



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**Μοντελοποίηση αιολικού πάρκου 9 MW και μελέτη
μεταβατικών φαινομένων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Βασίλειου Η. Μαρκατσέλη

Επιβλέπων: Μαρία Γ. Ιωαννίδου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Μοντελοποίηση αιολικού πάρκου ισχύος 9 MW και μελέτη μεταβατικών φαινομένων

του

Βασίλειου Η. Μαρκατσέλη

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επιβλέπων: Μαρία Γ. Ιωαννίδου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή:

.....
Μ. Γ. Ιωαννίδου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....
Ν. Θεοδώρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Π. Τσαραμπάρης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2017

.....
Βασίλειος Η. Μαγκατσέλης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Βασίλειος Η. Μαγκατσέλης, 2017.
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία είναι βιβλιογραφική στο σύνολό της. Ο φοιτητής - συγγραφέας συγκέντρωσε από διάφορες πηγές το περιεχόμενο της εργασίας που παρατίθεται πιο κάτω. Όλες οι πηγές αναφέρονται μέσα στο κείμενο και στο κεφάλαιο Βιβλιογραφία

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και προσομοίωση ενός αιολικού πάρκου 9 MW που αποτελείται από 6 διπλά τροφοδοτούμενες επαγωγικές ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών ισχύος 1,5 MW η καθεμία. Η προσομοίωση έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab/Simulink.

Αρχικά γίνεται περιγραφή και ανάλυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ειδικότερα της αιολικής ενέργειας. Στο δεύτερο κεφάλαιο, «Ανεμογεννήτριες» (Α/Γ), μελετάται η λειτουργία της Α/Γ και τα δομικά της στοιχεία. Εν συνεχεία περιγράφονται τα συστήματα (σταθερών ή μεταβλητών στροφών) και οι τύποι Α/Γ. Στο τέλος του δεύτερου κεφαλαίου αναλύεται ο μηχανικός και ηλεκτρικός έλεγχος ισχύος της Α/Γ και προσδιορίζεται η βύθιση τάσεως. Στο κεφάλαιο 3 μελετώνται τα αιολικά πάρκα, τα είδη και οι απαιτήσεις σύνδεσής τους με το δίκτυο. Στο κεφάλαιο 4, παρουσιάζεται η μοντελοποίηση του συστήματος Α/Γ DFIG. Ειδικότερα περιγράφεται η επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσία και περιγράφονται οι καταστάσεις λειτουργίας της, ο μετατροπέας ισχύος της DFIG από πλευράς δικτύου και δρομέα αλλά και οι απώλειες μαγνήτισης. Εν συνεχεία παρουσιάζεται το μοντέλο d-q και το σύστημα ελέγχου, η μοντελοποίηση του αεροδυναμικού μέρους της Α/Γ, ο μετατροπέας back-to-back και τα υποσυστήματα ελέγχου που χρησιμοποιούνται από την Α/Γ. Στο κεφάλαιο 5 περιγράφεται το μοντέλο προσομοίωσης του αιολικού πάρκου. Η προσομοίωση έγινε στο περιβάλλον Simulink του Matlab και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται συνοπτικά μαζί με σχόλια για τη λειτουργία και την απόκριση του συστήματος.

Λέξεις κλειδιά: Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών, γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης, διανυσματικός έλεγχος, d-q μοντέλο, ρυθμιστής στροφών, μεταβατικές καταστάσεις, βύθιση τάσης

ABSTRACT

The subject of this thesis is bibliographic in its entirety. The content of the work was collected from various sources that are in the text and in the Bibliography chapter as well.

The subject of this thesis is the analysis and simulation of a wind farm 9MW consists of 6 doubly fed induction generator (DFIG) turbines, 1.5 MW each of them. The simulation was conducted with Matlab Simulink software.

Initially, chapter 1 is a description and analysis of renewable energy sources (RES), focusing on aeolian energy. In chapter 2, the operation and structure of wind turbine is studied. Moreover, the fixed and variable speed wind turbines as well the types of wind turbines are described. Ending the second chapter the mechanical and electrical power control of wind turbine is analyzed and the voltage dip is determined. In chapter 3 the wind farms are analyzed, as well as the types and their grid connection requirements. In chapter 4, the modeling of the DFIG turbine system is presented especially its operation and converter both at grid and rotor side and the loss of magnetization. Moreover, the d-q model is presented, the aerodynamic control of the wind turbine modeling, the back-to-back converter and the control subsystems used by the wind turbine. In chapter 5 the wind farm simulation model is described. The simulation was performed in the Simulink environment of Matlab and the results are summarized and presented with comments about the operation of the system.

Keywords: Variable speed wind turbine, doubly fed induction generator, vector control, d-q model, pitch controller, speed regulator, transient states, voltage dip

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με το πέρας της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια κ. Μαρία Ιωαννίδου για την βοήθεια που μου προσέφερε και τις πολύτιμες οδηγίες που μου έδωσε.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υλική και ηθική στήριξη που μου προσέφεραν, όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

Τέλος, ευχαριστώ τους φίλους και συνοδοιπόρους μου, με τους οποίους πέρασα τα φοιτητικά μου χρόνια και μοιράστηκα αξέχαστες εμπειρίες, τους δασκάλους μου που συνέβαλλαν στην επίτευξη των στόχων μου και όλους τους κοντινούς μου ανθρώπους για την έμπρακτη και αμέριστη υποστήριξή τους σε κάθε μου βήμα.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	IV
ABSTRACT	V
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	VI
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ – ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	1
1.1. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	1
1.2. Αιολική ενέργεια	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ.....	7
2.1. Λειτουργία ανεμογεννήτριας.....	7
2.2. Δομικά στοιχεία ανεμογεννήτριας.....	8
2.3. Συστήματα ανεμογεννήτριας	11
2.3.1. Α/Γ σταθερών στροφών (fixed speed wind turbines).....	11
2.3.2. Α/Γ μεταβλητών στροφών (variable speed wind turbines)	11
2.4. Τύποι ανεμογεννήτριας.....	13
2.4.1. Ασύγχρονες γεννήτριες.....	13
2.4.2. Σύγχρονες γεννήτριες	15
2.5. Έλεγχος ανεμογεννήτριας.....	15
2.5.1. Μηχανικός έλεγχος ισχύος	16
2.5.1.1. Παθητικός έλεγχος απώλειας στήριξης (passive stall control)	17
2.5.1.2. Ενεργός έλεγχος απώλειας στήριξης (active stall control)	17
2.5.1.3. Γωνία βήματος πτερυγίου (pitch control)	18
2.5.2. Ηλεκτρονικός έλεγχος ισχύος	19
2.6. Βύθιση τάσεως	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ.....	23
3.1. Είδη αιολικών πάρκων	23
3.2. Απαιτήσεις σύνδεσης αιολικού πάρκου στο δίκτυο	24
3.2.1. Ανοχή σε βυθίσεις τάσης και απόκριση σε καταστάσεις σφαλμάτων	25
3.2.2. Έλεγχος ενεργού ισχύος και συχνότητας.....	27
3.2.3. Έλεγχος τάσης και άεργου ισχύος.....	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ DFIG	29
4.1. Επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας (DFIG).....	29
4.2. Καταστάσεις λειτουργίας DFIG	29
4.2.1. Κανονική λειτουργία.....	29
4.2.2. Συμμετρικές βυθίσεις τάσεως	31
4.2.3. Ασύμμετρες βυθίσεις τάσεως	33
4.3. Μετατροπέας ισχύος της DFIG	37
4.3.1. Μετατροπέας από πλευράς δικτύου.....	39
4.3.2. Μετατροπέας πλευράς δρομέα	41

4.4. Ισοδύναμο κύκλωμα DFIG	42
4.5. Απώλειες μαγνήτισης της DFIG.....	44
4.6. Αεροδυναμική ισχύς.....	44
4.7. Διανυσματικός έλεγχος DFIG	48
4.7.1. Μετασχηματισμός Park.....	48
4.7.2. Μοντέλο d-q στο χώρο κατάστασης	50
4.7.3. Μοντέλο d-q σε στατό πλαίσιο αναφοράς	51
4.7.4. Η ισχύς στο d-q μοντέλο	51
4.8. Σύστημα ελέγχου της DFIG.....	52
4.8.1. Σύστημα ελέγχου από την πλευρά του δρομέα (RSC)	52
4.8.2. Σύστημα ελέγχου από τη πλευρά του δικτύου (GSC).....	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ	59
5.1. Περιγραφή του μοντέλου.....	59
5.2. Μοντελοποίηση αεροδυναμικού τμήματος.....	64
5.3. Βραχυκυκλώματα φάσεων A, B και C	65
5.3.1. Μονοφασικό βραχυκύκλωμα φάσης A ως προς γη	65
5.3.2. Διφασικό βραχυκύκλωμα φάσεων B και C.....	70
5.3.3. Τριφασικό βραχυκύκλωμα φάσεων A, B και C ως προς γη.....	74
5.3.4. Τριφασικό βραχυκύκλωμα φάσεων A, B και C στο κοινό σημείο σύνδεσης με το αιολικό πάρκο	79
5.4. Βύθιση τάσεως κατά 15% στο δίκτυο	82
5.4.1. Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου από 6m/s στα 16m/s.....	82
5.4.2. Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου από 16m/s στα 6m/s.....	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	89
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	91

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ – ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Τελευταία παρατηρείται έντονο ενδιαφέρον προς την έρευνα και ανάπτυξη ολοένα και πιο τεχνολογικά αναπτυγμένων καινοτομιών που στόχο έχουν την αποδοτικότερη αξιοποίηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Αυτό οφείλεται στην ανάγκη απεξάρτησης των χωρών από την χρήση ορυκτών καυσίμων η εκμετάλλευση των οποίων έχει οικονομικές, πολιτικές και περιβαλλοντικές αρνητικές συνέπειες.

Ιδιαίτερα εντυπωσιακή είναι η ραγδαία ανάπτυξη της εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας. Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται έχουν ωριμάσει για τη μεγάλης κλίμακας παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του ανέμου από ανεμογεννήτριες και τεχνολογικά εξελιγμένα αιολικά πάρκα. Οι ενεργειακές αγορές, λόγω αυτής της εξέλιξης, αποδεικνύονται επενδυτικά βιώσιμες και δελεαστικές. Οι στόχοι που τέθηκαν για το 2020 στοχεύουν στην αύξηση της εγκατάστασης αιολικών πάρκων.

1.1. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Σύμφωνα με την Οδηγία 2001/77/ΕΚ [1] ως Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) ορίζονται οι ήπιες μη ορυκτές εκμεταλλεύσιμες μορφές ενέργειας που προέρχονται είτε από φυσικές πηγές όπως ο ήλιος και η γεωθερμική ενέργεια είτε από φυσικές διαδικασίες όπως ο άνεμος ή η κίνηση του νερού [2], [3].

Είναι οι πρώτες πηγές ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος και μέχρι τις αρχές του 20^{ου} αιώνα σχεδόν αποκλειστικά, οπότε και στράφηκε στην έντονη χρήση του άνθρακα και των υδρογονανθράκων [4]. Αργότερα, οι μεγάλες πετρελαϊκές κρίσεις (1973, 1979) συνέβαλαν στην ευρύτερη αξιοποίηση των ΑΠΕ, στρέφοντας το ενδιαφέρον των βιομηχανικά ανεπτυγμένων χωρών στην παραγωγή ενέργειας από αυτές, στροφή απαραίτητη λόγω της συμβολής τους στην μείωση της ενεργειακής εξάρτησης από τα συμβατικά καύσιμα και στην απορρέουσα μείωση των περιβαλλοντικών προβλημάτων [5].

Οι σημαντικότερες μορφές ΑΠΕ που είναι σήμερα εκμεταλλεύσιμες είναι οι [6]:

- 1. Αιολική ενέργεια:** η κινητική ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται αρχικά σε μηχανική ενέργεια και στη συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω των ανεμογεννητριών.
- 2. Ηλιακή ενέργεια:** Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από την εκμετάλλευση του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας με απευθείας μετατροπή σε ηλεκτρική μέσω των «φωτοβολταϊκών στοιχείων». Το μοναδικό τους μειονέκτημα είναι ότι απαιτούν την

διάθεση μεγάλων επιφανειών για την εγκατάστασή τους και κυρίως το υψηλό κόστος κτήσεώς .

- 3. Υδροηλεκτρική ενέργεια:** Χρησιμοποιήθηκε από τα πρώτα βήματα ανάπτυξης των ηλεκτρικών εφαρμογών, κυρίως με την κατασκευή φραγμάτων και την δημιουργία υδάτινων ταμιευτήρων μεγάλων ποταμών.
- 4. Βιομάζα:** Είναι το αποτέλεσμα της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης των φυτών μέσω της οποίας μετασχηματίζεται η ηλιακή ενέργεια σε βιομάζα. Ο όρος υποδηλώνει τα κάθε φύσεως υποπροϊόντα και κατάλοιπα της φυσικής, ζωικής, δασικής και αλιευτικής παραγωγής, πριν ή μετά την βιομηχανική τους επεξεργασία, καθώς και τα αστικά λύματα και τα απορρίμματα. Η αξιοποίησή της γίνεται χωρίς κατεργασία (απευθείας καύση) ή με διάφορες θερμοχημικές (π.χ. πυρόλυση, αεριοποίηση) ή βιοχημικές διεργασίες (π.χ. αερόβια ζύμωση).
- 5. Γεωθερμική ενέργεια:** Αποτελεί την θερμική ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της γης. Συγκεκριμένα γίνεται χρήση της υψηλής ενθαλπίας (>150°C) για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Ανάλογα με την θερμοκρασία των γεωθερμικών ρευστών που λαμβάνονται με γεωτρήσεις, διακρίνεται σε «χαμηλής» (25-100°C), «μέσης» (100-150°C) και «υψηλής» (άνω των 150°C) ενθαλπίας.
- 6. Ενέργεια από την θάλασσα:** Πρόκειται για ενέργεια που προέρχεται από α) παλίρροιες, όπου γίνεται εκμετάλλευση της παλίρροιας, το νερό αποθηκεύεται κατά την αύξηση της στάθμης και κατά την άμπωτη περνάει από τουρμπίνα, παράγοντας ηλεκτρισμό, β) κύματα με εκμετάλλευση της δυναμικής ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων, την μετατροπή τους σε μηχανική και τον μετασχηματισμό της σε ηλεκτρική και γ) από τους ωκεανούς με εκμετάλλευση της θερμοκρασιακής διαφοράς στα στρώματα του ωκεανού.
- 7. Κυψέλες καυσίμου:** Αποτελεί την ηλεκτρομηχανική μετατροπή της ενέργειας σε ηλεκτρική με τη χρήση υδρογόνου.

Μόνο τρεις είναι οι κύριες πηγές ενέργειας που είναι ανανεώσιμες: η ηλιακή, η γεωθερμική και η παλιρροϊκή. Όλες οι άλλες ανανεώσιμες πηγές προέρχονται από την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στη Γη, για το λόγο αυτό η αιολική, η υδροηλεκτρική, η βιομάζα, η κυματική και η θερμοκρασιακή διαφορά των ωκεανών θεωρούνται δευτερογενείς, ή έμμεσες μορφές ηλιακής ενέργειας [7].

Πλεονέκτημα και βασικό χαρακτηριστικό των ΑΠΕ και κυρίως της αιολικής ενέργειας είναι τα άφθονα και ανεξάντλητα αποθέματα και οι ελάχιστες αρνητικές επιπτώσεις τους στο περιβάλλον καθώς ουσιαστικά έχουν μηδενικά κατάλοιπα και απόβλητα. Σε σχέση με την χρονική κλίμακα της ανθρώπινης ζωής και παρουσίας στη Γη είναι ανεξάντλητες

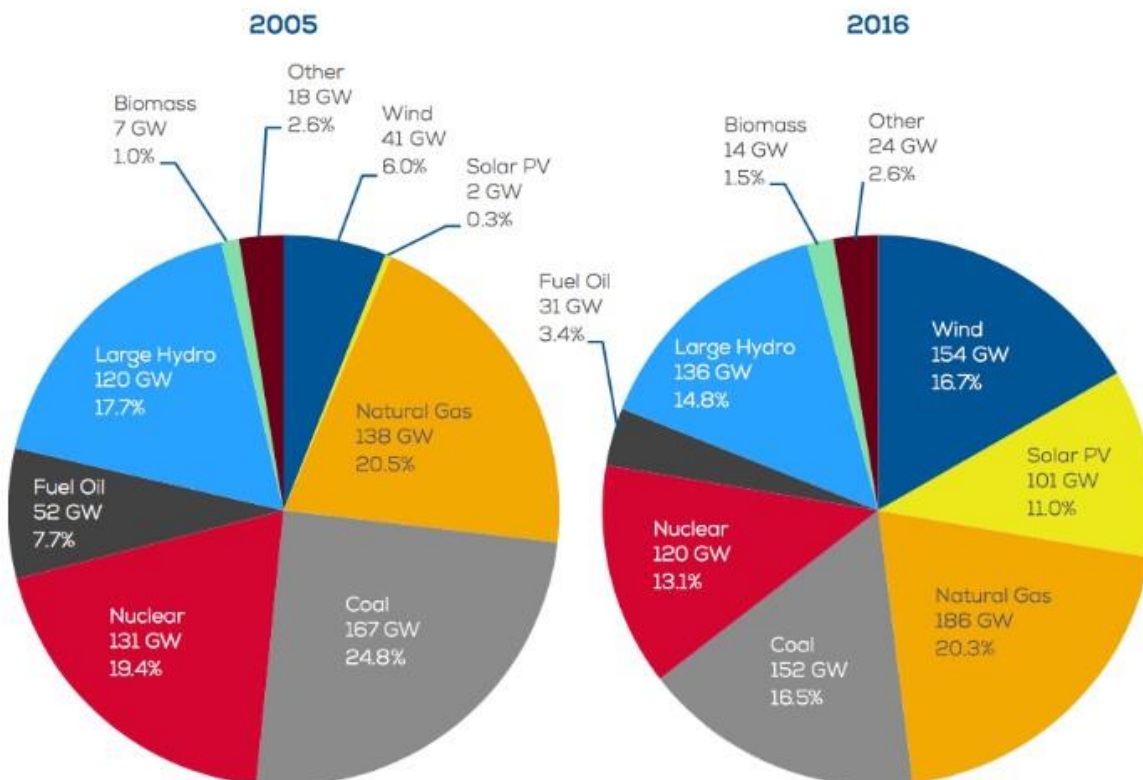
καθώς η εξαντλησιμότητά τους εξαρτάται από τη ζωή του ήλιου. Ανεξάρτητα από το ρυθμό εκμετάλλευσής τους συνεχίζουν να είναι άμεσα διαθέσιμες (π.χ. αιολική ενέργεια) ή αναπληρώνονται σε σύντομο χρονικό διάστημα (π.χ. βιομάζα) [7]. Επιπλέον, μπορούν να βοηθήσουν την ενεργειακή αυτάρκεια μικρών και αναπτυσσόμενων χωρών, ως εναλλακτική πρόταση σε σχέση με την οικονομία του πετρελαίου, ενώ ταυτόχρονα καταργείται η ανάγκη για μεγάλες μονάδες παραγωγής ενέργειας και για μεταφορά ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις.

Από την άλλη, οι ΑΠΕ έχουν μικρό συντελεστή απόδοσης (πολλές φορές και μικρότερο του 30%) και γι' αυτό χρησιμοποιούνται ως συμπληρωματικές και όχι για την κάλυψη αναγκών σε μεγάλα αστικά κέντρα. Επιπλέον, η παροχή και απόδοση της αιολικής, υδροηλεκτρικής και ηλιακής ενέργειας εξαρτάται άμεσα από την εποχή του έτους, το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται ενώ οι αιολικές μηχανές θεωρούνται μη κομψές από αισθητική άποψη κι ότι θορυβώδεις και τα υδροηλεκτρικά έργα λέγεται ότι προκαλούν έκλυση μεθανίου από την αποσύνθεση των φυτών που βρίσκονται κάτω απ' το νερό κι έτσι συντελούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Μελέτες έδειξαν ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση οφείλεται κυρίως στην παραγωγή, το μετασχηματισμό και τη χρήση των συμβατικών καυσίμων (άνθρακας, πετρέλαιο) καταδεικνύοντας την ανάγκη για ανάπτυξη των ΑΠΕ. Η ανάπτυξη των ΑΠΕ για πολλές χώρες αποτελεί σημαντική πηγή ενέργειας, τόσο σε τοπικό όσο και σε εθνικό επίπεδο. Ειδικότερα, για το σύνολο των Κρατών-Μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, μέχρι το 2020 προβλέπεται [5], [8]:

- 20% μείωση των εκπομπών των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 (Οδηγία 2009/29/EK)
- 20% διείσδυση των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας (Οδηγία 2009/28/EK)
- 20% εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας

Στο σχήμα 1.1. παρουσιάζεται η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των ενεργειακών μορφών στην παραγωγή ενέργειας στην Ε.Ε. για τα έτη 2005 και 2016 καταδεικνύοντας την αύξηση του μεριδίου της αιολικής ενέργειας (από 6% σε 16,7%) και την σημαντική μείωση της χρήσης άνθρακα (από 24,8% σε 16,5%) για την ηλεκτροπαραγωγή. Την ίδια περίοδο η συνολική συμμετοχή των ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αυξήθηκε από 24% το 2005 σε 46% το 2016 [9].



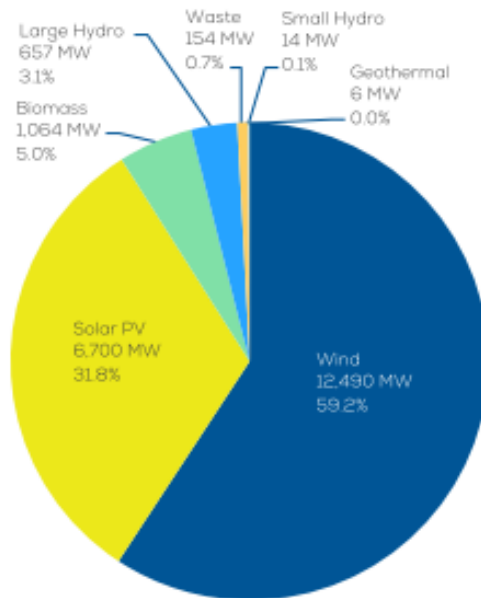
Σχήμα 1.1. Μερίδιο ενεργειακών πηγών στην ηλεκτροπαραγωγή στην Ε.Ε. (2005, 2016) [9].

1.2. Αιολική ενέργεια

Αιολική ενέργεια είναι η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση του πνέοντος ανέμου. Μπορεί να μετατραπεί σε άλλες μορφές ενέργειας με χρήση μιας μηχανής που ονομάζεται ανεμογεννήτρια στην οποία ο άνεμος περιστρέφει ειδικά πτερύγια και παράγει μηχανικό έργο (ανεμόμυλοι) ή ηλεκτρικό έργο (ηλεκτρογεννήτρια) [10].

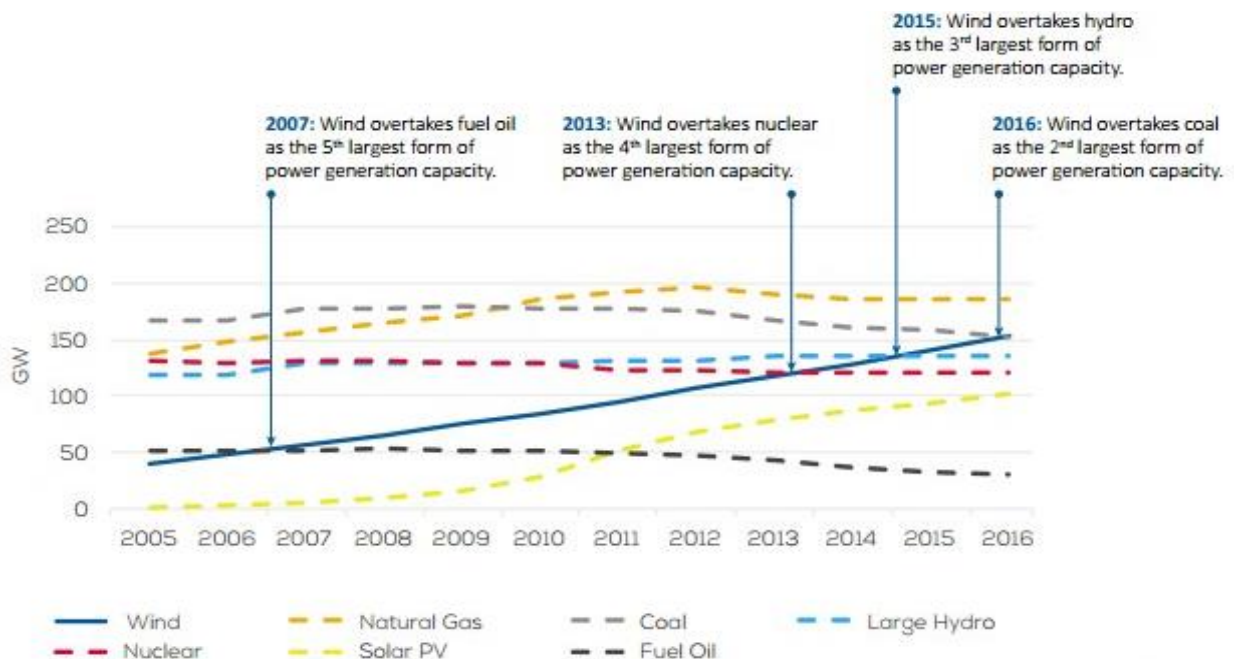
Η εκμετάλλευση της ενέργειας του ανέμου από τον άνθρωπο αποτελεί μία πρακτική που βρίσκει τις ρίζες της στην αρχαιότητα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας είναι τα ιστιοφόρα και οι ανεμόμυλοι. Σήμερα, αποτελεί την κυριότερη πηγή ενέργειας και χρησιμοποιείται ευρέως την τελευταία δεκαετία τόσο στην Ευρώπη όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο. Για την αξιοποίησή της χρησιμοποιούνται ανεμογεννήτριες (Α/Γ).

Σύμφωνα με το WindEurope στην Ε.Ε. το 2016 το 86% των νέων πηγών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας προήλθε από ΑΠΕ που άγγιξαν συνολικά τα 21,1GW, με το 59,2% (12490MW) να προέρχεται από αιολική ενέργεια (σχήμα 1.2). Ήταν η 9^η συνεχόμενη χρονιά όπου η συμβολή των ΑΠΕ ήταν μεγαλύτερη από 55% [9].



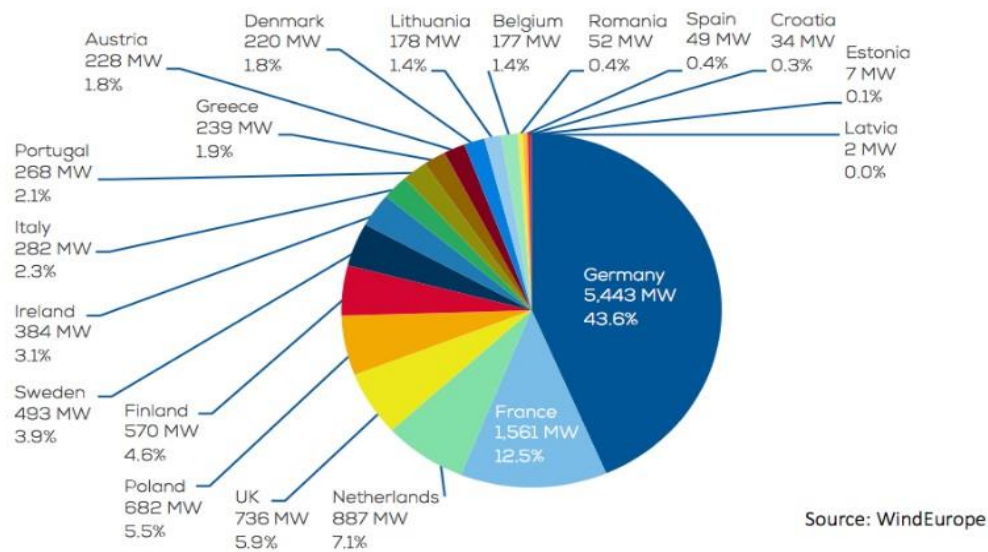
Σχήμα 1.2. Μερίδιο ενεργειακών πηγών στην ηλεκτροπαραγωγή στην Ε.Ε. (2005, 2016) [9].

Κατά το ίδιο έτος, στην Ε.Ε. το μερίδιο της νέας εγκατεστημένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά πάρκα ξεπέρασε την παραγόμενη από τον άνθρακα ενέργεια (σχήμα 1.3.) [9].



