:50 π.μ.
20	10:02:00 π.μ.
21.4	10:02:10 π.μ.
22.7	10:02:20 π.μ.
23.4	10:02:30 π.μ.
23.8	10:02:40 π.μ.
24.7	10:02:50 π.μ.
23	10:03:00 π.μ.
22.1	10:03:10 π.μ.
21.4	10:03:20 π.μ.
20	10:03:30 π.μ.
19	10:03:40 π.μ.
18	10:03:50 π.μ.
17.4	10:04:00 π.μ.
16.5	10:04:10 π.μ.
15.2	10:04:20 π.μ.

14.4	10:04:30 π.μ.
13.6	10:04:40 π.μ.
12.3	10:04:50 π.μ.
11.3	10:05:00 π.μ.
10	10:05:10 π.μ.
9.4	10:05:20 π.μ.
8.6	10:05:30 π.μ.
7.8	10:05:40 π.μ.
9.2	10:05:50 π.μ.
9.6	10:06:00 π.μ.
10.3	10:06:10 π.μ.
10.7	10:06:20 π.μ.
11.4	10:06:30 π.μ.

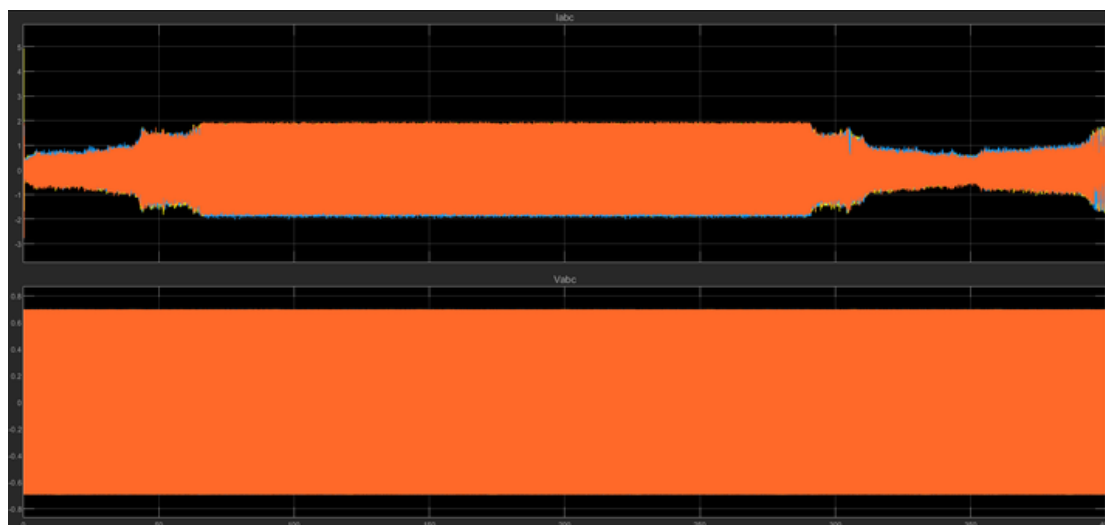
Εικόνα 4-5: Προφίλ ανέμου

Στο παρακάτω διάγραμμα ενεργού και άεργου ισχύος, παρατηρείται η γραμμική αύξηση της ενεργούς ισχύος με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου, η σταθερότητα γύρω από την ονομαστική ταχύτητα του ανέμου η οποία πλησιάζει τα 1.5MW και μία κάθοδο με την μείωση της ταχύτητας του ανέμου. Επίσης, πετυχαίνουμε η άεργος ισχύς να παραμένει σταθερά κοντά στο μηδέν.



Εικόνα 4-6: Διάγραμμα ενεργούς και άεργους ισχύς

Η σωστή λειτουργία του συστήματος επαληθεύεται επίσης από το διάγραμμα της τάσης το οποίο δεν υπερβαίνει την ονομαστική τιμή των 400V.



Εικόνα 4-7: Διαγράμματα τάσης-ρεύματος

5. Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν να αναδειχθεί ένα μοντέλο προσομοίωσης λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μια γεννήτρια PMSG. Το παρόν μοντέλο έχει την δυνατότητα προσομοίωσης λειτουργίας ανεμογεννητριών διαφορετικών μεγεθών έπειτα από την σωστή ρύθμιση των υποσυστημάτων που αντιπροσωπεύουν τα επιμέρους εξαρτήματα της. Η δυνατότητα αυτή έχει επαληθευθεί με την αύξηση της ισχύος του μοντέλου μας στα 1.5 MW για τη διασύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο, όπου οι ρυθμίσεις για την σωστή μετατροπή του μοντέλου έγιναν διαμορφώνοντας τα χαρακτηριστικά των υποσυστημάτων του. Με βάση το υπάρχον μοντέλο υπάρχει δυνατότητα ανάπτυξης και πιο πολύπλοκων και λεπτομερέστερων μοντέλων με την περεταίρω ανάπτυξη των υποσυστημάτων, για την προσομοίωση πιο εξειδικευμένων περιπτώσεων.