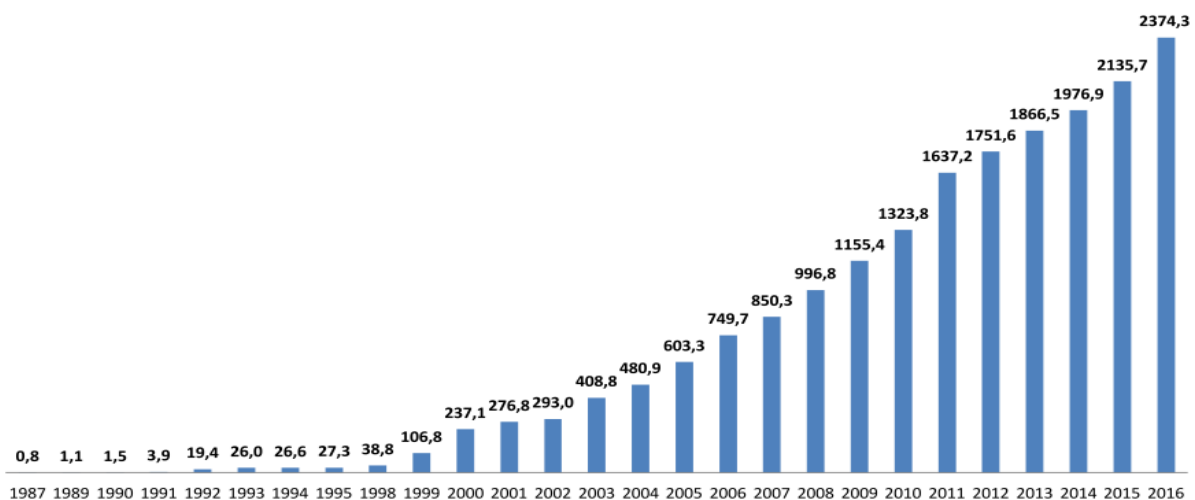
Σχήμα 1.3: Ετήσια συνολική αιολική ισχύς στην Ε.Ε. (2005 έως 2016) [9]

Κυρίαρχη θέση στη νέα εγκατεστημένη αιολική ισχύ έχει η Γερμανία με μερίδιο 43,6% ενώ η Ελλάδα έχει μερίδιο 1,9% (σχήμα 1.4.) [9].



Σχήμα 1.4. Νέα εγκατεστημένη αιολική ισχύς στις χώρες της Ε.Ε. το 2016 [9]

Στατιστικές μελέτες της Ελληνικής Επιστημονικής Ένωσης Αιολικής Ενέργειας (ΕΛΕΤΑΕΝ) έδειξαν ότι το 2016 αποτέλεσε την 2^η καλύτερη χρονιά για την αιολική ενέργεια στην Ελλάδα. Η συνολική καθαρή εγκατεστημένη αιολική ισχύς κατά το 2016 ήταν 238,55MW. Είναι η 2^η καλύτερη ετήσια επίδοση μετά το ρεκόρ του 2011 όπου εγκαταστάθηκαν 313MW. Στο τέλος του 2016 το σύνολο της αιολικής ισχύος που βρισκόταν σε εμπορική ή δοκιμαστική λειτουργία ήταν 2374,3MW, παρουσιάζοντας 11,2% αύξηση σε σχέση με το 2015 (σχήμα 1.5.) [11], [12]. Στην Ελλάδα, μία χώρα με έντονο αιολικό δυναμικό, γίνονται κινήσεις για αύξηση της αξιοποίησής του.



Σχήμα 1.5: Ετήσια συνολική αιολική ισχύς στην Ελλάδα (1987 έως 2016) [11]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας γίνεται εφικτή με την εγκατάσταση και λειτουργία ανεμογεννητριών. Πρόκειται για σύγχρονα συστήματα εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας που αφορούν σχεδόν αποκλειστικά μηχανές μετατροπής της ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική [10]. Οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, σε χερσαία ή θαλάσσια έκταση, στις οποίες τοποθετείται μεγάλος αριθμός ανεμογεννητριών ονομάζονται αιολικό πάρκο ή Αιολικός Σταθμός Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΣΠΗΕ). Τα αιολικά πάρκα εκτός από τις ανεμογεννήτριες περιλαμβάνουν καλώδια μεταφοράς ρεύματος, μετεωρολογικούς ιστούς, σταθμούς μετασχηματισμού και βοηθητικές υποδομές. Κατά τη λειτουργία τους δεν ρυπαίνουν άμεσα την ατμόσφαιρα με τη παραγωγή CO₂ ή άλλων αερίων αλλά έμμεσα με την παραγωγή, μεταφοράς και εγκατάστασης αλλά και λόγω της δυνατότητας ανακύκλωσης ή μη, υλικών μετά το πέρας λειτουργίας του ΑΣΠΗΕ.

2.1. Λειτουργία ανεμογεννήτριας

Η βασική αρχή λειτουργίας τους είναι απλή και έχει σχέση με την μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική, μέσω της δέσμευσης αυτής και της χρήσης κατάλληλα σχεδιασμένων αεροδυναμικών συσκευών (ρότορας ανεμογεννήτριας). Στην συνέχεια, η παραγόμενη κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική (σύστημα μετάδοσης κίνησης) και εν τέλει σε ηλεκτρική (ηλεκτρική γεννήτρια) [13]. Συνδυάζονται δηλαδή αεροδυναμικές, μηχανολογικές και ηλεκτρολογικές γνώσεις [10].

Οι ανεμογεννήτριες κατατάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες σύμφωνα με τον προσανατολισμό των αξόνων τους σε σχέση με τη ροή του αέρα (σχήμα 2.1.) [10]:

- **Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα** (HAWT - Horizontal Axis Wind Turbines) όπου ο δρομέας είναι τύπου έλικα και ο άξονας περιστρέφεται ώστε να βρίσκεται συνεχώς παράλληλα προς τον άνεμο. Είναι ο τύπος Α/Γ που έχει κυριαρχήσει παγκοσμίως διότι παρουσιάζει καλύτερο αεροδυναμικό βαθμό απόδοσης.
- **Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα** (VAWT - Vertical Axis Wind Turbines) που παραμένει σταθερός και είναι κάθετος ως προς το επίπεδο του εδάφους.



Σχήμα 2.1. Ανεμογεννήτριες οριζόντιου/κάθετου άξονα [10]

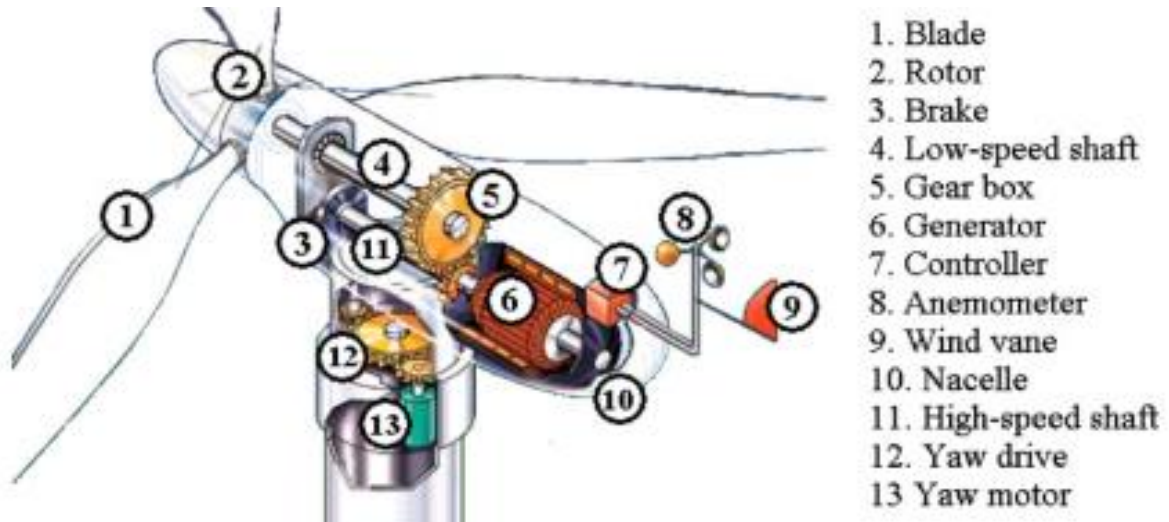
Η λειτουργία της ανεμογεννήτριας βασίζεται σε τρία επιμέρους τμήματα, μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η μετατροπή της ενέργειας του ανέμου σε μορφή αξιοποιήσιμη για τον άνθρωπο. Πρόκειται για το [14]:

- **Μηχανικό σύστημα** που είναι υπεύθυνο για την μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική, μέσω του αεροκινητήρα. Συνήθως περιλαμβάνεται κιβώτιο ταχυτήτων (πολλαπλασιαστής στροφών) μεταξύ του αεροκινητήρα και της γεννήτριας.
- **Ηλεκτρικό σύστημα** που είναι υπεύθυνο για την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική, μέσω της γεννήτριας. Επιπλέον υπάρχει μετατροπέας ισχύος (AC/DC/AC) που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ροής ισχύος από τη γεννήτρια στο δίκτυο ή το φορτίο.
- **Σύστημα ελέγχου** που είναι υπεύθυνο για την προσαρμογή της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας στις εκάστοτε συνθήκες ανέμου και διακυμάνσεις των παραμέτρων του ηλεκτρικού δικτύου στο οποίο είναι συνδεδεμένη η ανεμογεννήτρια. Επιτηρεί την ασφάλεια της Α/Γ και μεγιστοποιεί την απόδοσή της.

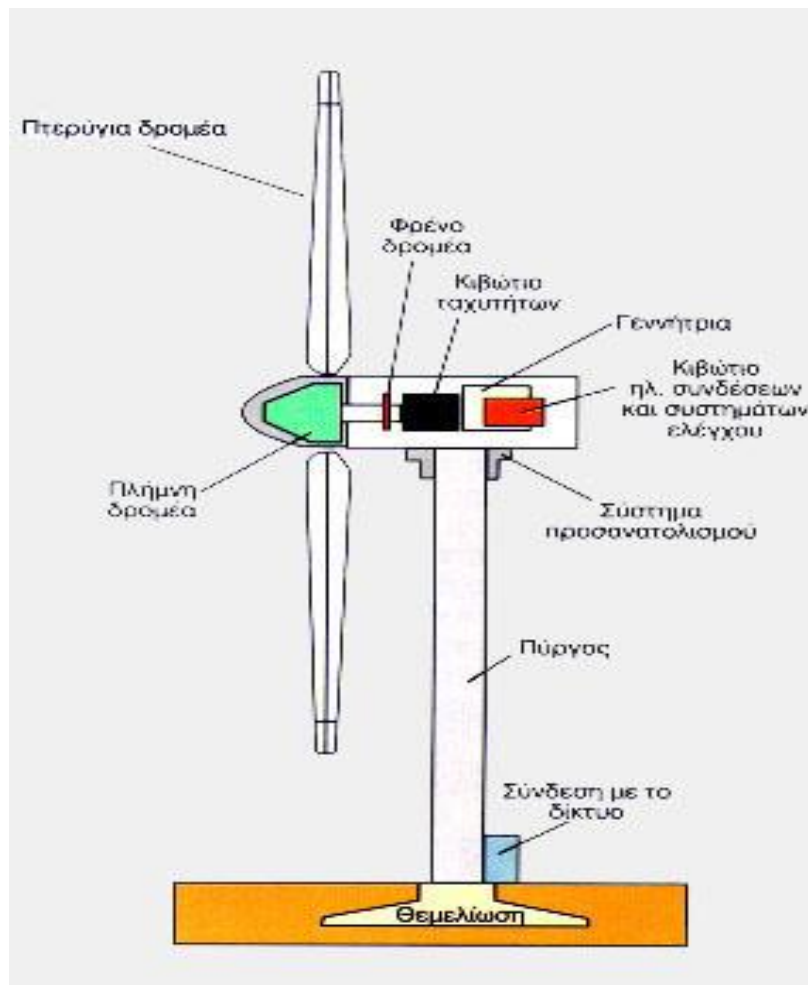
2.2. Δομικά στοιχεία ανεμογεννήτριας

Το μηχανικό σύστημα μιας Α/Γ οριζοντίου άξονα είναι το σύστημα μετάδοσης της κίνησης και αποτελείται από τον κύριο άξονα, τα έδρανα και το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών που προσαρμόζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στη σύγχρονη ταχύτητα

της ηλεκτρογεννήτριας. Η ταχύτητα περιστροφής παραμένει σταθερή κατά την κανονική λειτουργία της μηχανής. Αναλυτικότερα στα σχήματα 2.2. και 2.3. φαίνεται η τομή μιας τυπικής Α/Γ οριζόντιου άξονα που περιλαμβάνει τα εξής δομικά στοιχεία [10], [15].



Σχήμα 2.2. Μέρη / Τομή τυπικής Α/Γ οριζόντιου άξονα [14]



Σχήμα 2.3. Μέρη τυπικής Α/Γ οριζόντιου άξονα [10]

- Πύργος (Tower) που είναι κατασκευασμένος από χαλύβδινο κέλυφος ή χωροδικτύωμα.
- Πτερύγια-πτερωτές (blades), δύο ή τρία, στα οποία δημιουργείται από τον άνεμο άνοση (lift) που έχει ως αποτέλεσμα μια ροπή γύρω από τον άξονα περιστροφής η οποία αναγκάζει τα πτερύγια να περιστρέφονται.
- Δρομέας (rotor) που αποτελείται από δύο ή τρία πτερύγια από ενισχυμένο πολυεστέρα και το κεντρικό σημείο στο οποίο προσδένονται τα πτερύγια. Είναι μία πλήμνη σταθερά ή με δυνατότητα περιστροφής γύρω από το διαμήκη άξονα μεταβάλλοντας το βήμα.
- Φρένο (brakes), ένα δισκόφρενο που μπορεί να λειτουργεί μηχανικά, ηλεκτρικά ή υδραυλικά για να σταματήσει τον κινητήρα σε περίπτωση ανάγκης.
- Άξονας χαμηλής ταχύτητας (Low-speed Shaft) ο οποίος κινείται από τον ρότορα περίπου στις 30 με 60 στροφές ανά λεπτό.
- Κιβώτιο ταχυτήτων (gear box). Οι ταχύτητες συνδέουν τον άξονα χαμηλής με τον άξονα υψηλής ταχύτητας και αυξάνουν την ταχύτητα περιστροφής από τις 30-60 στροφές ανά λεπτό στις 1200-1500 στροφές ανά λεπτό. Η ταχύτητα περιστροφής απαιτείται για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Το κιβώτιο ταχυτήτων είναι ένα ακριβό (και βαρύ) μέρος της ανεμογεννήτριας και οι μηχανικοί μελετούν γεννήτριες που θα μπορούν να λειτουργήσουν σε χαμηλότερες ταχύτητες περιστροφής και δε θα απαιτούνται κιβώτια ταχυτήτων.
- Γεννήτρια (Generator) η οποία συνήθως παράγει εναλλασσόμενο ρεύμα 60 κύκλων.
- Ελεγκτής (Controller) ο οποίος θέτει σε λειτουργία τη μηχανή σε ταχύτητες ανέμου περίπου 8-16 μίλια την ώρα και διακόπτει τη λειτουργία της περίπου στα 65 μίλια την ώρα. Οι ανεμογεννήτριες δεν λειτουργούν σε ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες των 65 μιλίων την ώρα γιατί μπορεί να υπερθερμανθούν ή/και να σπάσουν τα πτερύγιά τους.
- Ανεμόμετρο (Anemometer) που μετράει την ταχύτητα του ανέμου και μεταβιβάζει τα ανεμολογικά δεδομένα σε έναν ελεγκτή.
- Ανεμοδείκτης (Wind vane) που υπολογίζει την διεύθυνση και επικοινωνεί με τον οδηγό εκτροπής ώστε να προσανατολίζεται στον άνεμο.
- Κέλυφος (Nacelle) με το οποίο συνδέεται το ρότορας και βρίσκεται πάνω απ' τον πύργο. Περιλαμβάνει το κιβώτιο ταχυτήτων, τους άξονες υψηλής και χαμηλής ταχύτητας, τη γεννήτρια, τον ελεγκτή και το φρένο. Τα μέρη εντός του κελύφους προστατεύονται από ένα κάλυμμα. Κάποια κελύφη είναι μεγάλα ώστε να μπορεί ο τεχνικός να στέκεται όρθιος ενώ δουλεύει.
- Άξονας υψηλής ταχύτητας (High-speed Shaft) που οδηγεί τη γεννήτρια.

- Οδηγός εκτροπής (Yaw drive) ο οποίος φέρνει τις Α/Γ προς τον άνεμο. Χρησιμοποιείται για να αφήνει το ρότορα να βρίσκεται προς τον άνεμο καθώς αυτός μεταβάλλεται. Οι ανεμογεννήτριες που λειτουργούν υπήνεμα δεν απαιτούν οδηγό εκτροπής. Ο άνεμος μόνος φέρνει υπήνεμα το ρότορα.
- Κινητήρας εκτροπής (Yaw motor) που δίνει ενέργεια στον οδηγό εκτροπής

2.3. Συστήματα ανεμογεννήτριας

Ανάλογα με τις αρχές λειτουργίας και ελέγχου οι Α/Γ διακρίνονται σε σταθερών και μεταβλητών στροφών. Αναλυτικότερα δύο κυριότερες **κατηγορίες συστημάτων** είναι οι εξής [16]:

2.3.1. Α/Γ σταθερών στροφών (fixed speed wind turbines)

Είναι απλές στην κατασκευή, έχουν μικρό βάρος και σχετικά χαμηλότερο κόστος από αυτές της μεταβλητής ταχύτητας που οφείλεται στο ότι δε χρησιμοποιείται μετατροπέας ισχύος και άρα έχει μειωμένες ανάγκες συντήρησης ενώ αποτελεί μια απλή ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού, ευρέως διαδεδομένη. Λειτουργούν σε περιορισμένο εύρος ταχύτητας περιστροφής λίγο μεγαλύτερο από τη σύγχρονη ταχύτητα. Επιπλέον οι Α/Γ σταθερών στροφών υφίστανται μηχανικές καταπονήσεις λόγω των μεταβολών της μηχανικής ροπής από τις μεταβολές του ανέμου. Επειδή δεν μπορούν να ακολουθήσουν την πάντα μεταβαλλόμενη ταχύτητα του ανέμου, η μετατροπή της ενέργειας δεν είναι τόσο αποδοτική όσο στα συστήματα μεταβλητής ταχύτητας. Στη περίπτωση ασθενών δικτύων οι διαταραχές αυτές παρουσιάζουν έντονες διακυμάνσεις, κάτι που μεταφράζεται σε διαταραχές τάσης φλίκερ. Για να ρυθμιστεί η άεργος ισχύς που καταναλώνουν αυτού του είδους οι Α/Γ απαιτείται σύνδεση πυκνωτών. Επιπλέον, η σύνδεσή τους με το δίκτυο γίνεται απ' ευθείας χωρίς περαιτέρω μετατροπή ή έλεγχο της εγχεόμενης στο δίκτυο ισχύος. Για τους προαναφερθέντες λόγους και λόγω των αυστηρών κριτηρίων σύνδεσης στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας που επιβάλλονται, οι Α/Γ αυτές δεν χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια [16].

2.3.2. Α/Γ μεταβλητών στροφών (variable speed wind turbines)

Λειτουργούν σε ένα ευρύτερο φάσμα ταχυτήτων πάνω και κάτω από τη σύγχρονη ταχύτητα. Στις Α/Γ μεταβλητών στροφών, η ταχύτητα περιστροφής βελτιστοποιείται με βάση

την τιμή του εισερχόμενου ανέμου ώστε να αυξηθεί η ενεργειακή απόδοση. Για τη σύνδεσή τους με το δίκτυο απαιτείται η απόξευση της συχνότητας του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους με αυτή του δικτύου. Έτσι γίνεται κυρίως χρήση του AC/DC/AC μετατροπέα. Έχουν ευρεία εφαρμογή λόγω της αυξημένης ενεργειακής απόδοσης που παρουσιάζουν, προσαρμόζοντας την ταχύτητα περιστροφής ανάλογα με αυτή του ανέμου για μέγιστη αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας. Αυτό αποτελεί ένα σαφές πλεονέκτημα των Α/Γ αυτών, διότι η εν λόγω προσαρμογή μειώνει τις μηχανικές καταπονήσεις στα πτερύγια, στο σύστημα μετάδοσης κίνησης και στο δομικό σύστημα. Επιπλέον δίνεται η δυνατότητα απαλλαγής από το κιβώτιο ταχυτήτων, οπότε μειώνονται αρκετά οι συντηρήσεις. Η ποιότητα ισχύος, που παρέχεται στο δίκτυο, είναι αρκετά βελτιωμένη, καθώς δεν υπάρχουν διακυμάνσεις στην έξοδο. Επιπροσθέτως, οι Α/Γ μεταβλητών στροφών παρέχουν τη δυνατότητα ρύθμισης του συντελεστή ισχύος με κατάλληλη έγχυση άεργου ισχύος, δυνατότητα που τις εναρμονίζει με τα νέα πρότυπα ποιότητας ισχύος. Το βασικότερο μειονέκτημά τους είναι πως απαιτούνται ηλεκτρονικά ισχύος τα οποία είναι ευαίσθητα και πολύ ακριβά.

Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών έχουν πάρει την θέση των ανεμογεννητριών σταθερών στροφών καθώς μπορούν να ελεγχθούν κατάλληλα και να λειτουργούν με υψηλό αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος σε ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων ανέμου ενώ ταυτόχρονα μειώνουν τόσο τις μηχανικές καταπονήσεις όσο και τον αεροδυναμικό θόρυβο. Η αιολική ενέργεια, και η προσλαμβανόμενη ισχύς δεν είναι σταθερές κατά τη διάρκεια της μέρας, αλλά μεταβάλλονται συνεχώς. Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να απορροφήσει μια ανεμογεννήτρια σε μια συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου εξαρτάται από την βέλτιστη τιμή της ταχύτητας περιστροφής του άξονα της Α/Γ. Η επίτευξη παραγωγής μέγιστης ισχύος από την παρεχόμενη αιολική ενέργεια αποτελεί το μοναδικό τρόπο αποτελεσματικής αξιοποίησης, τόσο του δοσμένου εξοπλισμού, όσο και της ενεργειακής πηγής, για αυτό το λόγο υπάρχει έντονο ενδιαφέρον προς αυτή την κατεύθυνση.

Λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν είναι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες. Συγκεκριμένα οι Α/Γ μεταβλητών στροφών έχουν μειωμένη μηχανική καταπόνηση και ακουστικό θόρυβο, παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόδοση και υψηλή ικανότητα ελέγχου, ένα πλεονέκτημα αρκετά σημαντικό για τη διασύνδεση μεγάλων αιολικών πάρκων στο δίκτυο.

Η διαδικασία ελέγχου που ευθύνεται για την απορρόφηση της μέγιστης αιολικής ενέργειας ονομάζεται **Maximum Power Point Tracking (MPPT)**. Ο έλεγχος παρακολούθησης της μέγιστης ισχύος γίνεται από ελεγκτές MPPT χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές για την ανεύρεση της μέγιστης ισχύος. Αρχή λειτουργίας όλων των

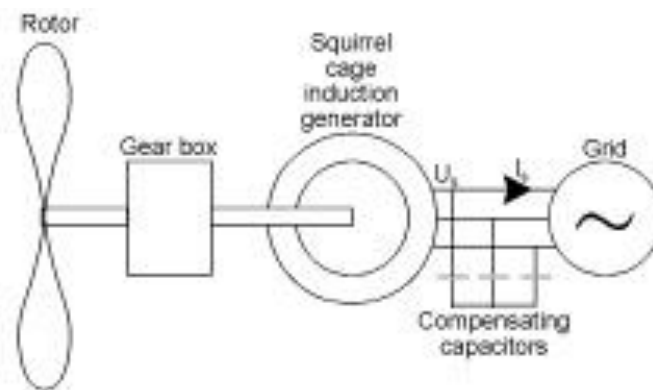
τεχνικών είναι ο έλεγχος των στροφών της Α/Γ, ώστε να λειτουργεί με μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος κοντά στο 0,5 [17].

2.4. Τύποι ανεμογεννήτριας

Ανάλογα με τον **τύπο της γεννήτριας**, ως προς τη διαμόρφωση του ηλεκτρικού μέρους, τον τρόπο εφοδιασμού και τον τρόπο σύνδεσής τους στο δίκτυο, διακρίνονται σε ασύγχρονες (επαγωγικές) και σύγχρονες [14], [20].

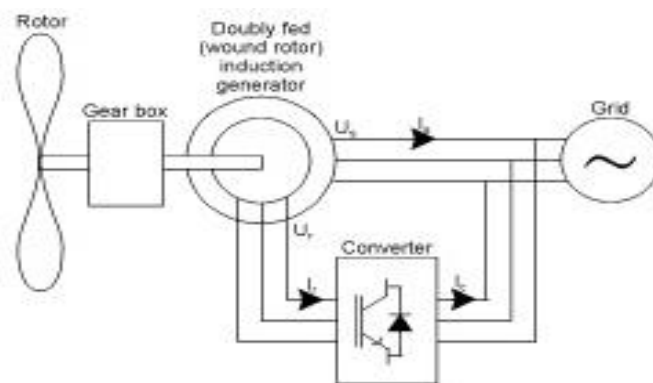
2.4.1. Ασύγχρονες γεννήτριες

- **Ασύγχρονη γεννήτρια (κλωβού), σταθερών στροφών, απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο:** Είναι η πιο διαδεδομένη μορφή Α/Γ με πολλά πλεονεκτήματα, όπως στιβαρότητα και ηλεκτρική απλότητα και επειδή κατασκευάζονται μαζικά είναι αρκετά φθηνές. Το κυριότερο μειονέκτημα είναι ότι ο στάτης χρειάζεται επαγόμενο ρεύμα για να μαγνητιστεί. Επειδή δεν διαθέτει μόνιμους μαγνήτες χρειάζεται άλλη πηγή διέγερσης και κατά συνέπεια καταναλώνει άεργο ισχύ που παρέχεται από το δίκτυο ή από ηλεκτρονικά ισχύος. Στην περίπτωση που υπάρχει τροφοδότηση του στάτη από το δίκτυο δημιουργείται στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο με ταχύτητα που καθορίζεται από των αριθμών των πόλων και τη συχνότητα του δικτύου. Εάν ο δρομέας στρέφεται με ταχύτητα μεγαλύτερη από τη σύγχρονη ταχύτητα, τότε ένα ηλεκτρικό πεδίο επάγεται μεταξύ του ρότορα και του στάτη, με ολίσθηση s που προκαλεί ρεύμα στα τυλίγματα του δρομέα (Α/Γ με βραχυκυκλωμένο κλωβό και δακτυλιοφόρο δρομέα) (σχήμα 2.4.).



Σχήμα 2.4. Ασύγχρονη γεννήτρια κλωβού [18].

- Ασύγχρονη γεννήτρια (τυλιγμένου δρομέα), σταθερών στροφών, μεταβλητής αντίστασης, απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο:** Στην περίπτωση αυτή, μέσω του ελέγχου του ρεύματος στο πεδίο του δρομέα δίνεται η δυνατότητα για αυξομείωση της ηλεκτρικής ροπής. Αυτό επιτυγχάνεται με την προσθήκη εξωτερικών αντιστάσεων και ηλεκτρονικών ισχύος που μπορούν να πραγματοποιήσουν δυναμικό έλεγχο ολίσθησης. Συνεπώς, η Α/Γ ελέγχεται κατά τη διάρκεια των μεταβολών των ριπών του ανέμου. Ως αποτέλεσμα παρατηρείται βελτίωση της ποιότητας ισχύος και περιορισμός των μηχανικών καταπονήσεων (σχήμα 2.5).

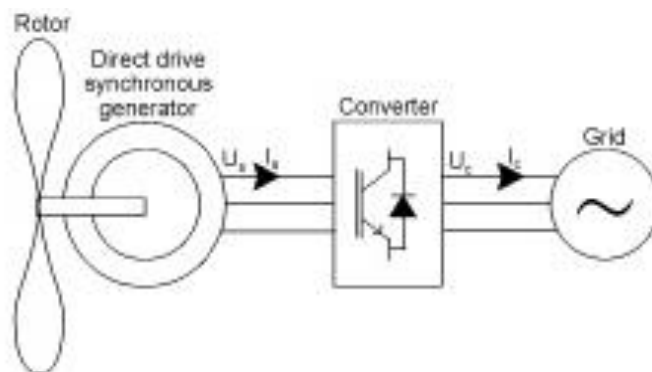


Σχήμα 2.5. Ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης (τυλιγμένου δρομέα) [18].

- Ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης (τυλιγμένου δρομέα), μεταβλητών στροφών, με μετατροπέα AC/DC/AC στο δρομέα για σύνδεση στο δίκτυο:** Στην διαμόρφωση αυτή ο έλεγχος της γεννήτριας επιτυγχάνεται μέσω του ελέγχου του μέτρου και της συχνότητας των ρευμάτων που ρέουν στο δρομέα. Έτσι, η διαμόρφωση αυτή έχει αρκετά πλεονεκτήματά ιδίως αν συνυπολογιστεί το γεγονός ότι χρησιμοποιείται μια απλή γεννήτρια και ένας μετατροπέας μικρής ισχύος, που είναι φθηνός, καθώς ένα μικρό μέρος της παραγόμενης ισχύος (περίπου το 1/3) διαρρέει από το δρομέα, ενώ το υπόλοιπο εγχέεται στο δίκτυο από το στάτη της γεννήτριας. Από την άλλη πλευρά, όμως, υπάρχει το μειονέκτημα ότι ο στάτης συνδέεται απευθείας στο δίκτυο και έτσι απαιτούνται συστήματα προστασίας. Αυτό συμβαίνει, διότι κάθε διαταραχή των ρευμάτων του στάτη θα μεταβιβάζεται μέσω μαγνητικής σύζευξης στο δίκτυο και το αντίστροφο με αποτέλεσμα τον επηρεασμό της συχνότητας και κατ' επέκταση τον ενδεχόμενο κίνδυνο της διάταξης.

2.4.2. Σύγχρονες γεννήτριες

Στην κατηγορία αυτή ανήκει η σύγχρονη γεννήτρια, μεταβλητών στροφών, με τύλιγμα διεγέρσεως ή μόνιμο μαγνήτη, με μετατροπέα AC/DC/AC στο στάτη για σύνδεση στο δίκτυο. Σε αντίθεση με την ασύγχρονη γεννήτρια, η σύγχρονη γεννήτρια με τύλιγμα διέγερσης ή μόνιμους μαγνήτες περιλαμβάνει μετατροπέα ισχύος που οδηγεί στην εξάλειψη του προαναφερθέντος προβλήματος. Οποιαδήποτε μεταβολή από την πλευρά της γεννήτριας (π.χ. μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου) ή του δικτύου (π.χ. βύθιση τάσης) δεν επηρεάζει τη συνεργασία των δύο αυτών μερών. Αυτό συμβαίνει, λόγω του ότι ο μετατροπέας απομονώνει την τάση και τη συχνότητα του δικτύου από τα μεγέθη του στάτη, δεχόμενος το 100% της παραγόμενης ισχύος. Κάτι που αναδεικνύει προβλήματα κόστους και αξιοπιστίας των ηλεκτρονικών ισχύος. Ακόμη κατά αυτή τη διαμόρφωση χρησιμοποιούνται πολυπολικές γεννήτριες με αποτέλεσμα την εξάλειψη του κιβωτίου ταχυτήτων καθώς και του κόστους και βάρους της Α/Γ, αντισταθμίζοντας έτσι ως ένα βαθμό το γεγονός ότι η γεννήτρια είναι βαριά και πολύπλοκη. Τέλος, αυτού του είδους Α/Γ έχουν την δυνατότητα να μετάγουν περισσότερη άεργο ισχύ αποτελεσματικότερα σε σχέση με την Α/Γ διπλής τροφοδότησης (σχήμα 2.6) [14], [18].



Σχήμα 2.6. Σύγχρονη γεννήτρια [18].

2.5. Έλεγχος ανεμογεννήτριας

Ο ανεμοκινητήρας δεν είναι δυνατόν να αξιοποιήσει την ετήσια ενέργεια του ανέμου στο σύνολό του καθώς υπάρχει μεταβλητότητα στην ταχύτητα του ανέμου ενώ η ισχύς του ανέμου είναι μεγαλύτερη από τις απώλειες κενού φορτίου. Η υπάρχουσα τεχνολογία στο τομέα των ηλεκτρικών μηχανών και η ανάπτυξη και εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος κατέστησαν δυνατή την κατασκευή και λειτουργία ανεμογεννητριών μεγάλης ισχύος. Η ταυτόχρονη εξέλιξη της πληροφορικής και των συστημάτων της, συνέβαλλε στην βελτίωση

των αεροδυναμικών μοντέλων και στον αποτελεσματικότερο και αποδοτικότερο έλεγχο των ανεμογεννητριών, ώστε να υφίσταται η μέγιστη εξαγωγή ισχύος από τον άνεμο και η τροφοδότησή της στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς, η βελτίωση όλων αυτών και η δημιουργία ανεμογεννητριών νέας τεχνολογία καθιστά την αιολική ενέργεια ως την ιδανικότερη επιλογή επένδυσης κεφαλαίων.

Οι Α/Γ σχεδιάζονται και κατασκευάζονται να λειτουργούν και να αποδίδουν το μέγιστο της ενέργειάς τους σε ταχύτητες 12-15m/s ώστε η παραγόμενη ενέργεια να γίνεται με όσο το δυνατόν χαμηλότερο κόστος. Σε περιπτώσεις δυνατότερων ανέμων συνήθως «θυσιάζεται» η παραπάνω ενέργεια προκειμένου να μην πάθει ζημία η Α/Γ. Ανάλογα με τον τρόπο ρύθμισης της ισχύος από τα πτερύγια της Α/Γ διακρίνονται τρεις βασικές στρατηγικές ελέγχου. Ο έλεγχος της ισχύος γίνεται για να αποτραπούν τυχόν ζημιές σε περίπτωση ισχυρού ανέμου. Ο έλεγχος των μηχανικών και των ηλεκτρικών μερών της ανεμογεννήτριας είναι αυτός που επιτρέπει την βελτίωση της παραγόμενης ισχύος, απόδοσης και ευστάθειας του συστήματος. Συγκεκριμένα, ο μηχανικός έλεγχος συνίσταται στον έλεγχο γωνίας βήματος και στον έλεγχο απώλειας στήριξης (ενεργός και παθητικός).

Ο ηλεκτρονικός έλεγχος συνίσταται σε χρήση τεχνικών ρύθμισης ηλεκτρικών ποσοτήτων, μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η ρύθμιση της παρεχόμενης ενεργής και άεργης ισχύος. Επίσης, ρυθμίζεται η ηλεκτρική συχνότητα, η προσφερόμενη άεργος ισχύ στην μηχανή καθώς και η ταχύτητά της κατά την λειτουργία της μέγιστης παραγόμενης ισχύος. Βασικό χαρακτηριστικό του ηλεκτρονικού ελέγχου είναι ότι αντίθετα με τον μηχανικό δεν εφαρμόζεται σε κάθε τύπο ανεμογεννήτριας παρά μόνο σε συστήματα μεταβλητών στροφών.

2.5.1. Μηχανικός έλεγχος ισχύος

Ο μηχανικός έλεγχος ισχύος συμβάλλει στην αποφυγή ζημιών στις Α/Γ περιορίζοντας τόσο την απορροφούμενη από τον άνεμο ισχύ όσο και τις εφαρμοζόμενες αεροδυναμικές δυνάμεις στο δρομέα σε υψηλές τιμές ταχύτητας. Σε Α/Γ σταθερής και μεταβλητής ταχύτητας μπορεί να εφαρμοστεί

Υπάρχουν τρεις τρόποι μηχανικού ελέγχου οι οποίοι μπορούν να εφαρμοστούν σε ανεμογεννήτριες σταθερής αλλά και μεταβλητής ταχύτητας, αντίστοιχα. Είναι ο παθητικός έλεγχος στήριξης, ο ενεργός έλεγχος στήριξης και ο έλεγχος γωνίας βήματος πτερυγίων. Αναλυτικότερα:

2.5.1.1. Παθητικός έλεγχος απώλειας στήριξης (passive stall control)

Στην μέθοδο αυτή δεν χρησιμοποιείται κανένας μηχανισμός ενεργοποίησης κατά την εφαρμογή του. Εφαρμόζεται συχνότερα στις Α/Γ σταθερής ταχύτητας και απαιτεί υψηλή αεροδυναμική σχεδίαση του πτερυγίου. Στην περίπτωση αυτή, τα πτερύγια τοποθετούνται στον άξονα σε σταθερή γωνία. Ο αεροδυναμικός σχεδιασμός προκαλεί επιβράδυνση του ρότορα, όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβαίνει το επιθυμητό όριο. Πρόκειται για ένα εύρωστο και οικονομικό σύστημα που προσφέρει περιορισμό της παραγόμενης ισχύος στις μεγάλες ταχύτητας μέσω της αεροδυναμικής του πτερυγίου. Μειώνεται δηλαδή η αναπτυσσόμενη ροπή και άρα η παραγόμενη ισχύς καθώς η αεροδυναμική ισχύς στα πτερύγια περιορίζεται σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Κύριο πλεονέκτημα είναι ότι η μη ύπαρξη κινούμενων μερών πάνω στον ρότορα. Μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου ελέγχου είναι ο πολύπλοκος σχεδιασμός της Α/Γ, η μικρή απόδοση που εμφανίζει στις χαμηλές ταχύτητες και οι μεταβολές στη μέγιστη ισχύ λόγω των μεταβολών στην πυκνότητα του αέρα και της συχνότητας του δικτύου. Στο σχήμα 1.9. φαίνεται η ενδεικτική καμπύλη ισχύος για passive stall control [14], [16], [18], [19].

2.5.1.2. Ενεργός έλεγχος απώλειας στήριξης (active stall control)

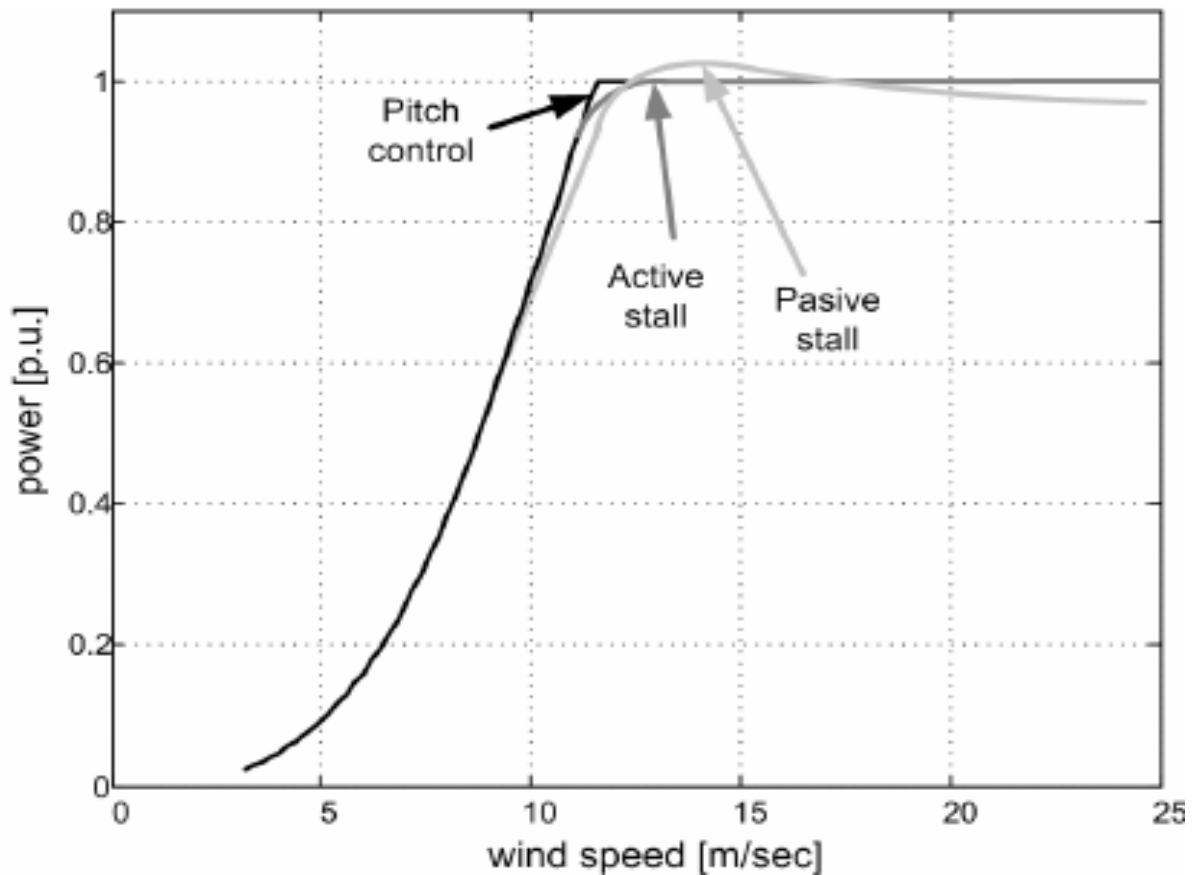
Αυτή η μέθοδος ελέγχου συνδυάζει τα θετικά των προηγούμενων ελέγχων. Συγκεκριμένα βασίζεται στην αρχή του pitch αλλά χρησιμοποιεί την ικανότητα απώλειας της αεροδυναμικής στήριξης των πτερυγίων του συστήματος stall, δίνοντας έτσι ευελιξία για ταχύ αεροδυναμικό φρενάρισμα σε περίπτωση κινδύνου, καθώς και εύκολες εκκινήσεις. Έτσι, όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί την ονομαστική τιμή της, η γωνία pitch μεταβάλλεται αντίθετα, με σκοπό τον ομαλό περιορισμό της ενέργειας και την αποκοπή της περίσσειας αεροδυναμικής ισχύος. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι ότι ελέγχονται ταχύτερα αυξομειώσεις στην πυκνότητα του αέρα και δεν καταπονούνται τα μηχανικά μέρη της Α/Γ. Επιπλέον, γίνεται ευκολότερη η διαχείριση καταστάσεων που χρήζουν άμεσης διακοπής λειτουργίας της Α/Γ ενώ βοηθά και την εκκίνηση. Αυτός ο έλεγχος χρησιμοποιείται σε Α/Γ άνω του 1MW. Στο σχήμα 1.7 φαίνεται η ενδεικτική καμπύλη ισχύος για active stall control [14], [19].

2.5.1.3. Γωνία βήματος πτερυγίου (*pitch control*)

Με τον συγκεκριμένο τρόπο ελέγχου ασκούνται μικρότερες δυνάμεις και πιέσεις στην ανεμογεννήτρια, γι' αυτό χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά στις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών.

Οι ανεμογεννήτριες διαθέτουν πτερύγια που έχουν τη δυνατότητα περιστροφής (ολόκληρο ή μέρος) κατά τον διαμήκη άξονά τους στην κατεύθυνση μείωσης της γωνίας πρόσπτωσης και άρα του συντελεστή άντωσης (δηλαδή ενάντια στον αέρα ή προς τη διεύθυνσή του). Σκοπός είναι η προσαρμογή της ισχύος εξόδου, η προστασία του και η επίτευξη καλύτερης απόδοσης. Όταν ο άνεμος προκαλεί μεγάλη παραγωγή ενέργειας, ο μηχανισμός ελέγχου της γωνίας βήματος αρχίζει να στρίβει τα ακροπτερύγια ώστε να επιτευχθεί μείωση του ανέμου που προσπίπτει πάνω τους. Στις υψηλές ταχύτητες, η πραγματική παραγόμενη ισχύς είναι βέλτιστη και πλησιάζει την ονομαστική τιμή της γεννήτριας. Η ενεργειακή απόδοση της Α/Γ προσδιορίζεται από την διάμετρο του έλικα, το συντελεστή απόδοσης του έλικα της ανεμογεννήτριας και από την ταχύτητα του ανέμου στο σημείο εγκατάστασης.

Συγκεκριμένα, όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι μικρότερη από την ονομαστική, το πτερύγιο βρίσκεται στις 0° ενώ όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί την ονομαστική, ο μηχανισμός ελέγχου του βήματος των πτερυγίων θα περιστρέψει, στη κατάλληλη γωνία, τα πτερύγια επιτυγχάνοντας την διατήρηση της ισχύος εξόδου εντός των επιτρεπτών ορίων. Τα πτερύγια έρχονται στην αρχική τους θέση όταν η ένταση του ανέμου πέσει. Είναι ευρέως διαδεδομένη και εφαρμοζόμενη μέθοδος γιατί επιτυγχάνει την αποτελεσματικότερη ρύθμιση της ισχύος εξόδου σε σχέση με τις άλλες δύο μεθόδους ελέγχου. Το κύριο μειονέκτημα της διάταξης αυτής είναι η πολυπλοκότητα που εμφανίζει το σύστημα ελέγχου της γωνίας των πτερωτών και η χρήση υδραυλικών και ηλεκτρομηχανολογικών μέσων για την περιστροφή των πτερωτών. Ο τύπος αυτός χρησιμοποιείται ευρέως από τις Α/Γ μεταβλητών στροφών. Στο σχήμα 2.7. φαίνεται η ενδεικτική καμπύλη ισχύος για το pitch control [14], [16], [18], [19].



Σχήμα 2.7. Ενδεικτική καμπύλη ισχύος pitch control, απώλεια στήριξης παθητική και ενεργή [18].

2.5.2. Ηλεκτρονικός έλεγχος ισχύος

Χρησιμοποιείται στα συστήματα μεταβλητών στροφών και χρησιμοποιεί την τεχνολογία των ηλεκτρονικών ισχύος. Πρόκειται για συσκευές που διαχειρίζονται μεγάλα ποσά ισχύος της τάξης των MVA. Η τεχνολογία τους εξελίσσεται διαρκώς τα τελευταία χρόνια με αποτέλεσμα να αυξάνεται και αριθμός των εφαρμογών τους.

Ευρέως διαδεδομένες συσκευές ηλεκτρονικών ισχύος είναι ο μετατροπέας (ac/dc–dc/ac converter), ο ηλεκτρονικά ελεγχόμενος εκκινητής (soft starter) και οι συστοιχίες πυκνωτών. Συγκεκριμένα:

- **Μετατροπέας (ac/dc–dc/ac converter):** Αποτελείται από τριφασική εξαπαλμική γέφυρα με IGBT στοιχεία. Πρακτικά χρησιμοποιούνται δυο μετατροπείς πλάτη με πλάτη (back-to-back), συνδεδεμένοι μεταξύ τους μέσω μιας διασύνδεσης συνεχούς ρεύματος (dc-διασύνδεση) τοποθετώντας ένα μεγάλο πυκνωτή στη μέση, ο οποίος χρησιμεύει στην αποσύζευξη του ελέγχου τόσο από την πλευρά της μηχανής όσο και από την πλευρά του δικτύου. Το πλεονέκτημα της διάταξης αυτής είναι η αμφίδρομη σχέση στη μεταφορά ισχύος αλλά και η δυνατότητα ελέγχου ενεργού και άεργου ισχύος. Μπορεί δηλαδή αυτός ο μετατροπέας να λειτουργεί ως ανορθωτής και αντιστροφέας. Βασικό χαρακτηριστικό

του είναι οι υψηλές διακοπτικές συχνότητες που μπορεί να αυξάνουν τις απώλειες όμως προκαλούν δραστική μείωση της επίδρασης τους στο δίκτυο.

- **Ηλεκτρονικά ελεγχόμενος εκκινητής (soft starter):** Πρόκειται για ηλεκτρονική συσκευή που χρησιμοποιείται στις Α/Γ σταθερών στροφών και διευκολύνει την σύνδεση τους με το δίκτυο. Σκοπός της είναι η μείωση των μεταβατικών ρευμάτων και άρα των ανεπιθύμητων διαταραχών που αυτά προκαλούν στο δίκτυο. Στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιείται, τα μεταβατικά ρεύματα δημιουργούν σοβαρές διαταραχές στην τάση του δικτύου. Αποτελείται από ζεύγη αντιπαράλληλων θυρίστορ που εξασφαλίζουν την ομαλή ένταξη της Α/Γ στο δίκτυο μέσω της κατάλληλης ρύθμισης της γωνίας εναύσεως τους. Μόλις παρέλθει το μεταβατικό στάδιο, ο ηλεκτρονικά ελεγχόμενος εκκινητής παρακάμπτεται ώστε να αποφευχθούν επιπλέον απώλειες στο σύστημα.
- **Συστοιχίες πυκνωτών:** Χρησιμοποιούνται κυρίως σε Α/Γ σταθερής ταχύτητας. Βασικός στόχος τους είναι η εγκάρσια αντιστάθμιση άεργου ισχύος ώστε η γεννήτρια να μην χρειάζεται να απορροφά άεργο ισχύ από το δίκτυο κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της. Τοποθετούνται συνήθως στη βάση του πύργου της Α/Γ.

2.6. Βύθιση τάσεως

Βύθιση τάσεως είναι η μικρής διάρκειας πτώση της ενεργού τιμής της τάσης, λόγω σφαλμάτων που υφίστανται στο δίκτυο ή σφαλμάτων προερχόμενων από κινητήρες-μετασχηματιστές. Πιο συγκεκριμένα εννοείται η ξαφνική πτώση της τάσης (μεταξύ 10-90%) σε κάποιο σημείο του δικτύου [21]. Τα αίτια πρόκλησης μπορεί να είναι:

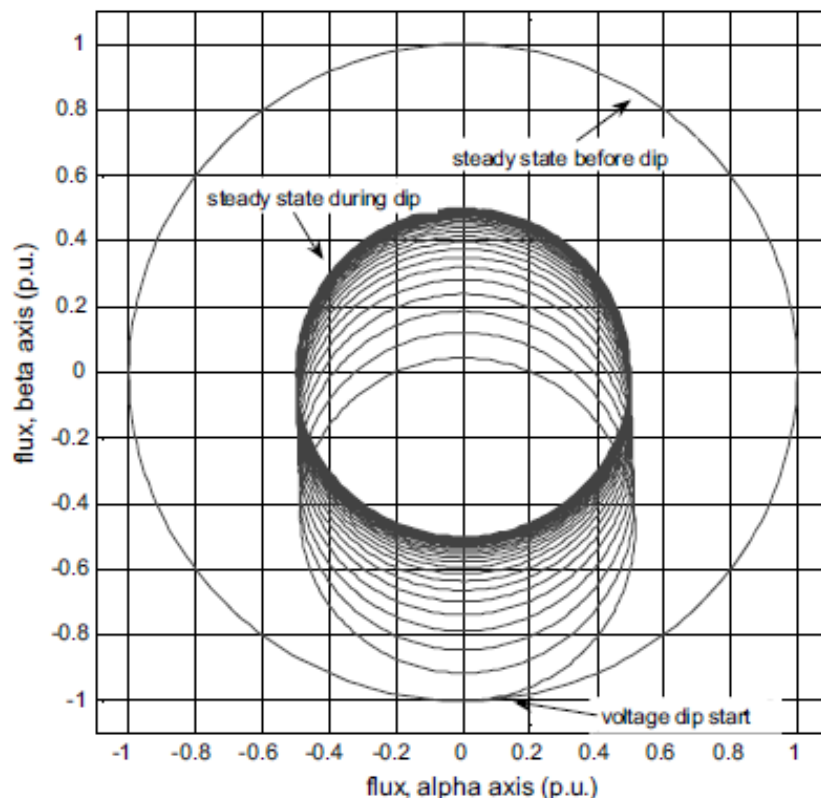
1. βραχυκυκλώματα οπουδήποτε στο δίκτυο,
2. προσωρινή διακοπή της τροφοδοσίας του δικτύου λόγω διαδικασιών συντήρησης,
3. ροή υψηλών ρευμάτων λόγω εκκίνησης κινητήρων μεγάλου φορτίου,
4. ροή υψηλών ρευμάτων από τόξα (arc) λόγω κορεσμού μετασχηματισμών.

Η πλειοψηφία οφείλεται στα βραχυκυκλώματα που συμβαίνουν εντός του δικτύου, γι' αυτό δίνεται έμφαση στη μελέτη τους [14], [22], [23]. Τα βραχυκυκλώματα μπορεί να είναι δύο ειδών, συμμετρικά ή μη συμμετρικά και η διαδικασία κατάταξης γίνεται με κριτήριο το πλάτος της πτώσης τάσης σε κάθε φάση του συστήματος [14], [23]. Έτσι, στις καταστάσεις μη ομαλής λειτουργίας συμπεριλαμβάνονται οι συμμετρικές και οι ασύμμετρες βυθίσεις τάσεως. Αναλυτικότερα

- συμμετρικό σφάλμα (συνήθως έτσι ονομάζεται το τριφασικό σφάλμα), όταν η πτώση της τάσης είναι ίδια και στις τρεις φάσεις του συστήματος, υπάρχει συμμετρικό σφάλμα).
- μη-συμμετρικά (συνήθως έτσι ονομάζεται το μονοφασικό και διφασικό σφάλμα), όταν η πτώση της τάσης δεν είναι ίση και στις τρεις φάσεις του συστήματος.

Αρκετές μελέτες επικεντρώνονται στις τριφασικές (συμμετρικές) βυθίσεις τάσεως εξετάζοντας τις επιπτώσεις και την αντίδραση της διπλά τροφοδοτούμενης επαγωγικής γεννήτριας [13],[24],[25],[26]. Παρόλα αυτά, μελέτες έγιναν για την εξέταση των επιδράσεων και την απόκριση της διπλά τροφοδοτούμενης επαγωγικής γεννήτριας που αφορούν τις ασύμμετρες βυθίσεις τάσεως (μονοφασικές και διφασικές βυθίσεις τάσεως) [13],[26],[27].

Στο σχήμα 2.8 παρουσιάζεται η τροχιά της ροής του στάτη κατά τη διάρκεια συμμετρικών βυθίσεων τάσης. Πριν την επίδραση της βύθισης της τάσεως η ροή του στάτη στρεφόταν με τη συχνότητα του δικτύου. Τη στιγμή της επίδρασης της βύθισης, το κέντρο του κύκλου της ροής του στάτη κινείται προς το μηδέν, ως αποτέλεσμα της επίδρασης της μεταβατικής ροής, η οποία μηδενίζεται. Αφού μηδενιστεί η μεταβατική ροή, η ροή του στάτη επανέρχεται στις αρχικές συνθήκες.

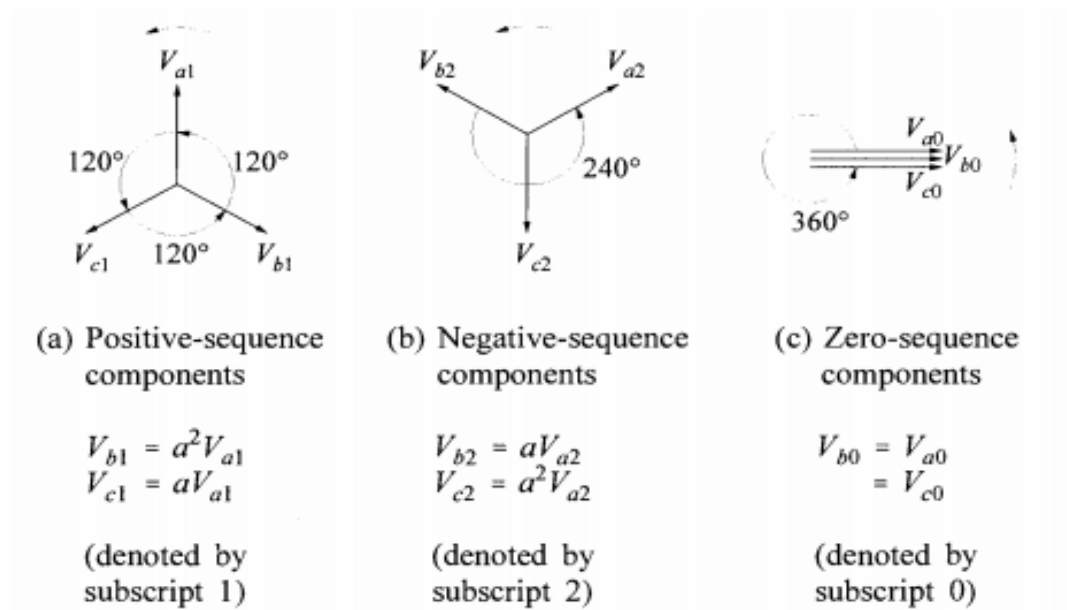


Σχήμα 2.8. Η τροχιά της ροής του στάτη κατά τη διάρκεια τριφασικής βύθισης τάσεως [13],[27]

Για την ανάλυση των μη συμμετρικών σφαλμάτων [16], [28] θα πρέπει να γίνει μια αναφορά πρώτα στη μέθοδο των συμμετρικών συνιστωσών. Τα μη συμμετρικά σφάλματα

είναι μονοφασικά και διφασικά βραχυκυκλώματα και ονομάζονται έτσι γιατί η πτώση της τάσης δεν είναι ίση και στις τρεις φάσεις του δικτύου. Η μέθοδος των συμμετρικών συνιστωσών διαχωρίζει το χωρικό διάνυσμα της τάσης του στάτη σε τρία διανύσματα (σχήμα 2.9) [12]:

- το θετικής ακολουθίας,
- το αρνητικής ακολουθίας και
- το μηδενικής ακολουθίας,



Σχήμα 2.9. Η αναπαράσταση του διανύσματος α) θετικής ακολουθίας, β) αρνητικής ακολουθίας και γ) μηδενικής ακολουθίας [12]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ

3.1. Είδη αιολικών πάρκων

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της εκμετάλλευσης του αιολικού δυναμικού επιτυγχάνεται από συστοιχίες ανεμογεννητριών, τα αιολικά πάρκα και λειτουργούν σαν ολοκληρωμένες μονάδες. Εντοπίζονται κυρίως σε περιοχές με ισχυρό αιολικό δυναμικό, δυνατότητα πρόσβασης και εγκατάστασης Α/Γ αλλά και απόσταση από τις περιοχές κατανάλωσης τέτοια που να επιτρέπει τη μεταφορά της παραγόμενης ενέργειας.