Βιβλιογραφία-Δικτυογραφία

- [1] Ανανεώσιμες Πηγες Ενέργειας, Τεχνολογίες & Περιβάλλον, Θεοχάρης Δ. Τσούτσος, Ιωάννης Ν. Κανάκης (2013)
- [2] Παράγωγη Ηλεκτρικής Ενέργειας, Παντελής Β. Μαλατέστας (2019)
- [3] commons.wikipedia.org
- [4] Development of the Dual-Vertical-Axis Wind Turbine with Active Blade Pitch Control, McLean Daniel (2018) researchgate.net
- [5] Comparative study of different types of generators used in wind turbine and reactive power compensation, Bindhu Babu1, Divya S (2019) iosrjournals.org
- [6] Impact of Wind Power on the Angular Stability of a Power System, Djemai Naimi, Bouktir Tarek (2008) researchgate.net
- [7] Modeling and Control Design of Pitch-Controlled Variable Speed Wind Turbines, Molina Marcelo, Mercado Pedro (2011) researchgate.net
- [8] Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment. Renew. Sustain. Energy Rev, López I., Andreu J., Ceballos S., de Alegría I.M., Kortabarria I. (2013) sciencedirect.com
- [9] Μοντελοποίηση ανεμογεννητριών για τη μελέτη δυναμικών φαινομένων σε συνθήκες αυξημένης αιολικής διεύθυνσης, Μάργαρης, Ιωάννης (2011) didaktorika.gr
- [10] Ανάλυση, Μοντελοποίηση και Έλεγχος Ανεμογεννήτριας Διπλής Τροφοδότησης Στάτη Και Δρομέα, Βαγρόπουλος Ι. Στυλιανός (2010) ikee.lib.auth.gr
- [11] Σχεδιασμός Συστήματος Ελέγχου Ανεμογεννήτριας Μεταβλητών Στροφών Με Επαγωγική Γεννήτρια Διπλής Τροφοδότησης Σε Αυτόνομο Σύστημα, Λαμπρινίδης Στέφανος (2013) ikee.lib.auth.gr
- [12] Ανάπτυξη Δυναμικού Μοντέλου και Έλεγχος Ανεμογεννήτριας Συνδεδεμένης στο Δίκτυο και σε Αυτόνομη Λειτουργία Εφοδιασμένη με Διάταξη Αποθήκευσης Ενέργειας Στέφανος Γ. Δημητρακάκης (2014) nemertes.library.upatras.gr
- [13] More production with less power and noise, Bogdan Iordanescu, Humberto Machado, Gustavo Ariza, Vasile Dragan (2022) worldoil.com
- [14] Digital proportional amplifier of linear DC electromagnet, Ali Hazrat, Adil Muhammad, Khan Hasham (2019) researchgate.net
- [15] Permanent-Magnet Synchronous Machines with Non-Overlapping Concentrated Windings for Low-Speed Direct-Drive Applications, Florence Meier (2008) diva-portal.org

- [16] Design of axial-flux permanent-magnet low-speed machines and performance comparison between radial-flux and axial-flux machines, A. Parviainen (2005) web.mit.edu
- [17] Wind turbine model with implementation of a pitch controller, Carlos Domenici Massanet (2022) upcommons.upc.edu
- [18] Representation and estimation of the power coefficient in wind energy conversion systems, José Genaro González-Hernández, Rubén Salas-Cabrera (2021) hindawi.com
- [19] Numerical Simulation of the Influence of Platform Pitch Motion on Power Generation Steadiness in Floating Offshore Wind Turbines, Tumewu Yehezkiel, Petrone Crescenzo, Sivaselvan Mettupalayam (2017) researchgate.net
- [20] Digital simulation of voltage dip characteristics of wind turbine systems, Junyent-Ferre Adria, Bellmunt Oriol, Martinez-Rojas Marcela, Sumper Andreas, Sala Marc, Mata Montserrat (2007) ieeexplore.ieee.org
- [21] Nonlinear torsional vibrations of a wind turbine gearbox, Mingming Zhao (2015) sciencedirect.com
- [22] Sliding mode control of wind energy conversion systems: Trends and applications, Mousavi Yashar, Bevan Geraint, Kucukdemiral Ibrahim (2022) sciencedirect.com
- [23] Detailed Modeling of a 1.5MW Wind Turbine based on Direct-driven PMSG, Ruan Jiayang (2023) mathworks.com
- [24] Linear Active Disturbance Rejection Control for DC Bus Voltage of Permanent Magnet Synchronous Generator Based on Total Disturbance Differential, Xuesong Zhou, Mao Liu, Youjie Ma, Bao Yang, Faqing Zhao (2019) mdpi.com
- [25] MathWorks, Three Phase RLC Branch mathworks.com
- [26] MathWorks, Three Phase RLC Load mathworks.com
- [27] Analog Devices, What is a Crowbar Circuit? www.analog.com