Τα αιολικά πάρκα μπορεί να είναι χερσαία, θαλάσσια ή υπεράκτια [29]:

- **Χερσαία αιολικά πάρκα:** Στην περίπτωση αυτή τα αιολικά πάρκα εγκαθίστανται σε χερσαίες περιοχές, σε απόσταση τουλάχιστον 3 χιλιομέτρων από την εγγύτερη ακτογραμμή. Συνήθως κατασκευάζονται σε κορυφογραμμές μεγάλου υψομέτρου, λόγω των ταχυτήτων του ανέμου που αναπτύσσονται εκεί. Τα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν και πρέπει να αντιμετωπιστούν είναι η μεταφορά και τοποθέτηση του εξοπλισμού, σε δύσβατες περιοχές (ακόμα και με διάνοιξη δρόμων που αυξάνει το κόστος) αλλά και η περιβαλλοντική υποβάθμιση λόγω της παρέμβασης.
- **Παράκτια αιολικά πάρκα:** Στην περίπτωση αυτή τα αιολικά πάρκα είναι εγκατεστημένα σε απόσταση μικρότερη των 3 χιλιομέτρων από την ακτογραμμή προς το εσωτερικό και μικρότερη από τα 10 χιλιόμετρα προς τη θάλασσα. Εκμεταλλεύονται τους ισχυρούς ανέμους που δημιουργούνται εξαιτίας λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς ξηράς και θάλασσας. Τα προβλήματα που προκύπτουν είναι το υψηλό κόστος της επένδυσης, οι αντιδράσεις λόγω της υποβάθμισης του τουριστικού προϊόντος των περιοχών, η παρεμπόδιση της αλιείας και η δυσκολία στη ναυσιπλοΐα.
- **Υπεράκτια αιολικά πάρκα:** Πρόκειται για πάρκα τοποθετημένα εντός της θάλασσας και σε απόσταση μεγαλύτερη των 10 χιλιομέτρων από την ακτή. Αποτελούν την τελευταία εξέλιξη στην χωροθέτηση των πάρκων. Βασική αιτία ανάπτυξης των υπεράκτιων αιολικών πάρκων ήταν η σχεδόν πλήρης κάλυψη των περιοχών στη στεριά που ικανοποιούσαν τις προϋποθέσεις για χερσαία εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι ότι ο άνεμος στη θάλασσα είναι απαλλαγμένος από φαινόμενα τύρβης, ενώ έχει μεγαλύτερη ταχύτητα, συμβάλλοντας έτσι στην επίτευξη αποδόσεων (έως 30%). Επιπλέον, η ομοιόμορφη, καθ' ύψος, κατανομή ταχυτήτων του ανέμου επιτρέπει χρήση χαμηλότερων και πιο οικονομικών Α/Γ ενώ η εγκατάστασή τους δεν περιορίζει τις ανθρωπογενείς δράσεις στο περιβάλλον. Από την άλλη η εφαρμογή τους

είναι δύσκολη καθώς η μεταφορά, εγκατάσταση, στήριξη και συντήρηση των Α/Γ απαιτεί πολύπλοκες διαδικασίες υψηλού κόστους ενώ η διασύνδεση τους με την ακτή προϋποθέτει μελέτες και πολύπλοκούς μηχανισμούς εξάλειψης κινδύνου.

3.2. Απαιτήσεις σύνδεσης αιολικού πάρκου στο δίκτυο

Τόσο οι ανεμογεννήτριες όσο και τα αιολικά πάρκα, αν και αποσκοπούν στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, διαφέρουν από συμβατικούς σταθμούς παραγωγής. Η κύρια διαφοροποίησή τους έγκειται στον τρόπο αλληλεπίδρασης ενός αιολικού πάρκου με τις συνιστώσες ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η **μεταβλητότητα του ανέμου**, ως πρωτογενής πηγή ενέργειας, και η **δυσκολία πρόβλεψης και ρύθμισης** της ταχύτητάς του επηρεάζουν καθοριστικά τη συμπεριφορά των ανεμογεννητριών και γενικότερα των αιολικών σταθμών, όπως επίσης και τη δυνατότητα ενσωμάτωσής τους στα σημερινά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας [30].

Μια άλλη διαφορά μεταξύ των δύο τύπων εγκαταστάσεων είναι η **αντιμετώπιση σφαλμάτων** που εμφανίζονται συχνά στο δίκτυο (π.χ. τριφασικά ή μονοφασικά σφάλματα). Στο παρελθόν, οι διεισδύσεις της αιολικής ισχύος στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας ήταν χαμηλές, για το λόγο αυτό οι αιολικοί σταθμοί αντιμετώπιζονταν ως **«αρνητικά φορτία»** του συστήματος και όχι ως σταθμοί παραγωγής, μη επηρεάζοντας σημαντικά την ευστάθεια των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, στις μη κανονικές συνθήκες λειτουργίας του δικτύου ως ενδεδειγμένη λύση εφαρμοζόταν η άμεση αποσύνδεση των Α/Γ, δημιουργώντας προβλήματα στο υπόλοιπο δίκτυο. Πλέον, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από αιολικά πάρκα έχει αυξηθεί σημαντικά και έτσι δίνεται μεγάλη προσοχή στην αλληλεπίδραση των αιολικών πάρκων με τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό συμβαίνει, για να διασφαλιστεί η ομαλή και ασφαλής λειτουργία τόσο του αιολικού πάρκου όσο και του δικτύου, προκειμένου να διατηρηθεί σταθερή η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος σε καταστάσεις διαταραχών. Λόγω λοιπόν της υψηλής διείσδυσης των αιολικών πάρκων, η αποσύνδεση καθίσταται απαγορευτική γιατί η απότομη αφαίρεση αυτών των σταθμών παραγωγής από το δίκτυο ισοδυναμεί με μεγάλη διαταραχή του ισοζυγίου παραγωγής και κατανάλωσης, οδηγώντας το σύστημα σε μεταβατική αστάθεια.

Επομένως, τίθενται αυτομάτως απαιτήσεις για το τρόπο ενσωμάτωσης των αιολικών σταθμών προκειμένου να ανταποκρίνονται στα απαιτούμενα πρότυπα. Οι απαιτήσεις αυτές αποτυπώνονται στους **Κώδικες διαχείρισης του Συστήματος** ή τις σχετικές **Οδηγίες**

Σύνδεσης που εφαρμόζονται στις χώρες με υψηλές διεισδύσεις αιολικής ισχύος. Οι κοινές απαιτήσεις που διέπουν την πλειοψηφία των κωδικών σε ότι αφορά τη σύνδεση αιολικών πάρκων στο δίκτυο, είναι οι παρακάτω [30]:

1. Ανοχή σε βυθίσεις τάσης και απόκριση κατά τη διάρκεια και μετά την εκκαθάριση σφαλμάτων στο δίκτυο
2. Έλεγχος συχνότητας και ενεργού ισχύος
3. Έλεγχος τάσης και αέργου ισχύος
4. Όρια τάσης και συχνότητας
5. Επικοινωνία, προστασία, μέτρηση και λοιπά τεχνικά και διαδικαστικά ζητήματα

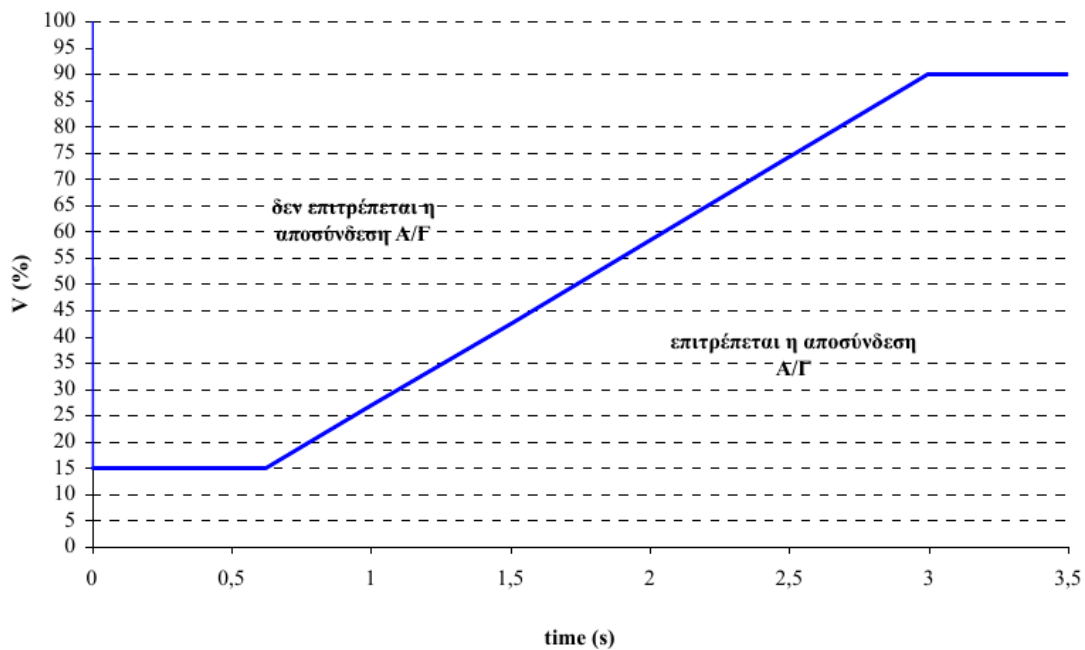
Στην παρούσα εργασία δίνεται έμφαση στις απαιτήσεις 1, 2 και 3, και ιδιαίτερα όσον αφορά την δυνατότητα ελέγχου της παραγόμενης αέργου ισχύος από το Α/Π που αποτελούν κρίσιμα τεχνικά ζητήματα και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη σύνδεση αιολικών πάρκων στο σύστημα.

3.2.1. Ανοχή σε βυθίσεις τάσης και απόκριση σε καταστάσεις σφαλμάτων

Τα εμφανιζόμενα σφάλματα στα ηλεκτρικά δίκτυα μπορεί να οφείλονται σε βραχυκυκλώματα μεταξύ αγωγών μίας ή περισσότερων φάσεων και της γης. Συνηθέστερα σφάλματα είναι τα μονοφασικά σφάλματα ως προς γης, ενώ αντίθετα ένα πολύ μικρό ποσοστό του συνόλου σφαλμάτων αποτελούν τα τριφασικά βραχυκυκλώματα (τα οποία δημιουργούν τα πιο έντονα προβλήματα ευστάθειας). Δίνεται μεγάλη βαρύτητα στη σχεδίαση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία θα είναι σε θέση να ανταπεξέρχονται σε τέτοιου είδους σφάλματα και να επανέρχονται σε κανονική λειτουργία μετά την εκκαθάρισή τους, έχοντας την ελάχιστη δυνατή επίπτωση στην ομαλή λειτουργία του δικτύου [30].

Όσο τα αιολικά πάρκα ήταν μικρής ισχύος τα τυχόν σφάλματα που συνέβαιναν δεν είχαν σημαντικές επιπτώσεις στο δίκτυο διανομής ή σε γειτονικές θέσεις του συστήματος. Για αυτό το λόγο η ύπαρξη απαίτησης ανοχής των σταθμών σε βυθίσεις τάσης δεν ήταν τόσο επιτακτική. Η εξέλιξη της τεχνολογίας που επήλθε τα τελευταία χρόνια έχει καταστήσει δυνατή την εγκατάσταση αιολικών πάρκων μεγάλης ισχύος. Για το λόγο αυτό η τεχνική της αποσύνδεσης που ακολουθούνταν στο παρελθόν δεν αποτελεί πλέον λύση προστασίας των ανεμογεννητριών. Η προστασία τους ανεμογεννητριών επέρχεται μέσω εξελιγμένων συστημάτων ελέγχου, τα οποία βοηθούν στην ισορροπία του συνολικού συστήματος παρέχοντας ενεργό και άεργο ισχύ στο δίκτυο, όπως κάνουν και οι συμβατικοί σταθμοί ισχύος. Έτσι, οι διαχειριστές απαιτούν να παραμένουν συνδεδεμένες οι ανεμογεννήτριες για την επίτευξη της αδιάλειπτης παροχής ισχύος. Έτσι, οι επιπτώσεις από σφάλματα (βυθίσεων

τάσης) σε αιολικούς σταθμούς ισχύος πολλών δεκάδων (ή και εκατοντάδων) που συνδέονται μαζικά στο δίκτυο διανομής μπορεί να είναι καθοριστικές για την ευστάθεια του συστήματος και την ασφάλεια εξυπηρέτησης των χρηστών. Για αυτό το λόγο λοιπόν οι σύγχρονοι Κώδικες περιέχουν τις απαιτήσεις για την μη αποσύνδεση των Α/Γ σε καταστάσεις βυθίσεων της τάσης του δικτύου, γνωστές ως **Fault Ride Through (FRT)** ή **Low-Voltage Ride Through (LVRT) Capability** και εκφράζονται με τη μορφή καμπυλών τάσης-χρόνου. Στο σχήμα 3.1 φαίνεται η τυπική μορφή της καμπύλης LVRT. Όσον αφορά τις βυθίσεις τάσεως πάνω από το όριο που ορίζει η καμπύλη του σχήματος 1.12, τα Α/Π θα πρέπει να παραμένουν συνδεδεμένα στο δίκτυο, ενώ η αποσύνδεσή τους επιτρέπεται για βυθίσεις κάτω από το όριο αυτό. Η τάση που εμφανίζεται στο σχήμα είναι κατά κανόνα η τάση στο σημείο σύνδεσης με το δίκτυο ενώ η βύθιση μπορεί να είναι συμμετρική ή ασύμμετρη (οπότε το διάγραμμα μπορεί να αφορά τη μεγαλύτερη από τις φασικές τάσεις), ανάλογα με τις προδιαγραφές του κάθε κώδικα.. Δηλαδή, τα ποσοτικά χαρακτηριστικά εξαρτώνται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κάθε συστήματος και καθορίζονται από τους αντίστοιχους διαχειριστές, συνεκτιμώντας και τις τεχνικές δυνατότητες των διαθέσιμων Α/Γ [30].



Σχήμα 3.1. Τυπική καμπύλη προδιαγραφών ανοχής Α/Π σε βυθίσεις τάσης [30],[31]

3.2.2. Έλεγχος ενεργού ισχύος και συχνότητας

Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας η παραγωγή και η κατανάλωση ενεργού ισχύος πρέπει να βρίσκεται σε ισορροπία. Η μη ικανοποίηση του ισοζυγίου παραγωγής και κατανάλωσης ισχύος οδηγεί σε αποκλίσεις από την ονομαστική τιμή της συχνότητας. Η διατήρηση της ισορροπίας αυτής είναι μία εκ των θεμελιωδών απαιτήσεων των Κωδίκων.

Για διασυνδεδεμένα συστήματα τα οποία βρίσκονται υπό κανονικές συνθήκες, ο διαχειριστής θα πρέπει να διατηρεί τη συχνότητα σε στενά όρια. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια μεταβατικών καταστάσεων λειτουργίας (π.χ. εξαναγκασμένες αποσυνδέσεις-διακοπές κάποιων μονάδων παραγωγής, σφάλματα του δικτύου) η συχνότητα υπερβαίνει τα όρια κανονικής λειτουργίας, η διαφορά μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης ισχύος καθορίζει το ποσοστό υπέρβασης της συχνότητας. Μέσω διάφορων μηχανισμών τόσο οι θερμικές μονάδες παραγωγής όσο και οι Α/Γ συμβάλουν στη ρύθμιση της συχνότητας έτσι ώστε να επιτύχουν την διατήρηση της ισορροπίας του δικτύου.

Συνεπώς η ανάγκη για την εξασφάλιση της ασφαλούς λειτουργίας του συστήματος καθώς και η αποφυγή προβλημάτων μετά από την επαναφορά της συχνότητας ύστερα από διαταραχές τάσης, επηρεάζει το εύρος συχνοτήτων σύμφωνα με το οποίο καθορίζεται το χρονικό διάστημα για το οποίο θα πρέπει τα Α/Π να παραμένουν συνδεδεμένα σε αυτό. Για το λόγο αυτό, στους Κώδικες διάφορων χωρών περιέχονται οι προδιαγραφές των ορίων-περιοχών της συχνότητας εντός των οποίων τα Α/Π θα πρέπει να λειτουργούν παράγοντας μέγιστη ισχύ, καθώς και τα όρια-περιοχές στις οποίες τα Α/Π λειτουργούν παράγοντας ποσοστό της ονομαστικής τους ισχύς συνεισφέροντας στην επαναφορά της συχνότητας και στην ευστάθεια του συστήματος. Επιπροσθέτως, αρκετοί Κώδικες έχουν και την απαίτηση για συμμετοχή των Α/Π στην πρωτεύουσα και δευτερεύουσα ρύθμιση της συχνότητας, πράγμα που πραγματοποιείται από τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής. Οι απαιτήσεις αυτές για την ενεργό ισχύ από Α/Π έχουν ως στόχο την ανταπόκριση στις προδιαγραφές ποιότητας ισχύος, καθώς και τη διατήρηση σταθερής συχνότητας στο δίκτυο. Επιπλέον στοχεύουν στην αποφυγή της υπερφόρτωσης των γραμμών μεταφοράς και στον περιορισμό των διακυμάνσεων της συχνότητας που οφείλονται στην μεταβλητότητα της ταχύτητας του ανέμου ή λόγω της εκκίνησης ή της παύσης των Α/Γ [30].

3.2.3. Έλεγχος τάσης και άεργου ισχύος

Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, εκτός από τη διατήρηση του ισοζυγίου της ενεργού ισχύος, μεγάλη σημασία δίνεται και στην εξασφάλιση διατήρησης του ισοζυγίου της

έργου ισχύος στο σύστημα. Αυτό συμβαίνει γιατί αρκετά φορτία του καταναλώνουν άεργο ισχύ. Η εξασφάλιση αυτή συνεπάγεται τη διατήρηση της τάσης του δικτύου εντός των επιτρεπτών ορίων. Σε αντίθεση με την διαδικασία διατήρησης της ενεργού ισχύος η οποία αφορά όλο το δίκτυο, η διατήρηση του ισοζυγίου της άεργου ισχύος και των επιθυμητών ορίων της τάσης γίνεται σε τοπικό επίπεδο, χρησιμοποιώντας μέσα αντιστάθμισης (όπως πυκνωτές) στα σημεία όπου η παραγωγή άεργου ισχύος δεν είναι επαρκής.

Συνήθως ο τρόπος μεταβολής της άεργου ισχύος από τη πλευρά του συστήματος μεταφοράς πραγματοποιείται από τις σύγχρονες γεννήτριες των συμβατικών μονάδων παραγωγής σε συνεργασία με τους ρυθμιστές τάσης που διαθέτουν. Επιπροσθέτως χρησιμοποιούνται αποζεύξιμοι πυκνωτές ως εναλλακτικό μέσων αντιστάθμισης. Τέλος, γενικώς είναι απαραίτητη η χρήση Μ/Σ ανύψωσης, ΜΤ/ΥΤ, ο οποίος διαθέτει σύστημα αυτόματης αλλαγής της τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ).

Επομένως, η προσθήκη μη συμβατικών μονάδων παραγωγής στο σύστημα επηρεάζεται σημαντικά από τις απαιτήσεις αυτές. Για το λόγο αυτό, η ενεργός συμμετοχή των νέων μη συμβατικών σταθμών παραγωγής (Α/Π-ΑΠΕ) στη ρύθμιση της τάσης του δικτύου είναι αναγκαία. Στο παρελθόν, οι προδιαγραφές αυτές αφορούσαν τη διατήρηση του συντελεστή ισχύος (Σ.Ι.) (power factor, p.f.) σε μία σταθερή τιμή. Οι προδιαγραφές των Κώδικων διάφορων χωρών, σήμερα, απαιτούν την διακύμανση του ΣΙ του Α/Π σε ένα εύρος τιμών (τόσο σε χωρικές όσο και σε επαγωγικές τιμές του ΣΙ). Τα όρια απόκλισης από την ονομαστική τιμή του ΣΙ παρουσιάζονται σε διαγράμματα συναρτήσεως είτε της τάσης είτε της ενεργού ισχύος. Εξίσου σημαντική είναι η απαίτηση, σε αρκετούς κώδικες, για τη ρύθμιση του ΣΙ συναρτήσεως της τάσης στο σημείο σύνδεσης του Α/Π στο δίκτυο (grid connection capacity) (η απαίτηση αυτή δεν λαμβάνεται υπόψη σε ορισμένους κώδικες, όπου έχουν ως απαίτηση της λειτουργίας σε ΣΙ 0,9-0,95 επαγωγικό και σε τάση 1.1. α.μ., γιατί δίνει τη δυνατότητα για περαιτέρω καταπονήσεις και υπερτάσεις) [30].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ DFIG

4.1. Επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας (DFIG)

Η επαγωγική ανεμογεννήτρια διπλής τροφοδοσίας (Doubly Fed Induction Generator, DFIG) αποτελείται από μία επαγωγική γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα με τυλίγματα του στάτη που συνδέονται απ' ευθείας στο δίκτυο και τυλίγματα του δρομέα που συνδέονται σε αυτό μέσω ενός back-to-back μετατροπέα ο οποίος δίνει τη δυνατότητα αμφίδρομης ροής ισχύος.

Η διπλή τροφοδότηση οφείλεται στο ότι οι τάσεις του στάτη τροφοδοτούνται από το δίκτυο ενώ οι τάσεις του δρομέα από τον μετατροπέα ισχύος επιτρέποντας μεταβλητές στροφές σε μεγάλο εύρος.

Η αναφορά στην ομαλή-κανονική και μη-ομαλή κατάσταση λειτουργίας της DFIG, με βάση το πλάτος της τάσης κάθε φάσης του τριφασικού συστήματος, γίνεται λόγω των **πλεονεκτημάτων** που παρουσιάζει όπως [32]:

- i. ικανότητα ανεξάρτητου ελέγχου της ενεργού και άεργου ισχύος του στάτη (λόγω ελέγχου του συντελεστή ισχύος),
- ii. παροχή σταθερής τάσης και συχνότητας,
- iii. απαιτούμενη είναι χαμηλότερη ονομαστική ισχύς των μετατροπέων (οι μετατροπείς διαχειρίζονται ένα μικρό ποσοστό της συνολικής ισχύος),
- iv. μειωμένες μηχανικές καταπονήσεις και
- v. δυνατότητα μεταβολής της ταχύτητας του δρομέα σύμφωνα με την ταχύτητα του ανέμου.

Το κύριο μειονέκτημα της DFIG είναι η χρήση δακτυλιδιών/ψηκτρών που λόγω της φθοράς τους πρέπει συχνά να ελέγχονται και να συντηρούνται. Επίσης, απαιτείται κύκλωμα αυξημένης προστασίας μετατροπέων σε περίπτωση σφαλμάτων.

4.2. Καταστάσεις λειτουργίας DFIG

4.2.1. Κανονική λειτουργία

Η μοντελοποίηση της DFIG και οι διάφοροι τύποι που περιγράφουν τις παραμέτρους της βασίζονται στο πλαίσιο αναφοράς του στάτη. Συνεπώς όλες οι παράμετροι του δρομέα είναι ανηγμένες βάση αυτού του πλαισίου αναφοράς [23]. Σύμφωνα με τους Abad G. et al.

[13] οι τάσεις του τριφασικού δικτύου συναρτήσει του σταθερού διανύσματος πλάτους της τάσης του δικτύου V_g (η τάση του δικτύου είναι ίση με τη τάση του στάτη, διότι ο στάτης συνδέεται απευθείας με το δίκτυο) είναι (σχέσεις 4.1-4.3):

$$V_a = V_g \cdot \cos(\omega_s t + \varphi) \quad (4.1)$$

$$V_b = V_g \cdot \cos(\omega_s t + \varphi + 120^\circ) \quad (4.2)$$

$$V_c = V_g \cdot \cos(\omega_s t + \varphi - 120^\circ) \quad (4.3)$$

Οι σχέσεις 4.4 έως 4.7 περιγράφουν την DFIG [13], [24], [27]:

$$\vec{V}_s^s = R_s \cdot \vec{i}_s^s + \frac{d\vec{\Psi}_s^s}{dt} \quad (4.4)$$

$$\vec{V}_r^s = R_r \cdot \vec{i}_r^s + \frac{d\vec{\Psi}_r^s}{dt} - j \cdot \omega_m \cdot \vec{\Psi}_r^s \quad (4.5)$$

$$\vec{\Psi}_s^s = L_s \cdot \vec{i}_r^s + L_m \cdot \vec{i}_r^s \quad (4.6)$$

$$\vec{\Psi}_r^s = L_m \cdot \vec{i}_s^s + L_r \cdot \vec{i}_r^s \quad (4.7)$$

Όπου: V = η τάση,
 i = το ρεύμα,
 ψ = η μαγνητική ροή,
 L = η αυτεπαγωγή,
 R = η αντίσταση,
 L_m = η αυτεπαγωγή μαγνήτισης
 ω_m = είναι η μηχανική γωνιακή ταχύτητα περιστροφής.

Οι εκθέτες s και r υποδηλώνουν την ανάλυση των χωρικών διανυσμάτων ως προς τα πλαίσια αναφοράς του στάτη και του δρομέα, ενώ οι δείκτες s και r αντιπροσωπεύουν το στάτη και το δρομέα. Συνεπώς στην κατάσταση κανονικής λειτουργίας της γεννήτριας το χωρικό διάνυσμα τάσης του στάτη, στρεφόμενο ως προς τη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής ω_s , δίνεται από τη σχέση:

$$\vec{V}_s^s = V_g \cdot e^{j\omega_s t} \quad (4.8)$$

Η σχέση με την οποία υπολογίζεται η ροή του στάτη (4.9), δεδομένου ότι η αντίσταση στάτη R_s είναι αρκετά μικρή και αμελείται, δίνεται μέσω των σχέσεων (4.4) και (4.8):

$$\vec{\Psi}_s^s = \frac{V_g}{j \cdot \omega_s} \cdot e^{j \cdot \omega_s \cdot t} \quad (4.9)$$

Το χωρικό διάνυσμα ροής του στάτη είναι ένα διάνυσμα σταθερού πλάτους, ανάλογο της τάσης του δικτύου, αντιστρόφως ανάλογο της σύγχρονης ταχύτητας που στρέφεται

ανάλογα με τη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής. Επιπλέον, η ροή του στάτη δημιουργεί μεταβαλλόμενη ροή διαμήκους του δρομέα. Η τάση του δρομέα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\vec{u}_r^s = j \cdot \omega_r \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot \vec{\psi}_s^s = \frac{L_m}{L_s} \cdot \frac{\omega_r}{\omega_s} \cdot V_g \cdot e^{j \cdot \omega_s \cdot t} \quad (4.10)$$

και είναι ανάλογη της ολίσθησης ($s = \frac{\omega_r}{\omega_s}$), της διαφοράς δηλαδή μεταξύ της σύγχρονης ταχύτητας και της ταχύτητας του δρομέα. Το πλάτος της τάσης του δρομέα εκφράζεται συναρτήσει του πλάτους της τάσης του δικτύου μέσω της σχέσης:

$$|\vec{u}_r^s| = \vec{V}_g \frac{L_m \cdot \omega_r}{L_s \cdot \omega_s} = \vec{V}_g \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot s \quad (4.11)$$

Οι DFIG χρησιμοποιούνται κυρίως σε μικρό εύρος ταχυτήτων και ολίσθησης κοντά στο $\pm 20\%$, οπότε η τάση του δρομέα είναι αρκετά μικρότερη από τη τάση του στάτη.

Στην κανονική λειτουργία της γεννήτριας η τάση του δρομέα συμπεριλαμβάνει και το ρεύμα που ρέει πάνω του, μέσω των μετατροπών. Αυτό συμβαίνει για την επίτευξη των ονομαστικών μεγεθών της ενεργού και άεργου ισχύος. Επομένως, η τάση του δρομέα ανηγμένη στο δρομέα δίνεται από τη σχέση:

$$\vec{v}_r^s = \vec{V}_g \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot s + \left(R_r + \sigma \cdot L_r \cdot \frac{d}{dt} \right) \cdot \vec{i}_r^s \quad (4.12)$$

Όπου $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s \cdot L_r}$ είναι ο συντελεστής διαρροής (leakage factor) δηλαδή ο λόγος της συνολικής μαγνητικής ροής προς τη χρησιμοποιούμενη μαγνητική ροή. Δεδομένου ότι η αντίσταση του δρομέα και ο όρος $\sigma \cdot L_r$ είναι συχνά πολύ μικροί, η τάση του δρομέα που υπολογίζεται από την εξίσωση (4.12) δεν διαφέρει από αυτή της σχέσης (4.11) [27]. Στην περίπτωση που ο δρομέας είναι ανοιχτοκυκλωμένος τότε το διάνυσμα της τάσης του δρομέα που προκαλείται από τη ροή του στάτη δίνεται από τη σχέση:

$$\vec{v}_{r0}^s = \frac{L_m}{L_s} \cdot \left(\frac{d}{dt} - j\omega \right) \vec{\psi}_s^s \quad (4.13)$$

4.2.2. Συμμετρικές βυθίσεις τάσεως

Θα εξεταστεί η περίπτωση μιας ξαφνικής πτώσης τάσεως μεταξύ των τριών φάσεων του δικτύου, το πλάτος της οποίας είναι το ίδιο σε κάθε φάση του δικτύου. Έστω ότι η χρονική στιγμή επίδρασης της βύθισης τάσεως είναι $t = t_0$. Με την υπόθεση ότι η αρχική ονομαστική τιμή της τάσης του δικτύου είναι: $V_{pre} = V_g$ και η τελική τιμή της τάσης του δικτύου μετά την εκκαθάριση του σφάλματος είναι η $V_{fault} = (1 - p) \cdot V_g$, μπορούν να υπολογιστούν τα μεγέθη και οι παράμετροι της υπό μελέτης γεννήτριας. Συνεπώς η τάση του στάτη υπολογίζεται ως εξής:

$$\vec{v}_s = \begin{cases} \vec{V}_{pre} \cdot e^{j\omega_s t} = \vec{V}_g \cdot e^{j\omega_s t}, & t < t_0 \\ \vec{V}_{fault} \cdot e^{j\omega_s t} = (1-p) \cdot \vec{V}_g \cdot e^{j\omega_s t}, & t \geq t_0 \end{cases} \quad (4.14)$$

όπου $p = \frac{V_{pre}}{V_{fault}}$, δηλαδή το πλάτος της βύθισης τάσεως.

Η σταθερής κατάστασης ροή του στάτη υπολογίζεται από τις εξισώσεις (4.9) και (4.14) ως εξής:

$$\vec{\Psi}_{steady}^s = \begin{cases} \frac{\vec{V}_g}{j\omega_s} \cdot e^{j\omega_s t}, & t < t_0 \\ \frac{(1-p) \cdot \vec{V}_g}{j\omega_s} \cdot e^{j\omega_s t}, & t \geq t_0 \end{cases} \quad (4.15)$$

Η ροή του στάτη αποτελείται από το άθροισμα δύο παραγόντων, της ροής σταθερής κατάστασης (steady state flux) και της ροής μεταβατικής κατάστασης (transient state flux). Η ροή μεταβατικής κατάστασης του στάτη υπολογίζεται ως εξής [6],[8],[10],[11]:

$$\vec{\Psi}_{transient}^s = \begin{cases} 0, & t < t_0 \\ \frac{p \cdot \vec{V}_g}{j\omega_s} \cdot e^{-t \frac{R_s}{L_s}}, & t \geq t_0 \end{cases} \quad (4.16)$$

Η ροή του στάτη θα πρέπει να παραμείνει σταθερή πριν και μετά την εφαρμογή της βύθισης της τάσεως. Οπότε για την αποφυγή στιγμιαίων μεταβολών στη ροή του στάτη, θα πρέπει η συνολική ροή του στάτη να ικανοποιεί τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\vec{\Psi}_{steady}^s(t_0^-) = \vec{\Psi}_{steady}^s(t_0^+) \quad (4.17)$$

$$\vec{\Psi}_{steady}^s(t_0^-) + \vec{\Psi}_{transient}^s(t_0^-) = \vec{\Psi}_{steady}^s(t_0^+) + \vec{\Psi}_{transient}^s(t_0^+) \quad (4.18)$$

Συνεπώς η συνολική ροή του στάτη υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$\vec{\Psi}_s^s = \begin{cases} \frac{\vec{V}_g}{j\omega_s} \cdot e^{j\omega_s t}, & t < t_0 \\ \frac{(1-p) \cdot \vec{V}_g}{j\omega_s} \cdot e^{j\omega_s t} + \frac{p \cdot \vec{V}_g}{j\omega_s} \cdot e^{-t \frac{R_s}{L_s}}, & t \geq t_0 \end{cases} \quad (4.19)$$

όπου $\tau_s = \frac{L_s}{R_s}$ είναι η χρονική σταθερά του στάτη και $\vec{\Psi}_0^s = \frac{p \cdot \vec{V}_g}{j\omega_s}$ είναι η αρχική τιμή της φυσικής ροής. Η φυσική ροή αποτελεί την ομογενή λύση της συνήθους διαφορικής εξίσωσης η οποία αναλύει το ρυθμό μεταβολής της ροής από τη σταθερή κατάσταση στη μεταβατική κατάσταση. Η διαφορική εξίσωση αυτή είναι η εξής:

$$\frac{d}{dt} \vec{\Psi}_s^s = \vec{v}_s - \frac{R_s}{L_s} \cdot \vec{\Psi}_s^s \quad (4.20)$$

Από την εξίσωση (4.19) γίνεται αντιληπτό ότι η συνιστώσα σταθερής κατάστασης της ροής του στάτη πριν και μετά τη βύθιση της τάσης είναι ανάλογη της αρχικής τάσης του

στάτη V_{pre} και της τελικής τιμής της τάσης του στάτη μετά την εκκαθάριση του σφάλματος V_{fault} , αντίστοιχα.

4.2.3. Ασύμμετρες βυθίσεις τάσεως

Η χρήση της μεθόδου αυτής είναι σημαντική γιατί βοηθάει στην αναπαράσταση των μη ισορροπημένων συστημάτων σε τρία ισορροπημένα υποσυστήματα. Η ανάλυση των μη ισορροπημένων τριφασικών συστημάτων στις εξισώσεις της θετικής, αρνητικής και μηδενικής συνιστώσας σύμφωνα με Prabha K. [28] και Das J. [16], γίνεται μέσω της σχέσης:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Η ανάλυση του τριφασικού συστήματος από τη συνιστώσα της θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας σύμφωνα με Prabha K. [28] και Das J. [16], γίνεται μέσω της σχέσης:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Συνήθως η συνιστώσα μηδενικής ακολουθίας στις διπλά τροφοδοτούμενες επαγωγικές γεννήτριες δεν λαμβάνεται υπόψιν. Η θετικής ακολουθίας συνιστώσα στρέφεται με τη συχνότητα του δικτύου έχοντας σταθερό πλάτος, ενώ η αρνητικής ακολουθίας συνιστώσα στρέφεται έχοντας την αντίθετη συχνότητα του δικτύου (αντιωρολογιακή φορά). Ενώ η μηδενικής ακολουθίας συνιστώσα δεν επιφέρει καμία ροή στο σύστημα. Συνεπώς το διάνυσμα της τάσης του στάτη μπορεί να περιγραφεί από τη εξίσωση:

$$\vec{v}_s^s = \vec{V}_1 \cdot e^{j\omega_s t} + \vec{V}_2 \cdot e^{-j\omega_s t} + \vec{V}_0 \quad (4.23)$$

Αγνοώντας τη συνιστώσα μηδενικής ακολουθίας, ισχύει:

$$\vec{v}_s^s = \vec{V}_1 \cdot e^{j\omega_s t} + \vec{V}_2 \cdot e^{-j\omega_s t} \quad (4.24)$$

Στη κατάσταση κανονικής λειτουργίας, η ροή του στάτη αποτελείται από το άθροισμα δύο παραμέτρων, προερχόμενες η πρώτη από τη συνιστώσα θετικής ακολουθίας ($\vec{\psi}_{s1}$) και η δεύτερη από τη συνιστώσα αρνητικής ακολουθίας ($\vec{\psi}_{s2}$). Οι οποίες υπολογίζονται, δεδομένου του ότι η αντίσταση του στάτη αγνοείται, από τις σχέσεις:

$$\vec{\psi}_{s1} = \frac{\vec{V}_1}{j\omega_s} \cdot e^{j\omega_s t} \quad (4.25)$$

$$\vec{\psi}_{s2} = \frac{\vec{V}_2}{-j\omega_s} \cdot e^{-j\omega_s t} \quad (4.26)$$

Η κάθε ροή σύμφωνα με το πλάτος της δημιουργεί μία τάση στο δρομέα, οπότε η συνολική τιμή της τάσης του δρομέα, όταν είναι ανοιχτοκυκλωμένος, αναλύεται στο άθροισμα της εξίσωσης:

$$\vec{v}_{r0}^r = \vec{V}_{r1} + \vec{V}_{r2} + \vec{V}_{rn} \quad (4.27)$$

Αντικαθιστώντας στη σχέση (4.13) τις ροές των σχέσεων (4.25), (4.26) υπολογίζονται οι τάσεις της θετικής και αρνητικής ακολουθίας, έχοντας ως πλαίσιο αναφοράς αυτό του δρομέα, ως εξής:

$$\vec{v}_{r1}^r = \vec{V}_1 \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot s \cdot e^{js\omega_s t} \quad (4.28)$$

$$\vec{v}_{r2}^r = \vec{V}_2 \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot (2 - s) \cdot e^{-j(2-s)\omega_s t} \quad (4.29)$$

Από τις εξισώσεις (4.28) και (4.29), γίνεται αντιληπτό ότι η τιμή της δεύτερης εξίσωσης μπορεί να είναι σχεδόν διπλάσια από αυτή της πρώτης εξίσωσης κατά τη διάρκεια βυθίσεων τάσεως, διότι η τιμή της ολίσθησης είναι σχετικά μικρή.

Η τιμή της τάσης της φυσικής ροής εξαρτάται από την αρχική της τιμή και υπολογίζεται από τη σχέση [6], [9], [11]:

$$\vec{V}_{rn} = -\frac{L_m}{L_s} \left(\frac{1}{\tau_s} + j\omega_r \right) \cdot \vec{\Psi}_0^s \cdot e^{-t/\tau_s} \cdot e^{j\omega_r t} \quad (4.30)$$

Μονοφασικό βραχυκύκλωμα

Έστω ότι συμβαίνει ένα βραχυκύκλωμα μεταξύ της φάσης α και της γης. Τότε η τάση του δικτύου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\vec{V}_a = \vec{V}_g \cdot (1 - p) \quad (4.31)$$

$$\vec{V}_b = \vec{V}_g \cdot \alpha^2 \quad (4.32)$$

$$\vec{V}_c = \vec{V}_g \cdot \alpha \quad (4.33)$$

Η ανάλυση των εξισώσεων (4.31 ως 4.33) στη θετική, αρνητική και μηδενική συνιστώσα γίνεται μέσω της σχέσης:

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_1 \\ \vec{V}_2 \\ \vec{V}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{V}_g \cdot (1 - p) \\ \vec{V}_g \cdot \alpha^2 \\ \vec{V}_g \cdot \alpha \end{bmatrix} = \vec{V}_g \cdot \begin{bmatrix} 1 - p/3 \\ -p/3 \\ -p/3 \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

Από τις σχέσεις (4.28) και (4.29) η τιμή της τάσης της θετικής και αρνητικής ακολουθίας συνιστώσας δίνονται από τις σχέσεις:

$$\vec{v}_{r1}^r = \vec{V}_g \cdot \left(1 - \frac{p}{3} \right) \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot s \cdot e^{js\omega_s t} \quad (4.35)$$

$$\vec{v}_{r2}^r = \vec{V}_g \cdot \left(-\frac{p}{3} \right) \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot (2 - s) \cdot e^{-j(2-s)\omega_s t} \quad (4.36)$$

Η συνολική ροή είναι συνεχής, συνεπώς ο υπολογισμός της φυσικής ροής γίνεται σύμφωνα με τη συνέχεια των αρχικών συνθηκών. Οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της συνέχειας της ροής είναι:

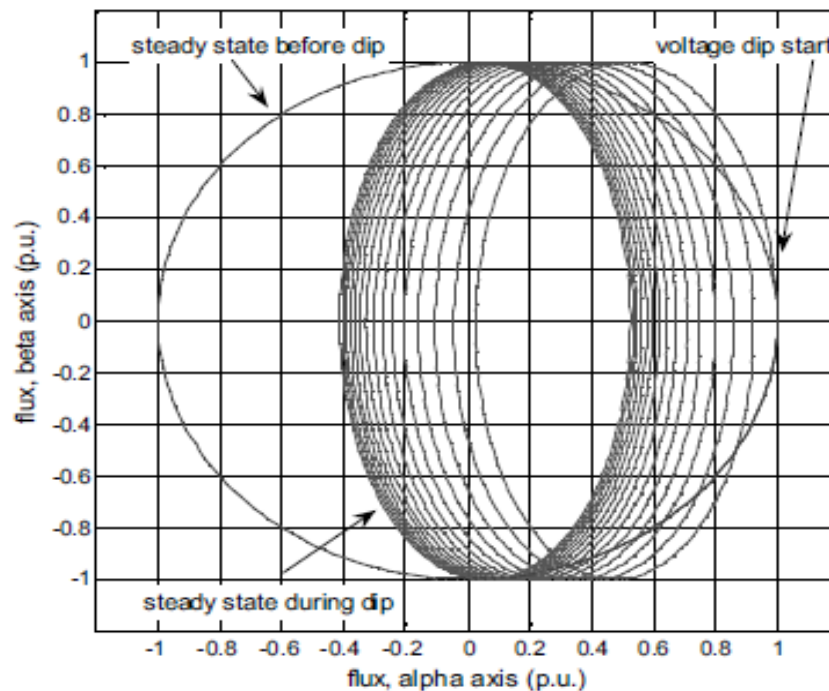
$$\vec{\Psi}_s(t_0^-) = \vec{\Psi}_s(t_0^+) \quad (4.37)$$

$$\vec{\Psi}_s(t_0^-) = \vec{\Psi}_{s1}(t_0^+) + \vec{\Psi}_{s2}(t_0^+) + \vec{\Psi}_{sn}(t_0^+) \quad (4.38)$$

Συνεπώς από την ανάλυση των Abad G. et al. [6] και Lopez J. et al. [9] η χειρότερη περίπτωση για ένα μονοφασικό βραχυκύκλωμα είναι όταν αυτό συμβαίνει σε χρόνο ίσο με το $t_0 = 1/4$ επί της περιόδου του δικτύου. Η μεταβολή της ροής του στάτη για μονοφασική βύθιση τάσεως 0.5 α.μ. η οποία εφαρμόζεται για χρόνο $t_0 = T/4$ είναι αυτή που φαίνεται στο σχήμα 2.3. Η αρχική τιμή της φυσικής ροής υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\vec{\Psi}_{sn} = \frac{V_g \frac{2}{3} p}{\omega_s} \cdot e^{-t/\tau_s} \quad (4.39)$$

Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζεται η τροχιά της ροής του στάτη στη περίπτωση εφαρμογής μονοφασικής βύθισης τάσεως 50% τη χρονική στιγμή $t_0 = T/4$. Από το σχήμα 4.1 η τροχιά της συνιστώσας της θετικής και αρνητικής ακολουθίας μετά την επίδραση της μονοφασικής βύθισης είναι ελλειπτικές. Ωστόσο, η τροχίες των συνιστωσών αυτών γίνονται εφαπτόμενες μεταξύ τους, λόγω της επίδρασης της φυσικής ροής. Καθώς η επίδραση της φυσικής ροής τείνει να μηδενιστεί η έλλειψη επανέρχεται στο κέντρο της (αρχική κατάσταση).



Σχήμα 4.1. Η τροχιά της ροής του στάτη για μια μονοφασική βύθιση τάσεως 0.5 α.μ. [13],[27]

Διφασικό βραχυκύκλωμα

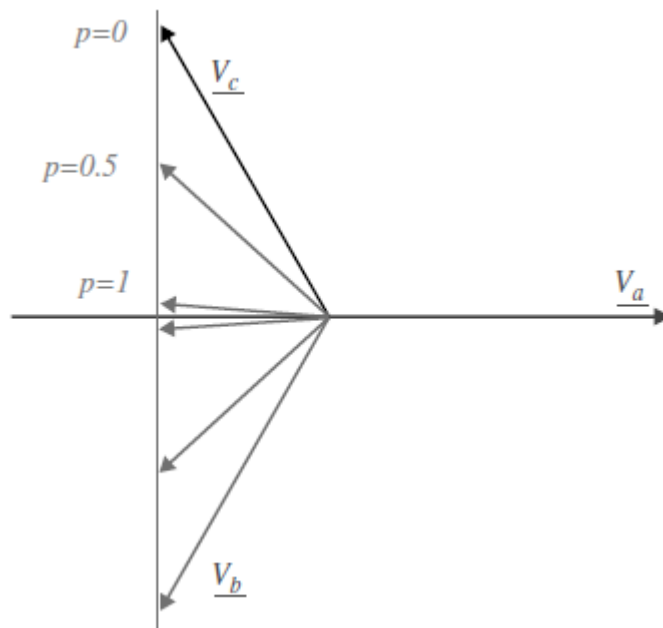
Το διφασικό βραχυκύκλωμα συμβαίνει όταν βραχυκυκλωθούν δύο φάσεις μεταξύ τους, όπως για παράδειγμα η βραχυκύκλωση των φάσεων a και b ή b και c. Μετά το βραχυκύκλωμα οι τάσεις των δύο φάσεων υφίστανται πτώση. Δεδομένου ότι η σύνθετη αντίσταση της θετικής και αρνητικής ακολουθίας είναι ίσες, η τάση της φάσης a (αν έχουμε βραχυκύκλωμα μεταξύ των φάσεων b και c) θα είναι η ίδια. Επομένως, οι τάσεις των τριών φάσεων υπολογίζονται από:

$$\vec{V}_a = \vec{V}_g \quad (4.40)$$

$$\vec{V}_b = \vec{V}_g \cdot \left(\alpha^2 + j \frac{\sqrt{3}}{2} p \right) \quad (4.41)$$

$$\vec{V}_c = \vec{V}_g \cdot \left(\alpha - j \frac{\sqrt{3}}{2} p \right) \quad (4.42)$$

Από τις εξισώσεις (4.40 ως 4.42) φαίνεται ότι όσο το πλάτος της βύθισης της τάσης μεγαλώνει τόσο οι εξισώσεις των φάσεων b και c τείνουν να γίνουν ίσες. Αυτό γίνεται αντιληπτό από το σχήμα 2.4 στο οποίο φαίνονται τα πλάτη των τριών φάσεων για διάφορα πλάτη βύθισης τάσεως ($p = 0/0.5/1$).



Σχήμα 4.2. Πλάτη των τάσεων a,b,c διφασικού βραχυκυκλώματος για βάθη $p = 0/0.5/1$ [13]

Η ανάλυση του τριφασικού συστήματος στη θετική, αρνητική και μηδενική συνιστώσα υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_1 \\ \vec{V}_2 \\ \vec{V}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{V}_g \\ \vec{V}_g \cdot (\alpha^2 + j\frac{\sqrt{3}}{2}p) \\ \vec{V}_g \cdot (\alpha - j\frac{\sqrt{3}}{2}p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{V}_g \cdot (1 - p/2) \\ \vec{V}_g \cdot p/2 \\ \vec{V}_g \cdot p/2 \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

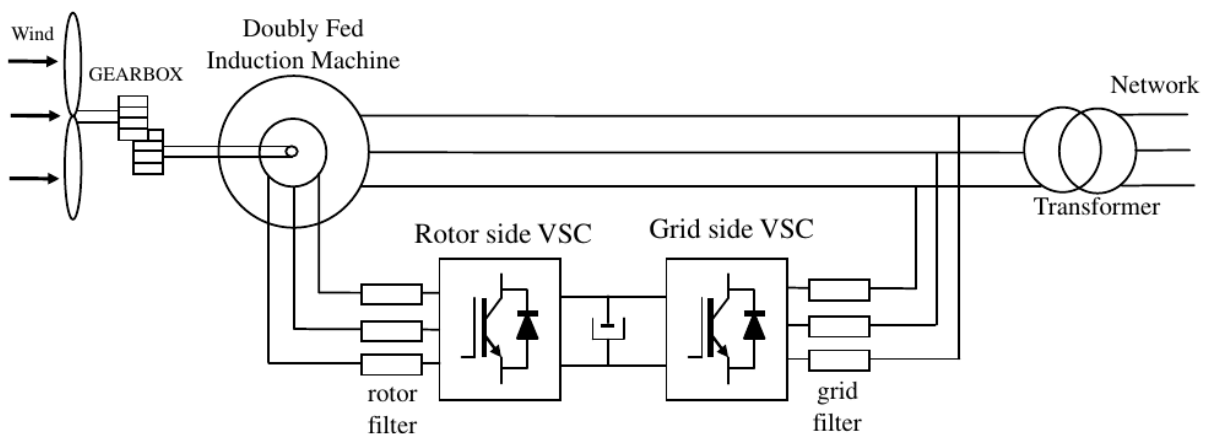
Αντικαθιστώντας στις σχέσεις (4.25) και (4.26) την (4.43) υπολογίζεται η ροή της θετικής και αρνητικής ακολουθίας. Επίσης, από τις σχέσεις (4.28) και (4.29) πάλι με αντικατάσταση της σχέσης (4.43) υπολογίζεται το πλάτος της τάσης της θετικής και αρνητικής ακολουθίας του συστήματος υπό διαφασικό βραχυκύκλωμα.

Η αρχική τιμή της φυσικής ροής είναι [13],[26],[27]:

$$\vec{\Psi}_{sn} = \frac{V_g}{j \cdot \omega_s} \cdot p \quad (4.44)$$

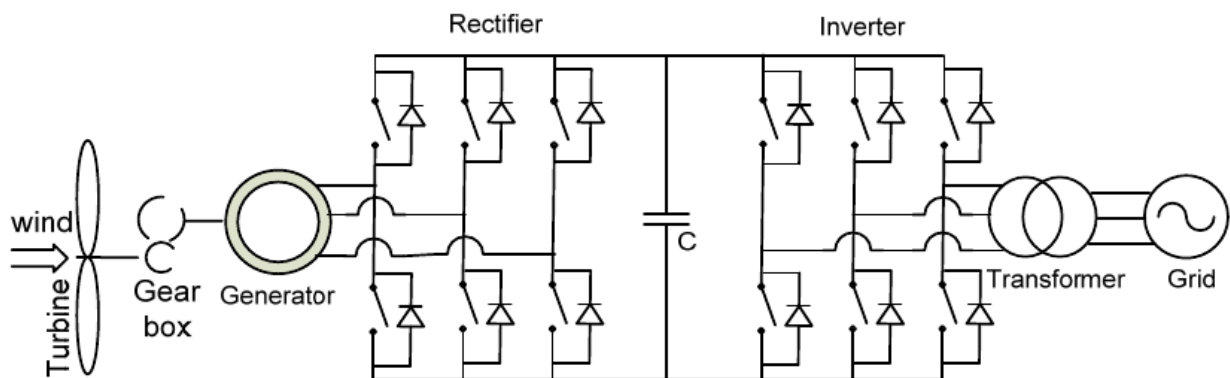
4.3. Μετατροπέας ισχύος της DFIG

Κατά την μοντελοποίηση και τη μελέτη των επιμέρους συστημάτων της DFIG δίνεται έμφαση στον μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου με τον έλεγχο του άεργου ρεύματος και ικανοποιώντας τις απαιτήσεις του Ελληνικού Κώδικα διασύνδεσης στο δίκτυο. Ο τρόπος σύνδεσης με το δίκτυο γίνεται μέσω **back-to-back converter** (σχήμα 4.3) [15].



Σχήμα 4.3. Επαγωγική ανεμογεννήτρια διπλής τροφοδοσίας [7] [15] [16]

Ο μετατροπέας ισχύος back-to-back από την πλευρά της μηχανής (**Machine Side Converter, MSC**) αποτελείται από τον μετατροπέα από την πλευρά του δρομέα (**Rotor Side Converter, RSC**) που λειτουργεί ως ανορθωτής τύπου πηγής τάσης και από τον μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου (**Grid Side Converter, GSC**) που λειτουργεί ως αντιστροφέας πηγής τάσης (σχήμα 4.3 και 4.4) Οι δύο αυτοί μετατροπείς συνδέονται μεταξύ τους μέσω μιας DC σύνδεσης και ενός πυκνωτή. Η dc-σύνδεση προσφέρει τη δυνατότητα λειτουργίας της γεννήτριας σε συχνότητα διαφορετική από αυτή του δικτύου για την επίτευξη **του σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT)**. Για επίτευξη βέλτιστης ισχύος εξόδου θα πρέπει η τάση του πυκνωτή να διατηρείται σταθερή. Η πλήρης απόζευξη γεννήτριας και δικτύου, έχει ως αποτέλεσμα τον ευκολότερο έλεγχο κατά τη διάρκεια σφαλμάτων (π.χ. βύθιση τάσης) και κατ' επέκταση τη μείωση των μεταβατικών φαινομένων.



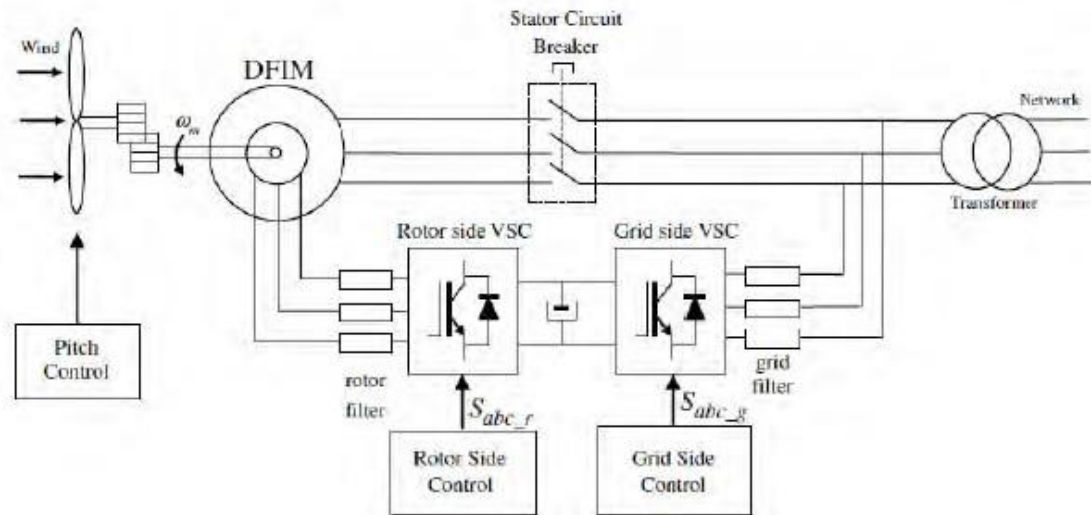
Σχήμα 4.4. Σύστημα back-to-back μετατροπέα της Α/Γ [18]

Η γεννήτρια αυτού του τύπου χρησιμοποιεί μηχανή με δακτυλιοφόρο δρομέα τα τυλίγματα του οποίου συνδέονται σε ένα μετατροπέα AC/DC/AC. Η γωνιακή ταχύτητα είναι ανάλογη της συχνότητας του στάτη (f_{grid}) και της συχνότητας του δρομέα ($f_{converter}$). Το σύστημα επιτρέπει τη λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας γύρω από ένα εύρος ταχυτήτων, συγκεκριμένων ορίων, που σχετίζεται με το μέγεθος του μετατροπέα και η τυπική του τιμή είναι 30% της ονομαστικής ισχύος της Α/Γ. Η συμπεριφορά της γεννήτριας, τόσο κατά τη διάρκεια κανονικής λειτουργίας όσο και κατά τη διάρκεια των σφαλμάτων, καθορίζεται από το μετατροπέα και τους ελεγκτές του [33].

Έτσι παρουσιάζεται μείωση των απωλειών και του κόστους, συγκριτικά με ένα σύστημα όπου ο μετατροπέας του χειρίζεται τη συνολική ισχύ. Σημαντική είναι η ικανότητα της μηχανής να ελέγχει την άεργο ισχύ και να αποσυνδέει τον έλεγχο της ενεργού και άεργου ισχύος με ανεξάρτητο έλεγχο του ρεύματος του δρομέα. Έχει τη δυνατότητα παραγωγής αέργου ισχύος που τροφοδοτείται στο στάτη από τον μετατροπέα από την πλευρά του

δικτύου που λειτουργεί σε μοναδιαίο συντελεστή ισχύος και δεν περιλαμβάνεται στην ανταλλασσόμενη άεργο ισχύ μεταξύ της Α/Γ και του δικτύου. Τέλος, δίνεται η δυνατότητα ρύθμισης της DFIG ανεμογεννήτριας ώστε να παράγει ή να καταναλώνει ποσά αέργου ισχύος σε περίπτωση που το δίκτυο είναι ασθενές, στοχεύοντας στον έλεγχο της τάσης.

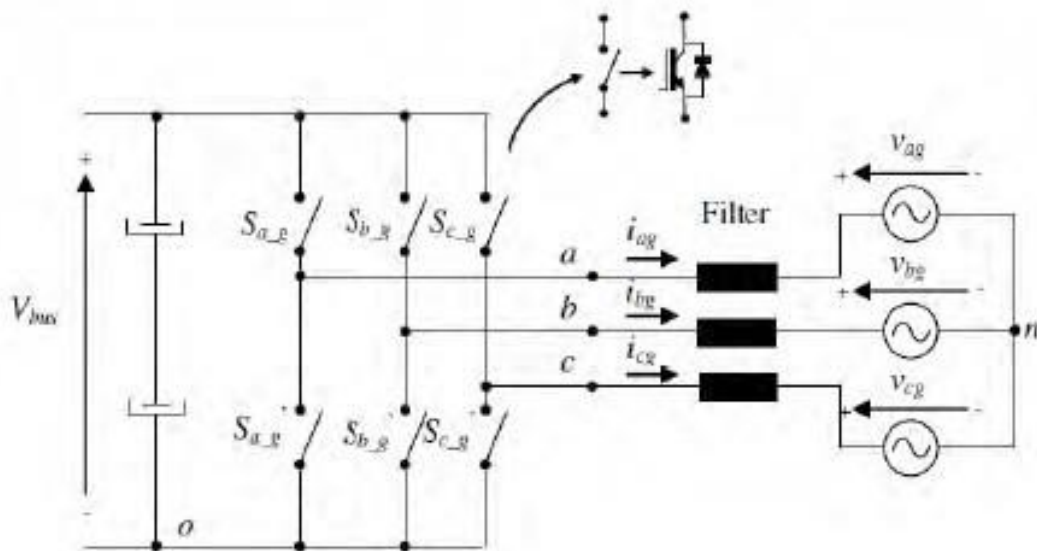
Το απλοποιημένο σχήμα μίας DFIG ανεμογεννήτριας είναι αυτό που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.5. Στο σχήμα αυτό φαίνεται η σύνδεση του back-to-back μετατροπέα μέσω φίλτρων που συνδέουν το μετατροπέα με το δρομέα και τον μετατροπέα με το δίκτυο.



Σχήμα 4.5. Διαμόρφωση του back-to-back μετατροπέα της DFIG [34].

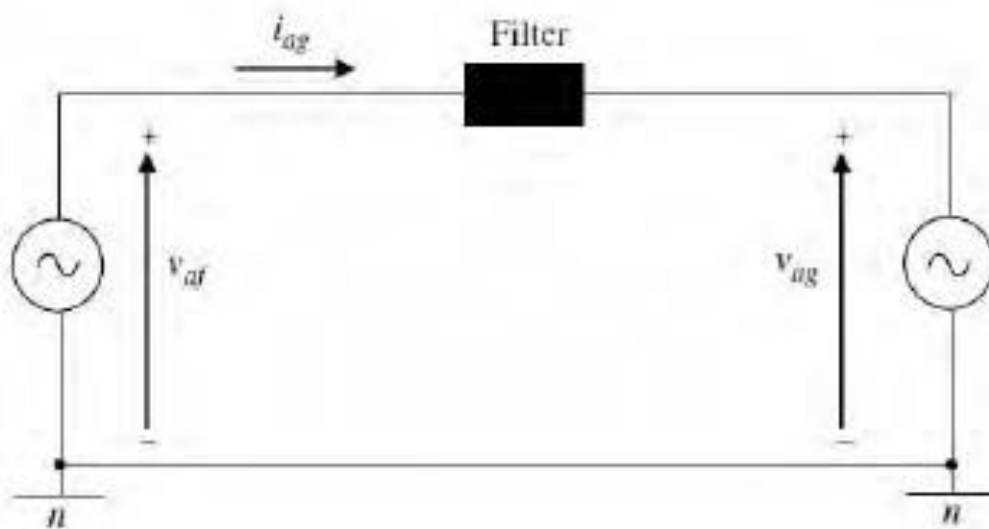
4.3.1. Μετατροπέας από πλευράς δικτύου

Στο σχήμα 4.6 φαίνεται ο μετατροπέας για τον οποίο αναφερόμαστε (όπως γνωρίζουμε αποτελεί έναν τριφασικό αντιστροφέα Πηγής-Τάσης). Στην περίπτωση αυτού του αντιστροφέα χρησιμοποιούνται IGBT (διπολικό τρανζίστορ μονωμένης πύλης) ως διακόπτες οι οποίοι βρίσκονται είτε σε κατάσταση αγωγής, είτε σε κατάσταση αποκοπής. Η αντιπαράλληλη τοποθέτηση της διόδου επιτρέπει τη ροή του ρεύματος και προς τις δύο κατευθύνσεις.



Σχήμα 4.6. Μοντέλο του grid side converter (GSC).[14]

Το φίλτρο αποτελείται από τρεις αυτεπαγωγές (L), οι οποίες συνδέουν τη κάθε φάση εξόδου του μετατροπέα με το δίκτυο. Στην περίπτωση που απαιτείται ένα υψηλό φίλτρο, τότε η τοπολογία του L-filter μετατρέπεται σε τοπολογία LC-filter ή σε LCL-filter. Η τάση του δικτύου θεωρείται ότι είναι ημιτονοειδής και χωρίς διακυμάνσεις (ισορροπημένη), υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Η τάση δικτύου μοντελοποιείται ως μία ιδανική τριφασική τάση. Συνεπώς, μπορούμε να αντιπροσωπεύσουμε την τριφασική πηγή τάσης ως τρία ανεξάρτητα μονοφασικά συστήματα. Το μονοφασικό ισοδύναμο είναι αυτό που φαίνεται στο σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.7. Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα grid side converter (GSC).[14]

Οι εξισώσεις που περιγράφουν το σύστημα είναι οι εξής:

$$V_a = R_f I_{ag} + L_f \cdot \frac{dI_{ag}}{dt} + V_{ag} \quad (4.45)$$

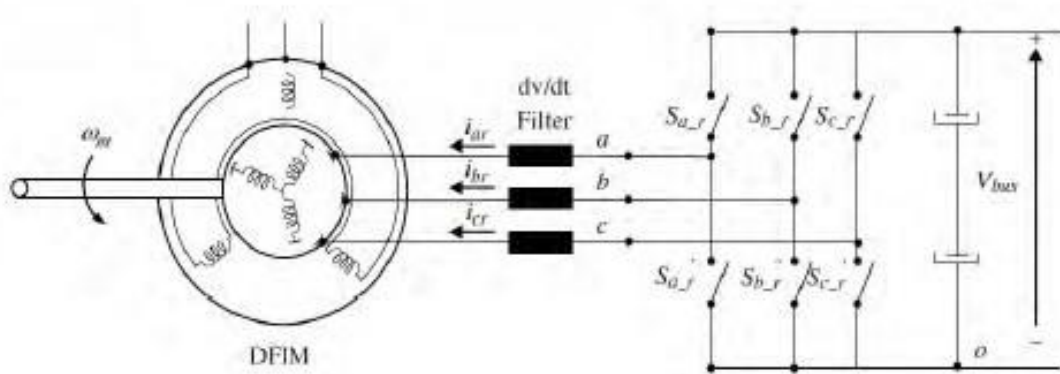
$$V_b = R_f I_{bg} + L_f \cdot \frac{dI_{bg}}{dt} + V_{bg} \quad (4.46)$$

$$V_c = R_f I_{cg} + L_f \cdot \frac{dI_{cg}}{dt} + V_{cg} \quad (4.47)$$

όπου: L_f : η αυτεπαγωγή του φίλτρου
 R_f : η αντίσταση του φίλτρου
 V_{ag}, V_{bg}, V_{cg} : τάσεις δικτύου
 I_{ag}, I_{bg}, I_{cg} : ρεύματα εξόδου μετατροπέα
 $V_\alpha, V_\beta, V_\gamma$: τάσεις εξόδου μετατροπέα

4.3.2. Μετατροπέας πλευράς δρομέα

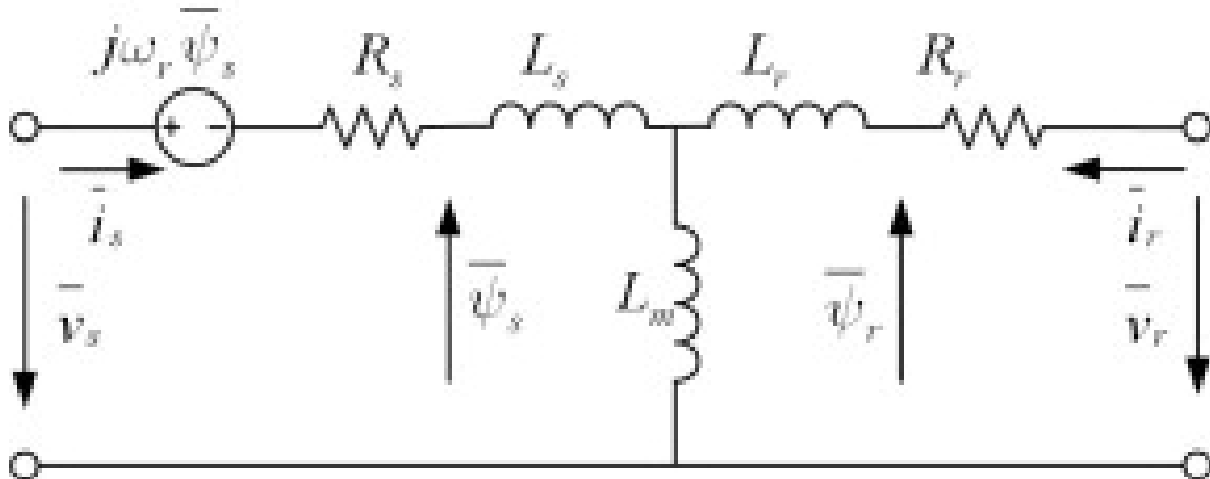
Ο μετατροπέας που χρησιμοποιείται για τη σύνδεση του δρομέα με τον back-to-back μετατροπέα είναι αυτός που φαίνεται στο σχήμα 4.8. Ο RSC είναι παρόμοιος με αυτόν που χρησιμοποιείται στη πλευρά του δικτύου, δηλαδή και στην περίπτωση αυτή έχουμε μετατροπέα πηγής τάσης (VSC) με χρήση θυρίστορ, των οποίων η αρίθμηση είναι σύμφωνη με τη σειρά αγωγής τους. Συγκεκριμένα, τα θυρίστορ της άνω γραμμής $S_{\alpha,r}, S_{\beta,r}, S_{\gamma,r}$ έχουν την αρίθμηση: D_1, D_3, D_5 και χρησιμοποιούνται για την ανόρθωση του θετικού μέρους ενώ τα θυρίστορ της κάτω γραμμής $S_{\alpha,r}, S_{\beta,r}, S_{\gamma,r}$ έχουν την αρίθμηση: D_4, D_6, D_2 και χρησιμοποιούνται για την ανόρθωση του αρνητικού μέρους. Επιπλέον μεταξύ του δρομέα και του μετατροπέα είναι τοποθετημένο το φίλτρο που κύριο στόχο έχει την προστασία της ανεμογεννήτριας ενώ οι δύο πλευρές του μετατροπέα ενώνονται μεταξύ τους μέσω μίας σύνδεσης DC. Η σύνδεση αυτή γίνεται με τη χρήση πυκνωτή. Αυτό οφείλεται στη δυνατότητα που έχει ο πυκνωτής να αποθηκεύει ενέργεια, επιπροσθέτως επιτυγχάνεται η διατήρηση σταθερής τάσης στα τερματικά του μετατροπέα.



Σχήμα 4.8. Μοντέλο του rotor side converter (RSC).[14]

4.4. Ισοδύναμο κύκλωμα DFIG

Στο σχήμα 4.9 παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα της DFIG με τις απώλειες μαγνήτισης. Στην ανάλυση δεν λαμβάνεται υπόψη η αντίσταση R_m και οι απώλειες πυρήνα, οπότε μετά τη βραχυκύκλωση του δρομέα (V_r) θα έχουμε το ισοδύναμο κύκλωμα ασύγχρονης γεννήτριας βραχυκυκλωμένου δρομέα.



Σχήμα 4.9. Ισοδύναμο κύκλωμα της DFIG A/Γ [14]

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τα κυκλώματα του στάτη και του δρομέα είναι:

$$\vec{E}_1 = \vec{V}_s - (R_s + j\omega_1 L_{s1})\vec{I}_s \quad (\text{για ταχύτητα } \omega_1) \quad (4.48)$$

$$\vec{E}_2 = \vec{V}_r - (R_r + js\omega_1 L_{r1})\vec{I}_r \quad (\text{για ταχύτητα } \omega_2 = s \cdot \omega_1) \quad (4.49)$$

Πολλαπλασιάζοντας την 4.48 με το λόγο των τυλιγμάτων στάτη/δρομέα K_{sr} , έχουμε:

$$(R_r + js\omega_1 L_{r1})\vec{I}_r - \vec{V}_r = \frac{\vec{E}_2}{K_{sr}} \quad (4.50)$$

όπου: V_s : τάση στάτη
 V_r : τάση δρομέα
 I_s : ρεύμα στάτη
 I_r : ρεύμα δρομέα
 ω_1 : σύγχρονη ταχύτητα στάτη
 ω_2 : σύγχρονη ταχύτητα δρομέα
 s : ολίσθηση
 R_s : αντίσταση στάτη
 R_r : αντίσταση δρομέα
 L_{s1} : αυτεπαγωγή σκέδασης στάτη
 L_{r1} : αυτεπαγωγή σκέδασης δρομέα
 L_m : αυτεπαγωγή μαγνήτισης

Με βάση τις παρακάτω σχέσεις:

$$\vec{E}_2 = s \cdot \vec{E}_1 \cdot K_{sr} \quad (4.51)$$

$$R_r = R_r^r \cdot K_{sr}^2 \quad (4.52)$$

$$L_{rl} = L_{rl}^r \cdot K_{sr}^2 \quad (4.53)$$

$$\vec{V}_r = \vec{V}_r^r \cdot K_{sr} \quad (4.54)$$

$$\vec{I}_r = \frac{\vec{I}_r^r}{K_{sr}} \quad (4.55)$$

Υστερα από αντικατάσταση της σχέσης 4.51 και διαίρεση με την ολίσθηση s στη σχέση 4.50 έχουμε:

$$\left(\frac{R_r}{s} + j\omega_1 L_{rl} \right) \vec{I}_r - \frac{\vec{V}_r}{s} = \vec{E}_1 \quad (4.56)$$

Μέσω της σχέσης 4.56 έχουμε αναγωγή των μεγεθών του δρομέα στο πεδίο του στάτη. Η ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) \vec{E}_1 , μετά τον μετασχηματισμό, μπορεί να υπολογιστεί από το διανυσματικό άθροισμα των ρευμάτων I_s και I_r ως εξής:

$$E_1 = -j \cdot \omega_1 \cdot L_m \cdot (\vec{I}_s + \vec{I}_r) = -j \cdot \omega_1 \cdot L_m \cdot \vec{I}_m \quad (4.57)$$

όπου: \vec{I}_m : το ρεύμα αντίστασης μαγνήτισης.

Τελικά προκύπτουν οι σχέσεις:

$$\vec{V}_s = R_s \cdot \vec{I}_s + j \cdot \omega_1 \cdot L_m \cdot \vec{I}_m + j \cdot \omega_1 \cdot L_{s1} \cdot \vec{I}_s \quad (4.58)$$

$$\frac{\vec{V}_s}{s} = \frac{R_s}{s} + j \cdot \omega_1 \cdot L_m \cdot \vec{I}_m + j \cdot \omega_1 \cdot L_{rl} \cdot \vec{I}_r \quad (4.59)$$

Για τις ροές του δρομέα και του στάτη έχουμε:

$$\lambda_r = L_r \cdot \vec{I}_r + L_m \cdot \vec{I}_s \quad (4.60)$$

$$\lambda_s = L_s \cdot \vec{I}_s + L_m \cdot \vec{I}_r \quad (4.61)$$

Έχοντας $L_s = L_{s1} + L_m$ και $L_r = L_{rl} + L_m$ και μετά από συνδυασμό των παραπάνω σχέσεων έχουμε:

$$\vec{V}_s = R_s \cdot \vec{I}_s + j \cdot \omega_1 \cdot \lambda_s \quad (4.62)$$

$$\frac{\vec{V}_s}{s} = \frac{R_s}{s} + j \cdot \omega_1 \cdot \lambda_r \quad (4.63)$$

Η συνολική ενεργός ισχύς της μηχανής είναι:

$$P_{total} = P_s + P_r^r = 3\text{Re}(\vec{V}_s \cdot \vec{I}_s^*) + 3\text{Re}(\vec{V}_r \cdot \vec{I}_r^*) \quad (4.64)$$

και η συνολική άεργος ισχύς της είναι:

$$Q_{total} = Q_s + Q_r^r = 3\text{Im}(\vec{V}_s \cdot \vec{I}_s^*) + 3\text{Re}\left(\frac{\vec{V}_s \cdot \vec{I}_r^*}{s}\right) \quad (4.65)$$

Από τη σχέση 4.65, δηλαδή τη σχέση της άεργου ισχύος της Α/Γ, αποδεικνύεται και επιβεβαιώνεται ότι ο **μαγνητισμός** της γεννήτριας προκαλείται τόσο από τον στάτη όσο και από το δρομέα.

4.5. Απώλειες μαγνήτισης της DFIG

Σε μια συνηθισμένη επαγωγική μηχανή ο στάτης συνδέεται μέσω ενός μετατροπέα στο δίκτυο και σε χαμηλά φορτία είναι δυνατή η μείωση της απώλειας μαγνήτισης με μείωση της τιμής της ροής. Στην περίπτωση της DFIG δεν είναι δυνατόν να συμβεί κάτι τέτοιο γιατί ο στάτης συνδέεται απ' ευθείας στο δίκτυο και η ροή είναι σταθερή αφού και η τάση του δικτύου είναι σταθερή. Μπορεί όμως να επιτευχθεί μείωση των απωλειών μαγνήτισης με:

- Βραχυκύκλωση του στάτη σε χαμηλές ταχύτητες μεταφέροντας την ισχύ μέσω του μετατροπέα του δρομέα. Στην περίπτωση αυτή ένας διακόπτης αποσυνδέει τη γεννήτρια από το δίκτυο και ένας άλλο βραχυκυκλώνει τον στάτη της γεννήτριας. Έτσι, η μηχανή δουλεύει ως γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού αλλά ο μετατροπέας είναι συνδεδεμένος στον δρομέα και όχι στον στάτη, οπότε σε χαμηλές στροφές η τιμή της ροής μπορεί να μειωθεί.
- Σύνδεση των τυλιγμάτων του στάτη σε τρίγωνο (μεγάλες ταχύτητες) και αστέρα (μικρές ταχύτητες). Πραγματοποιείται στην περίπτωση αυτή αλλαγή συνδεσμολογίας τυλιγμάτων από αστέρα σε τρίγωνο, αφού μηδενιστεί η ισχύς της γεννήτριας και ένας διακόπτης αποσυνδέσει το στάτη από το δίκτυο. Μετά την αλλαγή της συνδεσμολογίας, η γεννήτρια συγχρονίζεται ξανά.

4.6. Αεροδυναμική ισχύς

Η βασική μαθηματική σχέση που εκφράζει την αεροδυναμική ισχύ που δέχεται ο αεροκινητήρας υπολογίζεται ως εξής [32], [35], [19]:

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot V_w^3 \quad (4.66)$$

όπου: ρ : η πυκνότητα του αέρα ($\rho \approx 1.1225 \text{ kg/m}^3$)

A : η επιφάνεια του δρομέα ($A = \pi R^2 \text{ m}^2$)

V_w : η ταχύτητα του ανέμου (m/s)

C_p : ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος

Η αεροδυναμική ισχύς της A/Γ είναι συνάρτηση πολλών μεταβλητών. Για τον υπολογισμό της παραμένει σταθερή η πυκνότητα του αέρα ρ και η ακτίνα της έλικας R. Η αεροδυναμική ισχύς εξαρτάται σημαντικά από την ταχύτητα του ανέμου, όπως φαίνεται από τον τύπο 4.66, γεγονός που υποδηλώνει ότι σε ταχείες μεταβολές του ανέμου θα υπάρχουν σημαντικές μεταβολές στην έξοδο της A/Γ. Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος, όπως φαίνεται, εξαρτάται από τα λ και β , όπου β είναι η γωνία pitch και λ ο λόγος της ταχύτητας του ακροπτερυγίου ως προς την ταχύτητα του ανέμου. Για την ταχύτητα του ακροπτερυγίου ισχύει η παρακάτω σχέση [32], [16], [19]:

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega_r}{V_w} \quad (4.67)$$

όπου: R: η ακτίνα της έλικας (m)
 ω_r : η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα (rad/s)

Σύμφωνα με τον νόμο του A. Betz καμία A/Γ δεν είναι σε θέση να αξιοποιήσει περισσότερο από το 59,3% της κινητικής ενέργειας του ανέμου. Για το λόγο αυτό ο αεροδυναμικός συντελεστής πρέπει να είναι $C_p \leq 0,59$. Οι τιμές του C_p κυμαίνονται από 0,3 έως 0,5.

Η συνάρτηση με την οποία υπολογίζεται ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p δίνεται από τον παρακάτω προσεγγιστικό τύπο:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} 0.4\beta - 5 \right) \cdot e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (4.68)$$

όπου το λ_i υπολογίζεται από τη σχέση:

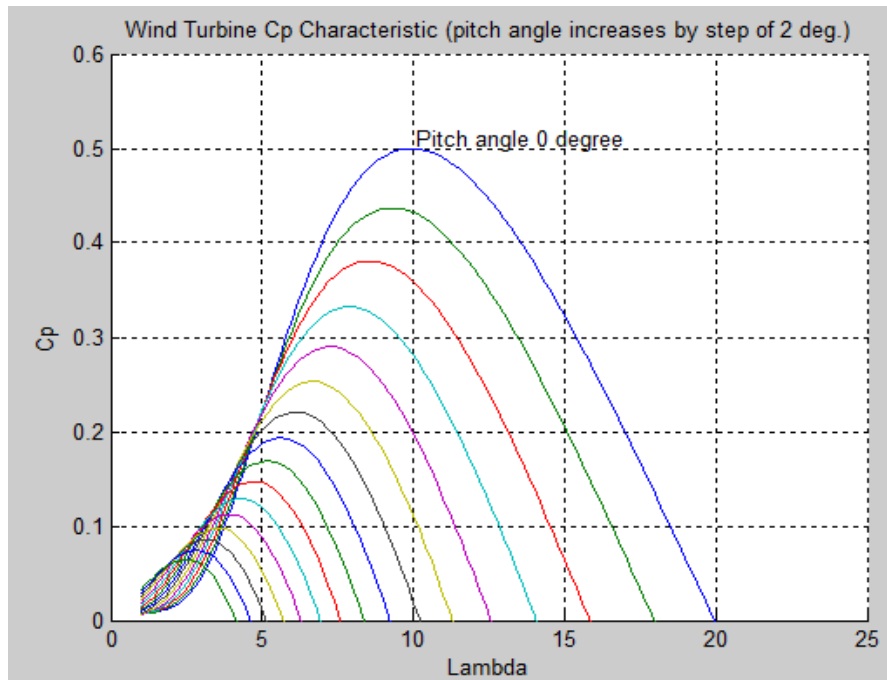
$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (4.69)$$

Ο αεροδυναμικός συντελεστής υπολογίζεται από τις σταθερές c_1 έως c_6 για τις οποίες ισχύουν τα εξής:

c_1	0.22	c_4	5
c_2	116	c_5	12.5
c_3	0.4	c_6	0.008

Πίνακας 4.1. Οι σταθερές μεταβλητές c_1 έως c_6

Σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις κατασκευάζεται το διάγραμμα του σχήματος 4.10 το οποίο περιέχει τις καμπύλες του λόγου της ταχύτητας ακροπτερυγίου ως προς τον αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος C_p για διάφορες τιμές του β .



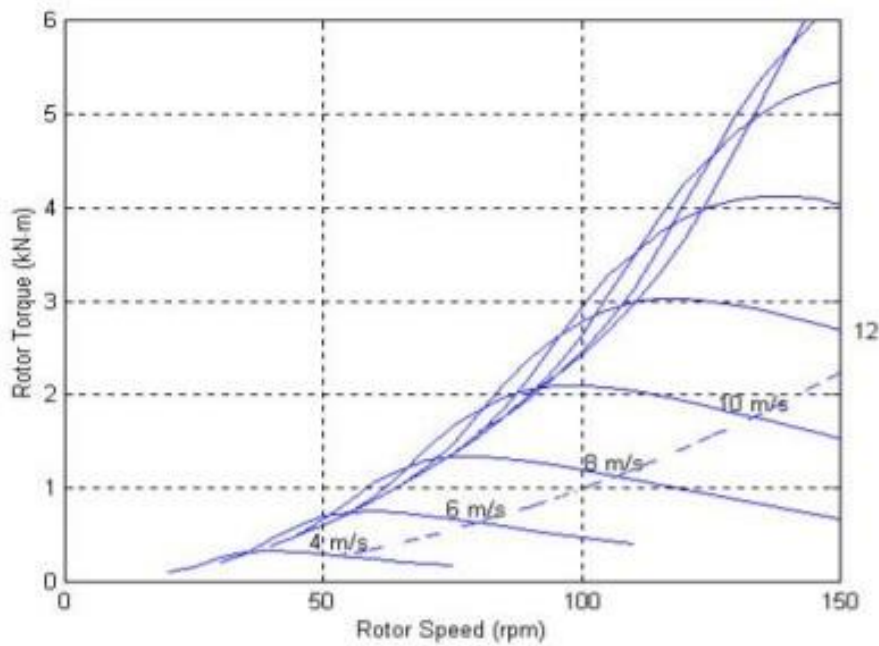
Σχήμα 4.10. Καμπύλες αεροδυναμικού συντελεστή C_p συναρτήσει του λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου λ και της γωνίας pitch β [36].

Από το σχήμα 4.10 παρατηρείται ότι για γωνία βήματος της έλικας ίση με 0° στο σημείο (0.5, 9.95) αντιστοιχεί η μέγιστη τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή. Η τιμή του σημείου αυτού είναι σχετικά κοντά στη τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή του Betz. Επομένως για $C_p = 0.5$ έχουμε το C_{max} και λ_{opt} . Ένας δεύτερος τρόπος εύρεσης του σημείου αυτού υπολογίζεται αν θέσουμε την παράγωγο της σχέσης $C_p(\lambda, 0)$ ίση με το μηδέν. Για κάθε ταχύτητα ανέμου υπάρχει μία τιμή του λ για την οποία ο αντίστοιχος αεροδυναμικός συντελεστής λαμβάνει την μέγιστη τιμή του, μεγιστοποιώντας ταυτόχρονα και την ηλεκτρική ισχύ που παράγεται. Για το λόγο αυτό, για βέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή και διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής προκύπτουν οι χαρακτηριστικές ροπής-στροφών (ισχύος-στροφών αντίστοιχα) οι οποίες υπολογίζονται από τη σχέση:

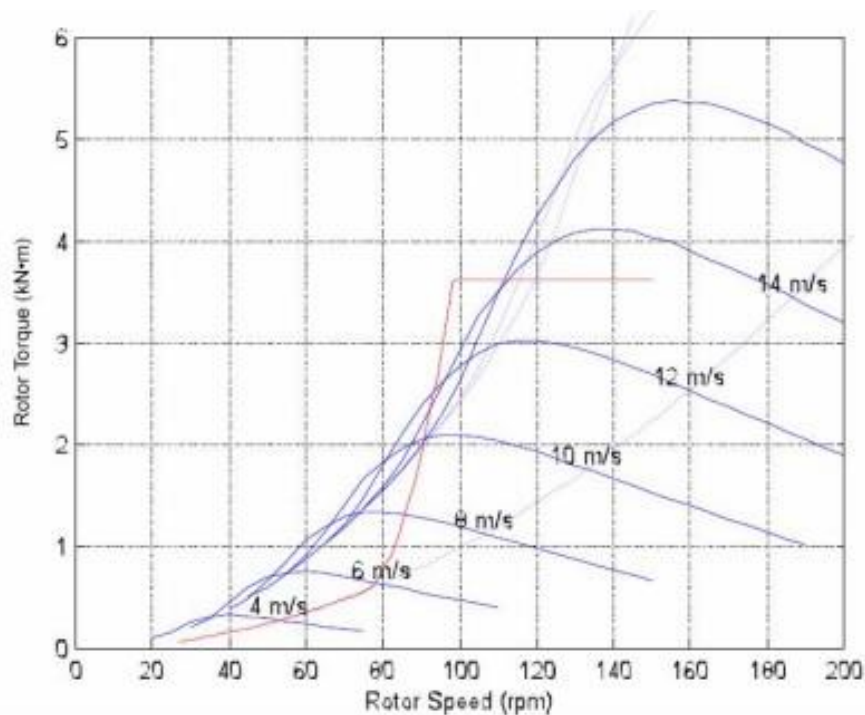
$$T_m = \frac{P_m}{\omega_R} \quad (4.70)$$

Οι χαρακτηριστικές ροπής-στροφών για διάφορες ταχύτητες ανέμου φαίνονται στο σχήμα 4.11. Στις καμπύλες αυτές η μέγιστη ισχύς βρίσκεται σε σημεία όπου το γινόμενο της ροπής επί των στροφών μεγιστοποιείται. Με συνδυασμό των σημείων αυτών εξάγεται η χαρακτηριστική ροπή στροφών η οποία αντιστοιχεί στη βέλτιστη δυνατή. Η καμπύλη αυτή υποδηλώνει τα όρια στα οποία μπορεί το σύστημα της Α/Γ να λειτουργήσει ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή ισχύς στην έξοδο. Ισχύει κυρίως για περιπτώσεις χαμηλής ισχύος. Σε περιπτώσεις υψηλής ισχύος το σύστημα περιορίζει τις στροφές της Α/Γ κάτω από

τις ονομαστικές για προστασία. Αυτό αποσκοπεί στην μη υπερτάχυνση της ανεμογεννήτριας. Η χαρακτηριστική καμπύλη που χρησιμοποιείται στη περίπτωση αυτή φαίνεται στο σχήμα 4.12. Η κόκκινη καμπύλη αντιστοιχεί στο περιορισμό της ταχύτητας κάτω των ονομαστικών στροφών και αποτελείται από 2 τμήματα με διαφορετική κλίση. Το 1^ο τμήμα αντιπροσωπεύει τη λειτουργία βέλτιστης παραγωγής ισχύος, ενώ το 2^ο τη λειτουργία σε στροφές μικρότερες των ονομαστικών.



Σχήμα 4.11. Καμπύλες ροπής συναρτήσεϊ των στροφών της Α/Γ (χαμηλή ισχύς) [36]



Σχήμα 4.12. Καμπύλες ροπής συναρτήσεϊ των στροφών της Α/Γ (υψηλή ισχύς) [36]

4.7. Διανυσματικός έλεγχος DFIG

Με την τεχνική του διανυσματικού ελέγχου οι μηχανές ρεύματος ελέγχονται ως μηχανές συνεχούς ρεύματος και έτσι επιτυγχάνονται ταχείες και ελεγχόμενες επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις της Α/Γ και ακριβής έλεγχος ταχύτητας και θέσης σε όλο το εύρος των ταχυτήτων. Δίνει στο σύστημα καλή δυναμική συμπεριφορά αν και είναι πολύπλοκος και ακριβός στην υλοποίηση.

4.7.1. Μετασχηματισμός Park

Στις εναλλασσόμενου ρεύματος μηχανές τα μεγέθη όλα είναι χρονικά μεταβαλλόμενα και παρίστανται ως διανύσματα χώρου και χρόνου στο μιγαδικό επίπεδο. Έχουμε δύο ειδών διανύσματα, στρεφόμενα ή στατικά, το είδος του κάθε διανύσματος προσδιορίζεται από το σύστημα αναφοράς αξόνων που χρησιμοποιείται κάθε φορά. Συνεπώς για να αναφερθούμε στο διανυσματικό μοντέλο d-q της DFIG, θα πρέπει να αναφερθούμε και στον μετασχηματισμό Park. Το πλεονέκτημα που προκύπτει από την επιλογή αυτή είναι ότι οι εξισώσεις του μοντέλου απλοποιούνται και τα εναλλασσόμενα μεγέθη του πραγματικού συστήματος μετασχηματίζονται σε συνεχείς ποσότητες στο προκύπτον σύστημα d-q, κι έτσι είναι εύκολο πλέον να εφαρμοστούν για αυτά οι γνωστές τεχνικές του αυτόματου ελέγχου. Η μήτρα μετασχηματισμού Park [32] είναι η εξής:

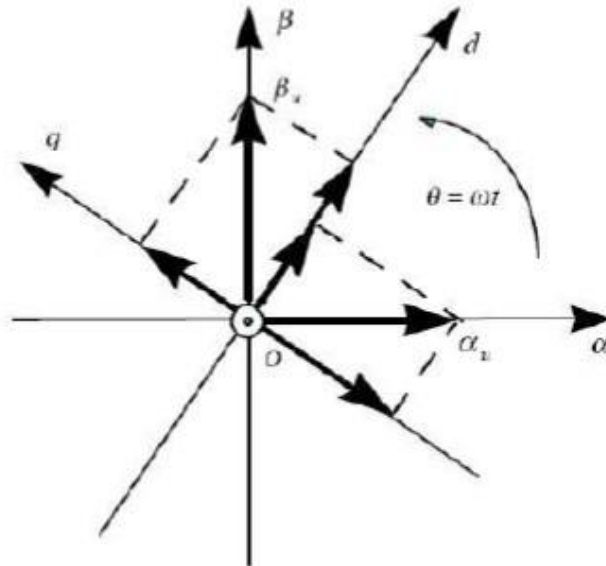
$$\Pi = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 120) & \cos(\theta + 120) \\ \sin\theta & \sin(\theta - 120) & \sin(\theta + 120) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (4.71)$$

Σύμφωνα με το παραπάνω μετασχηματισμό η ανάλυση του τριφασικού συστήματος στους άξονες d και q, πραγματοποιείται με τον εξής πολλαπλασιασμό:

$$\begin{bmatrix} V_q \\ V_d \\ V_0 \end{bmatrix} = \Pi \cdot \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \quad (4.72)$$

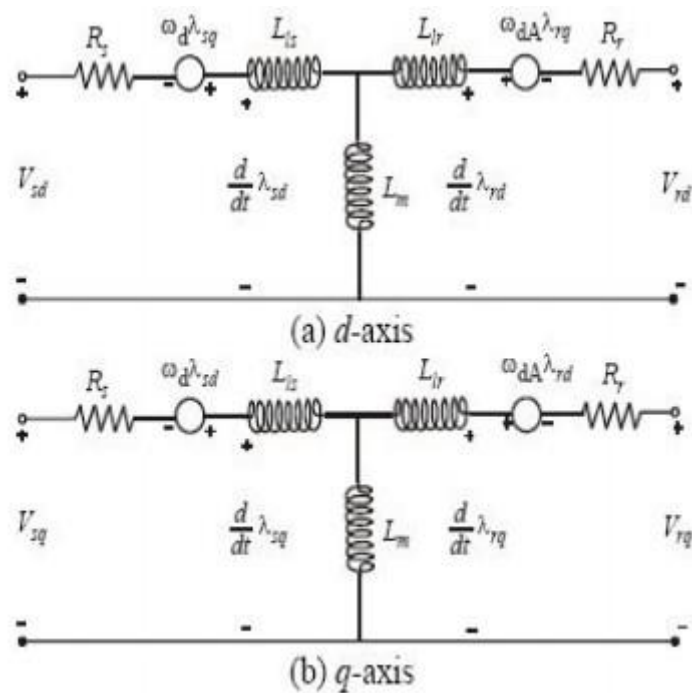
Από την σχέση 4.72 παρατηρούμε ότι έχουμε και έναν τρίτο άξονα, τον άξονα 0, γνωστό και ως άξονα μηδενικής ακολουθίας, ο οποίος παίρνει μηδενική τιμή για συμμετρική λειτουργία. Για το λόγο αυτό συνήθως παραλείπεται στο διανυσματικό έλεγχο. Η γωνία θ που φαίνεται στην εξίσωση (4.71) είναι η γωνία που σχηματίζει ο άξονας d, του νέου συστήματος αναφοράς, με τον άξονα a του τριφασικού συστήματος. Για το διανυσματικό έλεγχο η γωνία θ επιλέγεται πάντα έτσι ώστε το νέο σύστημα αναφοράς να περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα. Ο άξονας d ονομάζεται ευθύς άξονας από το (direct-axis), ενώ ο άξονας q

ονομάζεται εγκάρσιος άξονας από το (quadrature-axis). Οι άξονες d και q είναι κάθετοι μεταξύ τους, με τον άξονα q να προηγείται του άξονα d, ενώ ο άξονας 0 είναι κάθετος στο επίπεδο των άλλων δύο. Η σχηματική αναπαράσταση των αξόνων d-q φαίνεται στο σχήμα 4.13.



Σχήμα 4.13. Σχηματική αναπαράσταση των αξόνων d-q. [37]

Τα ισοδύναμα κυκλώματα των αξόνων d και q είναι αυτά που φαίνονται στο σχήμα 4.14, όπου (α) είναι ο άξονας d και (β) ο άξονας q.



Σχήμα 4.14. Ισοδύναμο κύκλωμα των αξόνων d-q. [37]

4.7.2. Μοντέλο d-q στο χώρο κατάστασης

Το μοντέλο d-q της DFIG στο χώρο κατάστασης περιγράφεται ως εξής:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_s \\ \lambda_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{\sigma \cdot L_s} - j \cdot \omega_s & \frac{R_s \cdot L_m}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \\ \frac{R_r \cdot L_m}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} & -\frac{R_r}{\sigma \cdot L_r} - j \cdot \omega_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_s \\ \lambda_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_s \\ V_r \end{bmatrix} \quad (4.73)$$

Η επέκταση της παραπάνω σχέσης στις συνιστώσες d-q δίνεται από την σχέση 4.74.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{qs} \\ \lambda_{dr} \\ \lambda_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{\sigma \cdot L_s} & \omega_s & \frac{R_s \cdot L_m}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} & 0 \\ -\omega_s & -\frac{R_s}{\sigma \cdot L_s} & 0 & \frac{R_s \cdot L_m}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \\ \frac{R_r \cdot L_m}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} & 0 & -\frac{R_r}{\sigma \cdot L_r} & \omega_r \\ 0 & \frac{R_r \cdot L_m}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} & -\omega_r & -\frac{R_r}{\sigma \cdot L_r} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{qs} \\ \lambda_{dr} \\ \lambda_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} \quad (4.74)$$

Αν επιλεγούν τα ρεύματα στο χώρο κατάστασης, αντί των ροών, τότε το ισοδύναμο μοντέλο της DFIG δίνεται από την παρακάτω σχέση (4.75):

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \vec{I}_s \\ \vec{I}_r \end{bmatrix} = \frac{1}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \begin{bmatrix} -R_s L_r - j\omega_m L_m^2 - j\omega_s \sigma L_s L_r & R_r L_m - j\omega_m L_m L_r \\ R_s L_m + j\omega_m L_m L_s & -R_r L_s + j\omega_m L_r L_s - j\omega_s \sigma L_s L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{I}_s \\ \vec{I}_r \end{bmatrix} + \frac{1}{\sigma L_s L_r} \begin{bmatrix} L_r & -L_m \\ -L_m & L_s \end{bmatrix} \quad (4.75)$$

Η μετάβαση της 4.75 στις συνιστώσες d-q δίνει την σχέση 4.76:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \vec{I}_{ds} \\ \vec{I}_{qs} \\ \vec{I}_{dr} \\ \vec{I}_{qr} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sigma L_s L_r} \begin{bmatrix} -R_s L_r & \omega_m L_m^2 + \omega_s \sigma L_s L_r & R_r L_m & \omega_m L_m L_r \\ \omega_m L_m^2 + j\omega_s \sigma L_s L_r & -R_s L_r & \omega_m L_m L_s & R_r L_m \\ R_s L_m & -\omega_m L_m L_s & -R_r L_s & -\omega_m L_r L_s + \omega_s \sigma L_s L_r \\ -\omega_m L_m L_s & R_s L_m & -\omega_m L_r L_s + \omega_s \sigma L_s L_r & -R_r L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{I}_{ds} \\ \vec{I}_{qs} \\ \vec{I}_{dr} \\ \vec{I}_{qr} \end{bmatrix} + \frac{1}{\sigma L_s L_r} \begin{bmatrix} L_r & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & L_r & 0 & -L_m \\ -L_m & 0 & L_s & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_s \end{bmatrix} \quad (4.76)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις που αναπαριστούν την DFIG στο χώρο κατάστασης και στο πλαίσιο αναφοράς d-q είναι χρήσιμες στην επίτευξη σταθερής κατάστασης, για δοσμένες τάσεις εισόδου στάτη και ρότορα. Η ηλεκτρομαγνητική ροπή προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$T_e = \frac{3P}{4} (\lambda_{dr} I_{qr} - \lambda_{qr} I_{dr}) \quad (4.77)$$

4.7.3. Μοντέλο d-q σε στατό πλαίσιο αναφοράς

Από το μοντέλο d-q της DFIG στο χώρο κατάστασης, μπορεί να υπολογιστούν τα μεγέθη σταθερής κατάστασης της μηχανής. Γνωρίζοντας ότι στη σταθερή κατάσταση τα παράγωγα των ροών ισούνται με μηδέν:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{qs} \\ \lambda_{dr} \\ \lambda_{qr} \end{bmatrix} = 0 \quad (4.78)$$

Αντικαθιστώντας στη σχέση 4.72, λαμβάνουμε τις ροές του στάτη και του ρότορα του μοντέλου d-q, όπως φαίνονται στην 4.79:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{qs} \\ \lambda_{dr} \\ \lambda_{qr} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{\sigma \cdot L_s} & \omega_s & \frac{R_s \cdot L_m}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} & 0 \\ -\omega_s & -\frac{R_s}{\sigma \cdot L_s} & 0 & \frac{R_s \cdot L_m}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \\ \frac{R_r \cdot L_m}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} & 0 & -\frac{R_r}{\sigma \cdot L_r} & \omega_r \\ 0 & \frac{R_r \cdot L_m}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} & -\omega_r & -\frac{R_r}{\sigma \cdot L_r} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} \quad (4.79)$$

Συνεπώς, γνωρίζοντας τις επιβαλλόμενες τάσεις εισόδου του στάτη και του ρότορα, και την ταχύτητα της μηχανής, εξάγονται οι τιμές των ροών του στάτη και του ρότορα και με βάση αυτό υπολογίζονται τα ρεύματα που ρέουν σε αυτούς (4.80):

$$\begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \\ -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} & 0 \\ 0 & -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{qs} \\ \lambda_{dr} \\ \lambda_{qr} \end{bmatrix} \quad (4.80)$$

Τέλος, υπολογίζεται η ροπή με τη βοήθεια της εξίσωσης 4.81:

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot (\lambda_{qs} I_{qs} - \lambda_{ds} I_{ds}) \quad (4.81)$$

όπου: P ο αριθμός των πόλων της μηχανής.

4.7.4. Η ισχύς στο d-q μοντέλο

Με τη χρήση των μετασχηματισμών μπορεί να υπολογιστεί η ενεργός και άεργος ισχύς στο μοντέλο διανυσματικού ελέγχου d-q με τις εξισώσεις 4.82 και 4.83:

$$P_{dq} = \frac{3}{2} \cdot (V_d I_d + V_q I_q) \quad (4.82)$$

$$Q_{dq} = \frac{3}{2} \cdot (V_q I_d - V_d I_q) \quad (4.83)$$

Σύμφωνα με τις ανωτέρω εξισώσεις παρατηρείται ότι η ισχύς είναι ανεξάρτητη από την κατάσταση του πλαισίου αναφοράς της μηχανής. Από τις εξισώσεις αυτές εξάγονται οι εξισώσεις υπολογισμού της ισχύος για το στάτη και το δρομέα, οι οποίες είναι οι εξής:

$$P_s = \frac{3}{2} \cdot (V_{ds}I_{ds} + V_{qs}I_{qs}) \quad (4.84)$$

$$P_r = \frac{3}{2} \cdot (V_{dr}I_{dr} + V_{qr}I_{qr}) \quad (4.85)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} \cdot (V_{qs}I_{ds} + V_{ds}I_{qs}) \quad (4.86)$$

$$Q_r = \frac{3}{2} \cdot (V_{qr}I_{dr} + V_{dr}I_{qr}) \quad (4.87)$$

Συνεπώς η ολική ισχύς της μηχανής δίνεται από τους τύπους:

$$P_{total} = P_s + P_r \quad (4.88)$$

$$Q_{total} = Q_s + Q_r \quad (4.89)$$

4.8. Σύστημα ελέγχου της DFIG

Ο έλεγχος της DFIG γίνεται για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς της A/Γ τόσο κατά την κανονική λειτουργία όσο και κατά τη διάρκεια της βύθισης τάσης. Βάσει των αποτελεσμάτων του ελέγχου αντιμετωπίζονται οι διαταραχές της A/Γ που προήλθαν είτε από τις διαταραχές της τάσης είτε λόγω της απότομης μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου. Στο σύνολό τους οι διαταραχές που υφίστανται σε μία ανεμογεννήτρια είναι διαφορετικές, μπορεί να είναι βυθίσεις τάσεως, ανισοροπίες, αρμονικές, κλπ. Ωστόσο, είναι απόλυτα εξαρτημένες από τα χαρακτηριστικά του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συνηθέστερη διαταραχή είναι αυτή της βύθισης τάσης. Κατά τη διάρκεια αυτού του είδους της διαταραχής, παρατηρούνται συχνές αποσυνδέσεις των ανεμογεννητριών, αν δεν λάβουμε. Για την αντιμετώπιση σοβαρών βυθίσεων τάσεων, χρησιμοποιούνται επιπρόσθετα στοιχεία, όπως μοχλοί ή σύστημα πέδησης των περωτών.

4.8.1. Σύστημα ελέγχου από την πλευρά του δρομέα (RSC)

Το σύστημα ελέγχου του μετατροπέα από την πλευρά του δρομέα είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο της συμπεριφοράς της ανεμογεννήτριας τόσο όταν αυτή λειτουργεί σε υπερσύγχρονες ταχύτητες όσο και κατά τη διαδικασία ανεύρεσης του μέγιστου σημείου απολαβής ισχύος (**Maximum Power Point Tracking, MPPT**). Το εν λόγω σύστημα ελέγχου είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο και την παρακολούθηση της χαρακτηριστικής ισχύος-ταχύτητας της τουρμπίνας κάθε ανεμογεννήτριας. Ιδιαίτερα σημαντικός είναι ο έλεγχος της ενεργού και άεργου ισχύος που πραγματοποιείται μέσω του ελέγχου των ρευμάτων του δρομέα. Ο μετατροπέας στη πλευρά του δρομέα λειτουργεί στο πλαίσιο d-q

προσανατολισμένο ως προς τη ροή του στάτη, λαμβάνοντας μία κάθετη και μία παράλληλη συνιστώσα στη ροή του στάτη.

Έλεγχος της ενεργού και της άεργου ισχύος

Σύμφωνα με την ανάλυση που έγινε νωρίτερα, η τάση του ευθέως άξονα είναι:

$$V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_e \psi_{qs} \quad (4.90)$$

η οποία γράφεται και ως:

$$V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} \quad (4.91)$$

Δεδομένου ότι η R_s είναι αμελητέα ισχύει: $V_{ds} = 0$. Επίσης ισχύουν:

$$I_{qs} = -\frac{L_m}{L_s} \cdot I_{qr} \quad (4.92)$$

$$I_{ds} = \frac{\psi_{ds} - L_m \cdot I_{dr}}{L_s} \quad (4.93)$$

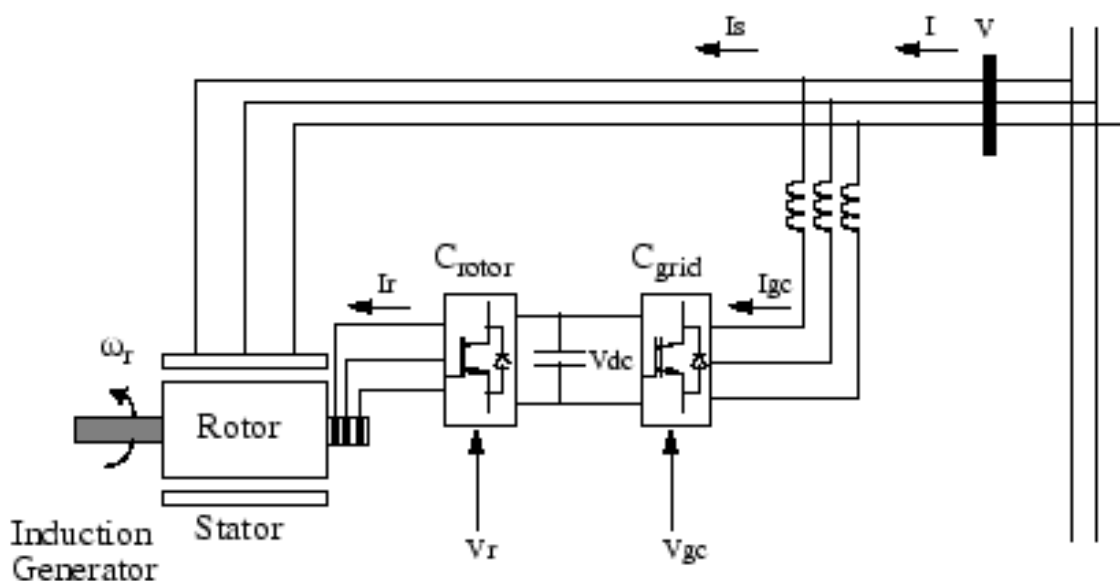
Οπότε η ενεργός ισχύς μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση:

$$P_s = \frac{3}{2} (V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs}) \xrightarrow{R_s \approx 0, (4.3)} P_s = -\frac{3}{2} V_{qs} \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot I_{qr} \quad (4.94)$$

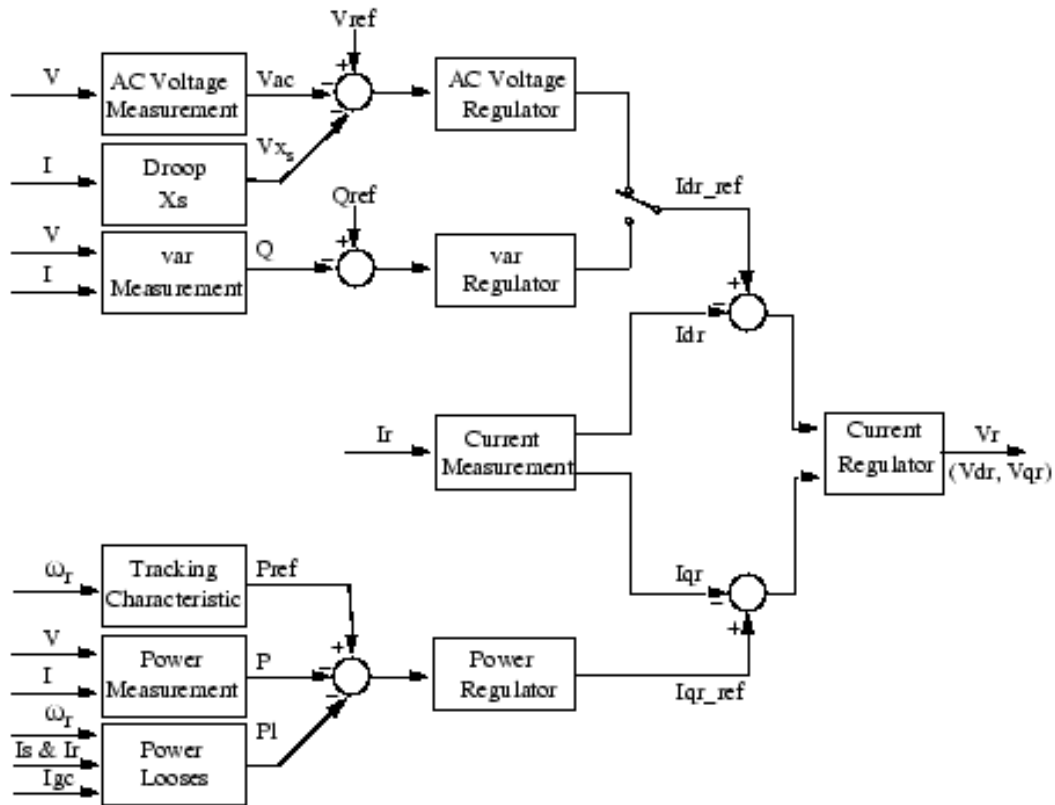
Η ενεργός ισχύς προκύπτει μόνο από την q συνιστώσα και είναι ανάλογη με τη συνιστώσα q του ρεύματος του δρομέα. Αντίστοιχα, ο υπολογισμός της άεργου ισχύος γίνεται μέσω της σχέσης:

$$Q_s = \frac{3}{2} (V_{qs} I_{ds} + V_{ds} I_{qs}) \xrightarrow{R_s \approx 0, (4.4)} Q_s = \frac{3}{2} V_{qs} \cdot \frac{\psi_{ds} - L_m \cdot I_{dr}}{L_s} \quad (4.95)$$

Στο σχήμα 4.15 φαίνεται η ροή των ρευμάτων από το δίκτυο προς την ανεμογεννήτρια ενώ στο σχήμα 4.16 παρουσιάζεται το σύστημα ελέγχου που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις που διενεργήθηκαν στην παρούσα εργασία.



Σχήμα 4.15. Ροή ρευμάτων από το δίκτυο στην ανεμογεννήτρια. [38]

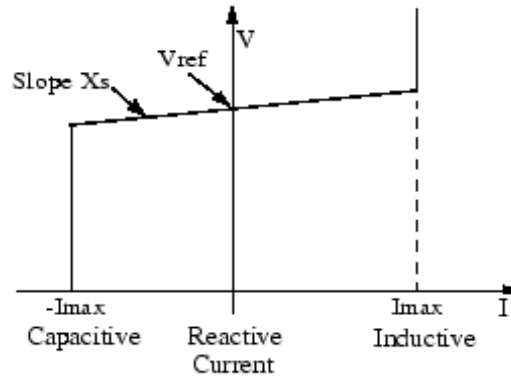


Σχήμα 4.16. Σύστημα ελέγχου του μετατροπέα από τη πλευρά του δρομέα. [38]

Συγκεκριμένα, η ενεργός ισχύς εξόδου που λαμβάνεται από τα τερματικά του δικτύου στην Α/Γ προστίθεται στις συνολικές απώλειες και στην συνέχεια συγκρίνεται με την χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος ταχύτητας. Ο έλεγχος αυτός γίνεται μέσω της χρήσης ενός PI controller, από την έξοδο του οποίου λαμβάνεται το ρεύμα αναφοράς του ρότορα I_{qr_ref} , που εγχέεται στο δρομέα από τον μετατροπέα. Με τη χρήση ενός δεύτερου PI ελεγκτή συγκρίνεται το θετικής ακολουθίας ρεύμα I_q με το I_{qr_ref} για τη μείωση του σφάλματος. Από την έξοδο αυτού του PI ελεγκτή λαμβάνουμε την τάση V_{qr} που παράγεται από τον μετατροπέα. Τέλος, αυτός ο PI ελεγκτής ρεύματος υποβοηθείται από feed forward terms για τη πρόβλεψη της τάσης V_{qr} .

Έλεγχος της τάσης της Α/Γ που χρησιμοποιείται

Η ανεμογεννήτρια που χρησιμοποιείται έχει τη δυνατότητα για δύο είδη ρυθμίσεων. Τα είδη αυτά είναι: α) ρύθμιση της τάσης και β) ρύθμιση της άεργου ισχύος. Όταν η ανεμογεννήτρια ελέγχεται από τη ρύθμιση τάσεως (voltage regulation mode) για τον έλεγχο της τάσης της, χρησιμοποιείται η χαρακτηριστική τάση ρεύματος (V-I) (σχήμα 4.17).



Σχήμα 4.17. Χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος V-I της ανεμογεννήτριας [38]

Από το σχήμα 4.17 φαίνεται ότι όσο το άεργο ρεύμα παραμένει εντός ορίων, δηλαδή μεταξύ των $(-I_{max}, I_{max})$, η τάση ρυθμίζεται έτσι ώστε να αντιστοιχεί στην τάση αναφοράς V_{ref} . Ωστόσο, συχνά χρησιμοποιείται πτώση τάσης (περίπου ίση μεταξύ του 1% και 4% της μέγιστης παραγόμενης άεργου ισχύος), με αποτέλεσμα η χαρακτηριστική V-I να έχει την κλίση που φαίνεται στο σχήμα 4.17. Η χαρακτηριστική αυτή στην περίπτωσή μας υπολογίζεται από την εξίσωση [9]:

$$V = V_{ref} + X_s I \quad (4.96)$$

Όταν η ανεμογεννήτρια ελέγχεται από τη ρύθμιση άεργου ισχύος (var regulation mode), η άεργος ισχύς διατηρείται σταθερή μέσω της χρήσης ενός ρυθμιστή άεργου ισχύος (var regulator). Η έξοδος του οποίου ισούται με το ρεύμα αναφορά του άξονα d, δηλαδή έχουμε το I_{dr_ref} , το οποίο εγχέεται στο δρομέα από τον μετατροπέα. Εκτός αυτού, ο ελεγκτής αυτός χρησιμοποιείται και για να ρυθμίσει την συνιστώσα του ρεύματος θετικής ακολουθίας (I_{dr}) βάση της ονομαστικής του τιμής. Η έξοδος του ελεγκτή ρεύματος είναι η τάση του άξονα d (V_{dr}). Τέλος, ο PI ελεγκτής ρεύματος υποβοηθείται από feed forward terms για τη πρόβλεψη της τάσης V_{dr} .

Ως προς τις προσομοιώσεις έχουμε:

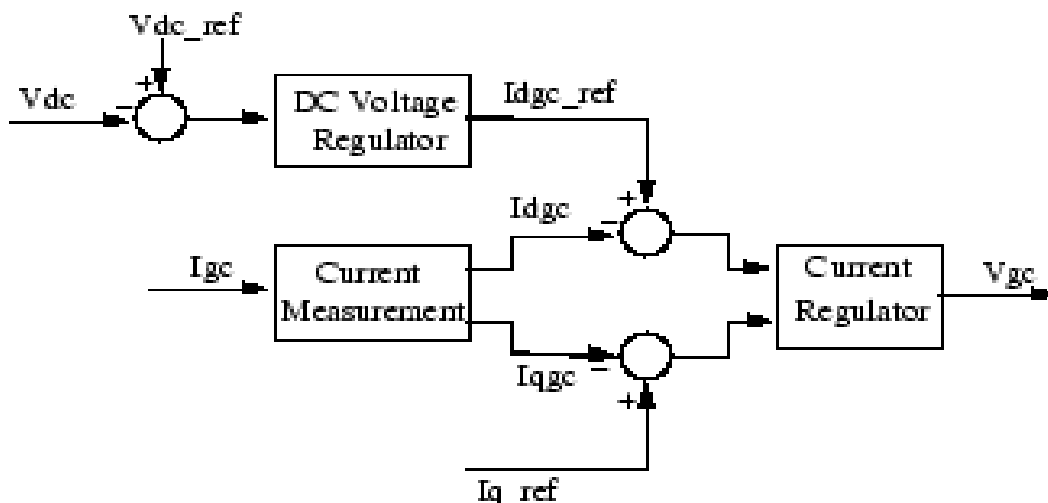
- Στο σύστημα ελέγχου και λήψεων μετρήσεων του μετατροπέα του δρομέα, ο άξονας d από το d-q περιστρεφόμενου πλαισίου είναι «κλειδωμένος» στη αμοιβαία ροή της γεννήτριας από έναν PLL (Phase-Locked-Loop). Αυτός θεωρείται ιδανικός για το φασικό μοντέλο που χρησιμοποιούμε.
- Το ρεύμα αναφορά του δρομέα (I_{r_ref}) είναι ίσο με $\sqrt{I_{dr_ref}^2 + I_{qr_ref}^2}$. Έχοντας σαν μέγιστο όριο το 1 p.u.. Στη περίπτωση που τα ρεύματα I_{dr_ref} και I_{qr_ref} είναι τέτοια ώστε

να υπερβαίνει το ρεύμα αναφοράς του δρομέα τον περιορισμό του 1 p.u., η συνιστώσα του ρεύματος I_{qr_ref} περιορίζεται προκειμένου να επανέλθει το I_{r_ref} εντός ορίων.

4.8.2. Σύστημα ελέγχου από τη πλευρά του δικτύου (GSC)

Το σύστημα ελέγχου του μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου συνδράμει στη ρύθμιση της τάσης στον πυκνωτή της DC σύνδεσης του μετατροπέα. Βοηθάει δηλαδή στην σταθερή διατήρηση της τιμής ανεξάρτητα από τη ροή ισχύος. Γενικότερα, υποβοηθάει στη διατήρηση της ευστάθειας του συνολικού δικτύου. Αποτελείται από (σχήμα 4.18):

- Ένα σύστημα μετρήσεων, για τη μέτρηση της d και q συνιστώσας των ρευμάτων AC θετικής ακολουθίας, καθώς και τον έλεγχο της τάσης της V_{DC} .
- Έναν εξωτερικό βρόγχο ελέγχου αποτελούμενο από έναν ελεγκτή τάσης DC. Η έξοδος του οποίου αποτελεί το ρεύμα αναφοράς I_{dgc_ref} για τον ελεγκτή ρεύματος (I_{dgc} είναι το συμφασικό ρεύμα με το δίκτυο για τον έλεγχο της ροής ενεργού ισχύος).
- Έναν εσωτερικό βρόγχο ελέγχου αποτελούμενο από ένα ελεγκτή ρεύματος. Ο ελεγκτής αυτός ελέγχει το μέγεθος και τη φάση της παραγόμενης τάσης (V_{gc}) από το μετατροπέα, χρησιμοποιώντας το I_{dgc} που παράγεται από τον ελεγκτή τάσεως DC και το καθορισμένο ρεύμα αναφοράς της q συνιστώσας (I_{q_ref}).



Σχήμα 4.18. Σύστημα ελέγχου από τη πλευρά του δικτύου. [20]

Κάνοντας χρήση του συστήματος ελέγχου εξασφαλίζεται μοναδιαίος συντελεστή ισχύος λόγω μηδενικής μεταφοράς άεργου ισχύος. Ωστόσο, στην περίπτωση αυτή, ο μετατροπέας για να ελέγξει καλύτερα τόσο την τάση της DC σύνδεσης, όσο και την μεταφορά ή μη της άεργου ισχύος, χρησιμοποιεί αντίστοιχα την q συνιστώσα και την d συνιστώσα του ρεύματος.

Για την ανάλυση του μετατροπέα ως προς τις εξισώσεις των τάσεων και της άεργου ισχύος, θα χρησιμοποιηθεί και πάλι το στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς. Οι εξισώσεις της τάσεως του στάτη, αγνοώντας τα μεταβατικά φαινόμενα, είναι οι εξής:

$$V_{ds} = R_s I_{ds} - \omega_e \psi_{qs} \quad (4.97)$$

$$V_{qs} = R_s I_{qs} + \omega_e \psi_{ds} \quad (4.98)$$

Όταν $\psi_{qs} = 0$ οι ανωτέρω σχέσεις γίνονται:

$$V_{ds} = R_s I_{ds} \quad (4.99)$$

$$V_{qs} = R_s I_{qs} + \omega_e \psi_{ds} \quad (4.100)$$

Αν, τώρα, θεωρηθούν αμελητέες οι πτώσεις τάσεως, θα ισχύει:

$$V_{ds} = 0 \quad (4.101)$$

$$V_{qs} = \omega_e \psi_{ds} \quad (4.102)$$

Όπως αναφέρθηκε ο μετατροπέας από την πλευρά του δικτύου είναι υπεύθυνος μόνο για τον έλεγχο της άεργου ισχύος. Συνεπώς, η συνολική άεργος ισχύς του στάτη υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q_s = \frac{3}{2} (V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs}) \xrightarrow{(4.12),(4.13)} Q_s = \frac{3}{2} \omega_e \psi_{ds} I_{dr} \quad (4.103)$$

Παρατηρείται δηλαδή ότι η άεργος ισχύς εξαρτάται μόνο από την συνιστώσα d του ρεύματος του δρομέα και συνεπώς ελέγχεται από την d συνιστώσα του ρεύματος του δρομέα.

Για να υπολογιστεί το ρεύμα της DC σύνδεσης, θα τεθούν κάποιιοι συμβολισμοί. Έστω λοιπόν ότι I_{os} το ρεύμα που διέρχεται από τον πυκνωτή προς το στάτη και I_{or} το ρεύμα που διέρχεται από τον πυκνωτή προς το δρομέα. Άρα, θα έχουμε τη σχέση:

$$\frac{dV_{DC}}{dt} C = I_{os} - I_{or} \quad (4.104)$$

Επιπλέον έχουμε ότι η ισχύς για συνεχές ρεύμα-τάση στο τριφασικό είναι:

$$V_{DC} I_{os} = \frac{3}{2} \cdot (V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs}) = \frac{3}{2} \cdot V_{qs} I_{qs} \quad (4.105)$$

Όσον αφορά το μετατροπέα από τη πλευρά του δικτύου ισχύει:

$$V_{qs} = \frac{m}{2\sqrt{2}} V_{DC} \quad (4.106)$$

Τελικά για το ρεύμα που διέρχεται από τον πυκνωτή προς το στάτη και για το ρεύμα της DC σύνδεσης το οποίο είναι εξαρτώμενο από την q συνιστώσα του ρεύματος του δρομέα προκύπτουν οι εξισώσεις:

$$I_{os} = \frac{3}{4\sqrt{2}} m I_{qs} \quad (4.107)$$

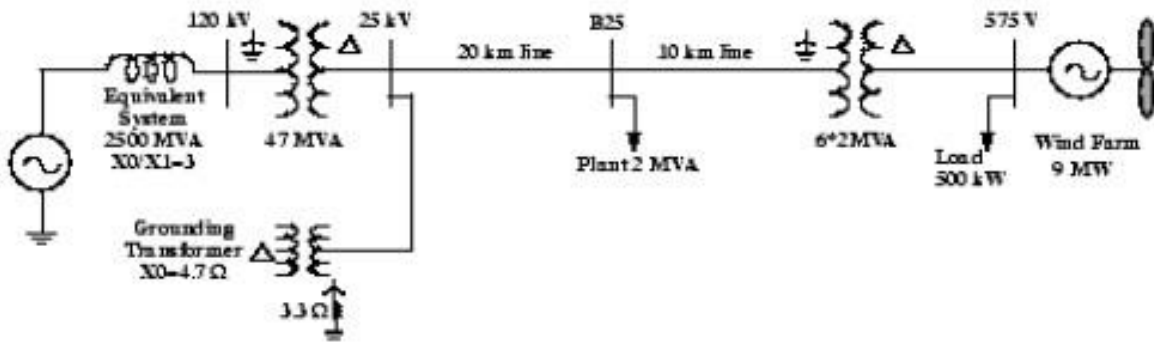
$$\frac{dV_{DC}}{dt} C = \frac{3}{4\sqrt{2}} m I_{qs} - I_{or} \quad (4.108)$$

Το ρεύμα αναφοράς του μετατροπέα από τη πλευρά του δικτύου I_{gc_ref} υπολογίζεται από τη σχέση: $\sqrt{I_{dgc_ref}^2 + I_{q_ref}^2}$. Η μέγιστη τιμή του ρεύματος αυτού καθορίζεται από τη μέγιστη ισχύ του μετατροπέα υπό ονομαστική τάση. Όταν τα ρεύματα I_{dgc_ref} και I_{q_ref} είναι τέτοια ώστε η ένταση του ρεύματος του μετατροπέα από τη πλευρά του δικτύου I_{gc_ref} να υπερβαίνει το μέγιστο επιτρεπτό όριο, τότε η συνιστώσα I_{q_ref} μειώνεται στοχεύοντας στην επαναφορά της έντασης του ρεύματος αυτού στην μέγιστη επιθυμητή τιμή του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ

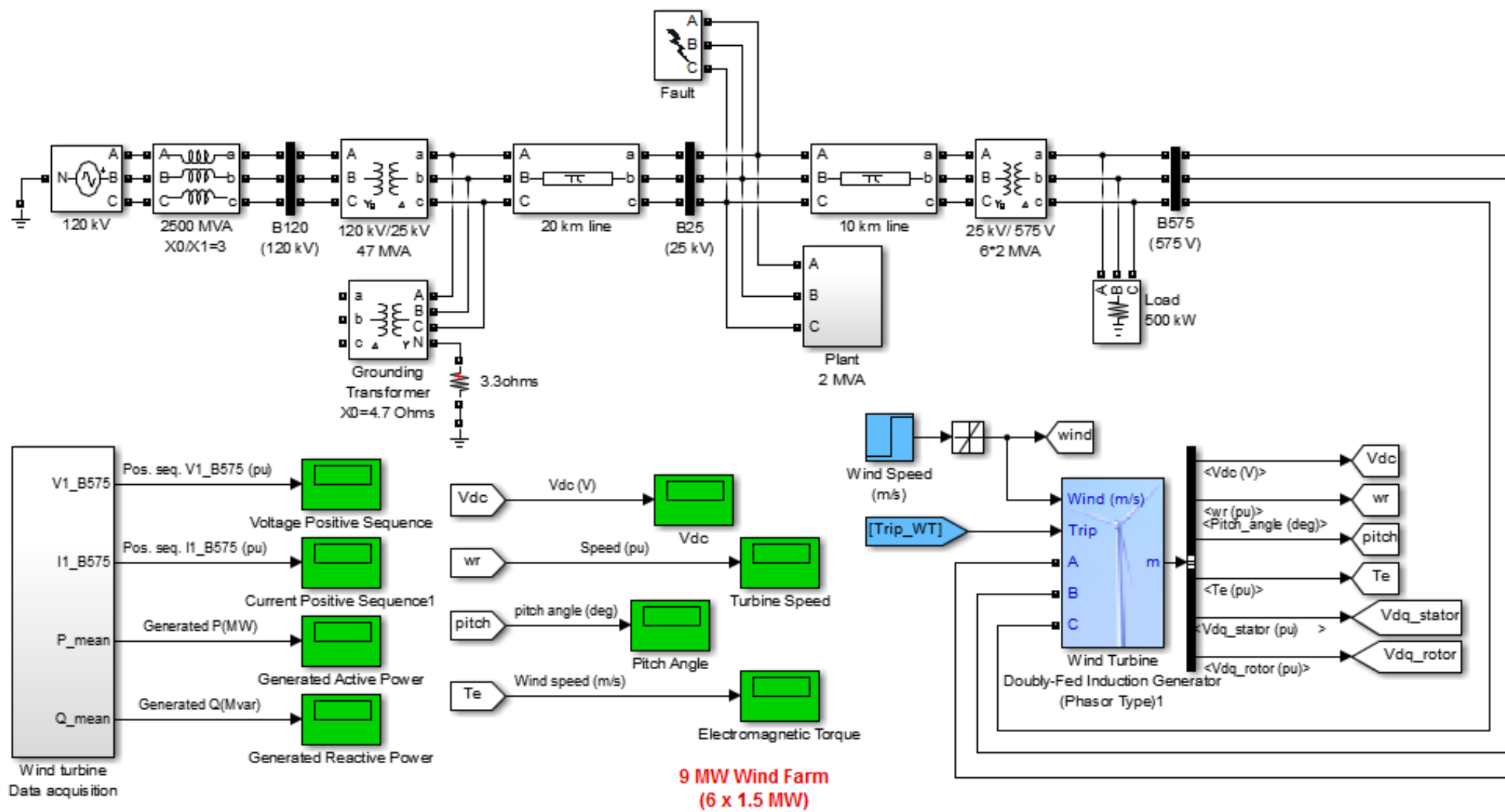
5.1. Περιγραφή του μοντέλου

Το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις είναι αυτό του σχήματος 5.1.

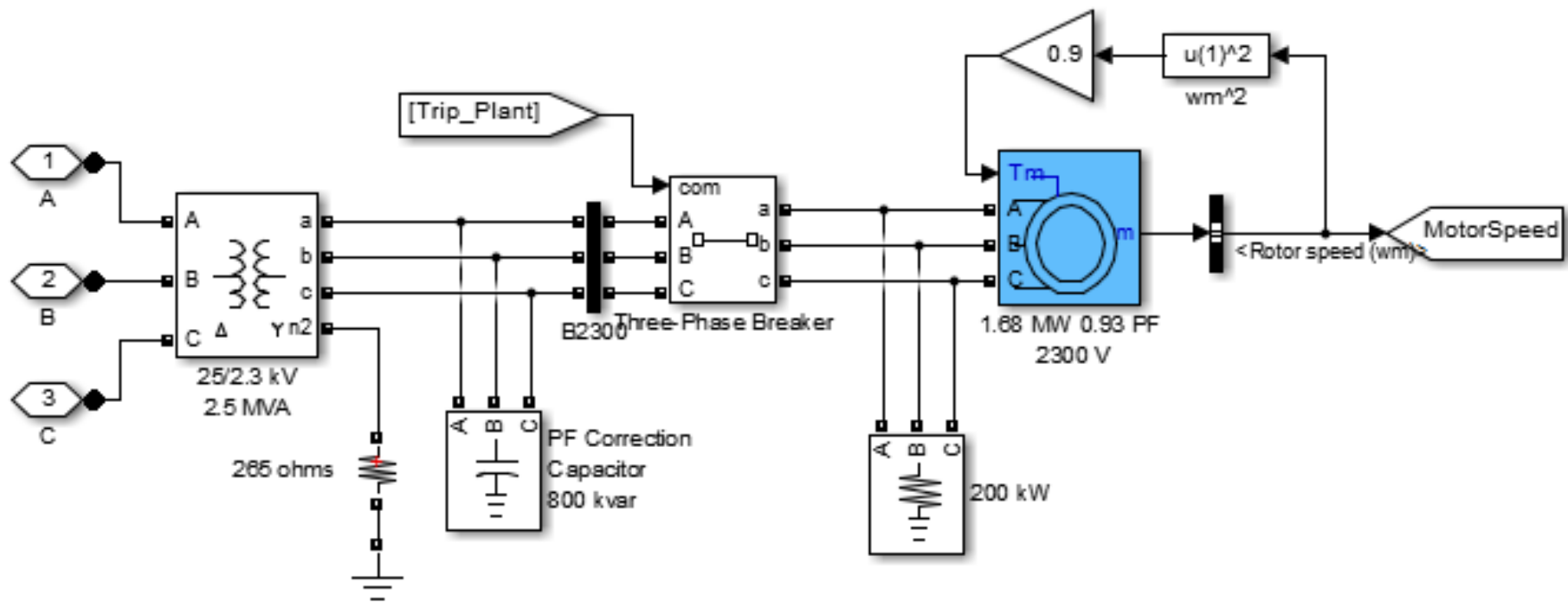


Σχήμα 5.1. Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα του εξεταζόμενου μοντέλου στο Matlab.

Το παραπάνω μοντέλο αποτελεί ένα αιολικό πάρκο 9MW (6 ανεμογεννήτριες των 1.5MW) το οποίο συνδέεται στο δίκτυο διανομής 120kV μέσω μιας γραμμής μεταφοράς μήκους 30km τάσεως 25kV. Στη γραμμή μεταφοράς και σε απόσταση 20km (κόμβος B25) από το δίκτυο συνδέεται ένα υποσύστημα (plant) των 2300V/2MVA στο οποίο είναι συνδεδεμένα ένα φορτίο 200kW και ένας κινητήρας 1.68MW με συντελεστή ισχύος 0.93 (επαγωγικός). Το αιολικό πάρκο συνδέεται με το υπόλοιπο σύστημα στο κόμβο B575 στον οποίο είναι συνδεδεμένο και ένα φορτίο αντιστάσεων των 500kW. Στο σχήμα 5.2. παρουσιάζεται το τριφασικό μοντέλο προσομοίωσης του αιολικού πάρκου και στο σχήμα 5.3. παρουσιάζεται το τριφασικό μοντέλο της εγκατάστασης των 2MVA.

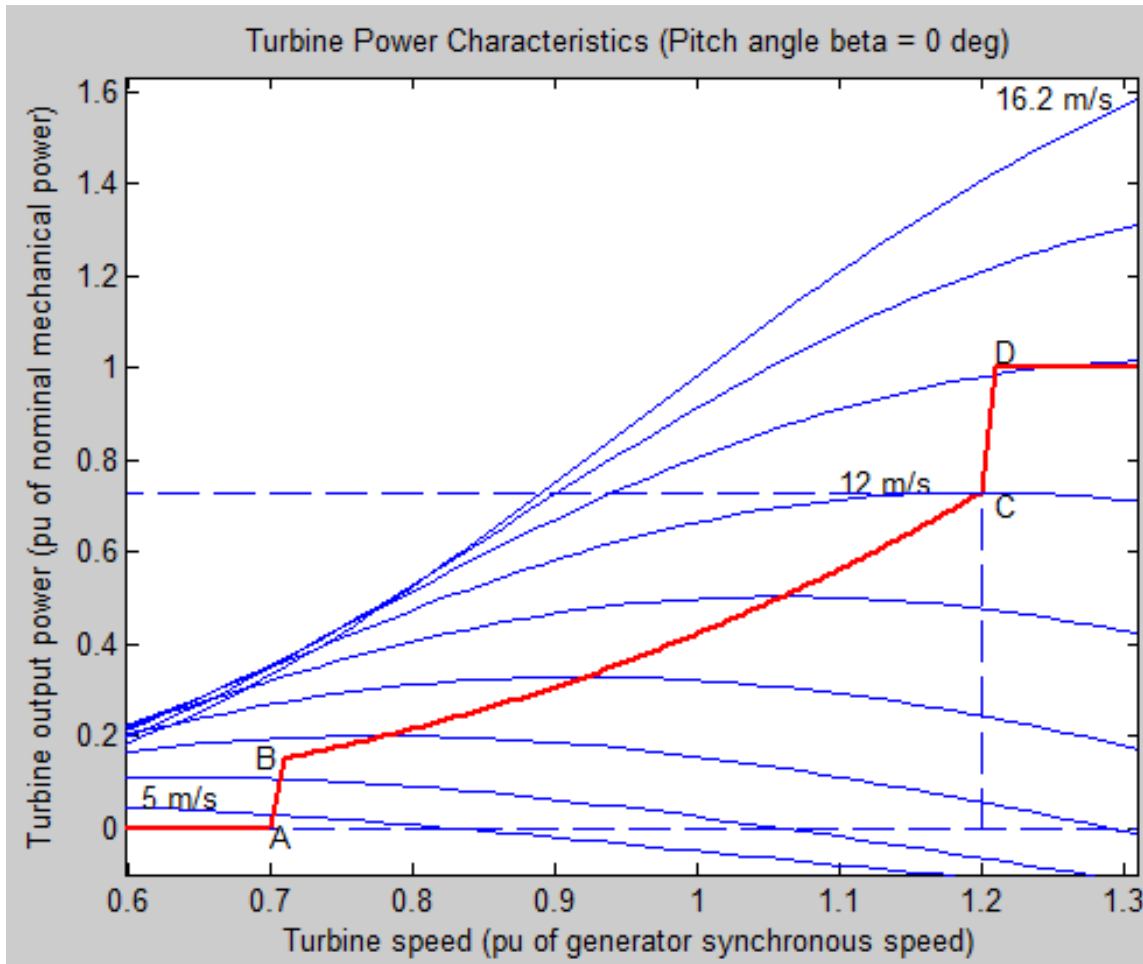


Σχήμα 5.2. Τριφασικό μοντέλο προσομοίωσης του αιολικού πάρκου στο Matlab [38]



Σχήμα 5.3. Τριφασικό μοντέλο εγκατάστασης 2MVA στο Matlab [38]

Βασική λειτουργία της Α/Γ είναι η δυνατότητα ανεύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT), που γίνεται εφικτή λόγω των συστημάτων ελέγχου ρύθμισης των στροφών που διαθέτει η κάθε Α/Γ. Για την ανεύρεση του MPPT της κάθε ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιείται στο αιολικό πάρκο της προσομοίωσης, χρησιμοποιείται η κόκκινη καμπύλη του σχήματος 5.4.



Σχήμα 5.4. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος συναρτήσει της ταχύτητας, MPPT [38]

Έτσι, όταν η ταχύτητα της τουρμπίνας είναι μεταξύ της ταχύτητας του σημείου B και του σημείου C, τότε η ανεμογεννήτρια έχει τη βέλτιστη ταχύτητα. Για τον έλεγχο της ταχύτητας της κάθε ανεμογεννήτριας χρησιμοποιείται η καμπύλη ABCD (σχήμα 5.4).

Τα χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία απεικονίζονται στον πίνακα 5.1:

Δεδομένα Ανεμογεννητριών		
Χαρακτηριστικά		Τιμή
Ονομαστική ταχύτητα ανέμου	V_{W_NOM}	12m/s
Ονομαστική ισχύς	P_{nom}	9MW
Ταχύτητα ανέμου ένταξης	V_{W_cut-in}	5m/s
Χαρακτηριστικά		Τιμή
Ταχύτητα ανέμου αποκοπής	$V_{W_cut-out}$	16.2m/s
Ονομαστική τάση λειτουργίας	V_s	575V
Αριθμός πόλων	P	3
Ονομαστική τάση(DC-link)	V_{DC}	1200V
Χωρητικότητα πυκνωτών(DC-link)	C_{DC}	$10000e^{-6}$ F

Πίνακας 5.1. Δεδομένα ανεμογεννητριών

Τα χαρακτηριστικά του δικτύου που χρησιμοποιήσαμε παρατίθενται στον πίνακα 5.2:

Δεδομένα Δικτύου		
Χαρακτηριστικά		Τιμή
Ονομαστική τάση	V_{NOM}	120kV
Συχνότητα	f	60Hz
Μήκος γραμμής μεταφοράς	m	30km
Αντίσταση γραμμής θετικής ακολουθίας	R_1	0.1153 Ohms/Km
Αντίσταση γραμμής μηδενικής ακολουθίας	R_0	40.413 Ohms/Km
Αυτεπαγωγή γραμμής θετικής ακολουθίας	L_1	0.1153 H/km
Αυτεπαγωγή γραμμής μηδενικής ακολουθίας	L_0	0.413 H/km

Πίνακας 5.2. Χαρακτηριστικά δικτύου

Τα κέρδη των PI controller που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο της προσομοίωσης στα διάφορα συστήματα ελέγχου έχοντας θέσει τη ρύθμιση voltage regulator ($V_{ref} = 1$) είναι:

i. Για τον PI ελεγκτή της τάσης του δικτύου:

$$K_{p_{grid_voltage_reg}} = 1.25 \quad (5.1)$$

$$K_{i_{grid_voltage_reg}} = 300 \quad (5.2)$$

ii. Για τον PI ελεγκτή της DC σύνδεσης:

$$K_{p_{DC_bus}} = 0.002 \quad (5.3)$$

$$K_{i_{DC_bus}} = 0.05 \quad (5.4)$$

iii. Για τον PI ελεγκτή του μετατροπέα πλευράς δικτύου:

$$K_{p_{GSC}} = 1 \quad (5.5)$$

$$K_{i_{GSC}} = 100 \quad (5.6)$$

iv. Για τον PI ελεγκτή του μετατροπέα πλευράς δρομέα:

$$K_{p_{RSC}} = 0.3 \quad (5.7)$$

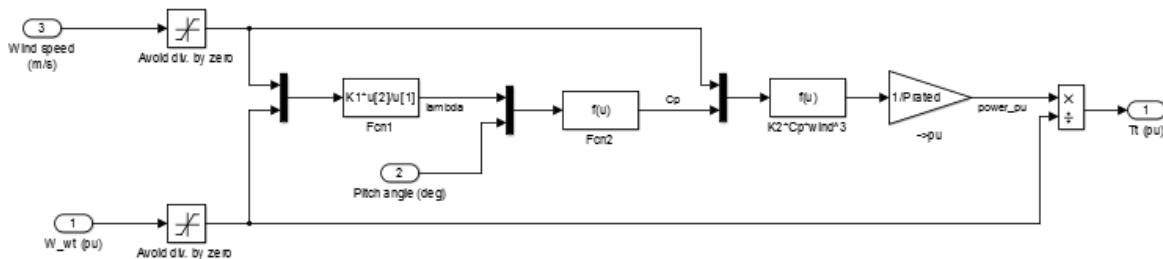
$$K_{i_{RSC}} = 8 \quad (5.8)$$

5.2. Μοντελοποίηση αεροδυναμικού τμήματος

Σύμφωνα με τις εξισώσεις 4.66-4.70, στις οποίες περιγράφεται το αεροδυναμικό τμήμα της Α/Γ κατασκευάστηκε, στο περιβάλλον Simulink του Matlab, πειραματικό μοντέλο προς μελέτη (σχήμα 5.5).

Όπως φαίνεται και από το σχήμα 5.5 ως **εισόδους** έχουμε την ταχύτητα του ανέμου V_w , τη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα ω_r και τη γωνία βήματος έλικας pitch angle β . Από τις τιμές των 2 πρώτων μεταβλητών προκύπτει ο λόγος ταχυτήτων λ . Στη συνέχεια με δεδομένα

τα λ και β υπολογίζεται ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος C_p . Η αεροδυναμική ισχύς P_w υπολογίζεται, αφού πρώτα υπολογιστεί ο λόγος ταχυτήτων λ και ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος C_p . Στην συνέχεια υπολογίζεται η μηχανική ροπή T_m που αναπτύσσεται στον άξονα από την διαίρεση της αεροδυναμικής ισχύος P_w με τη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα ω_r .



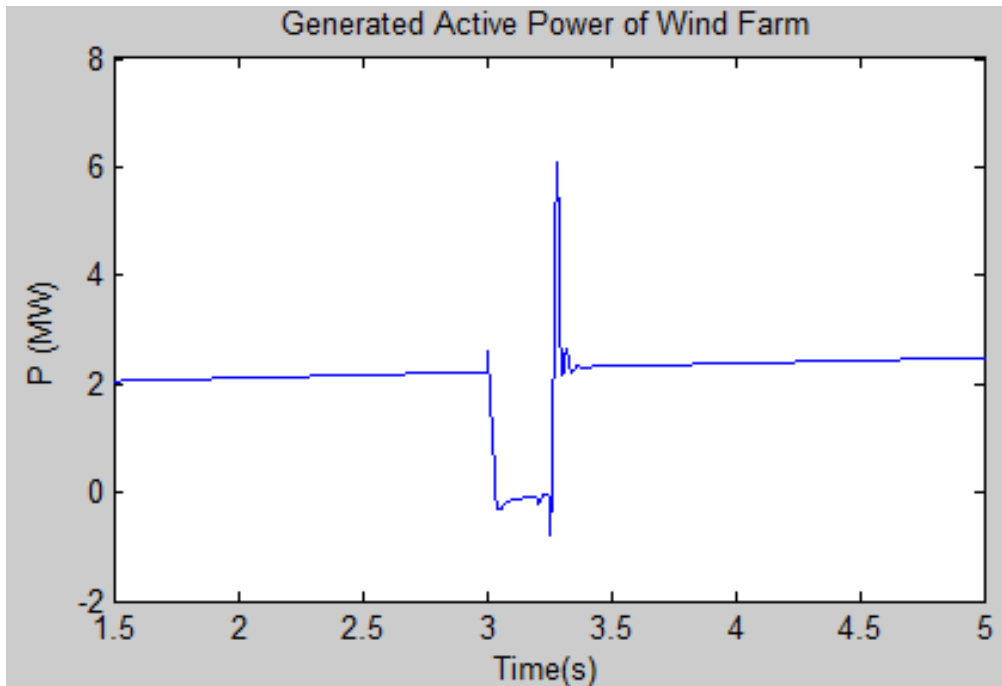
Σχήμα 5.5. Διαμόρφωση αεροδυναμικού μοντέλου της DFIG (Simulink του Matlab) [38]

5.3. Βραχυκυκλώματα φάσεων Α, Β και C

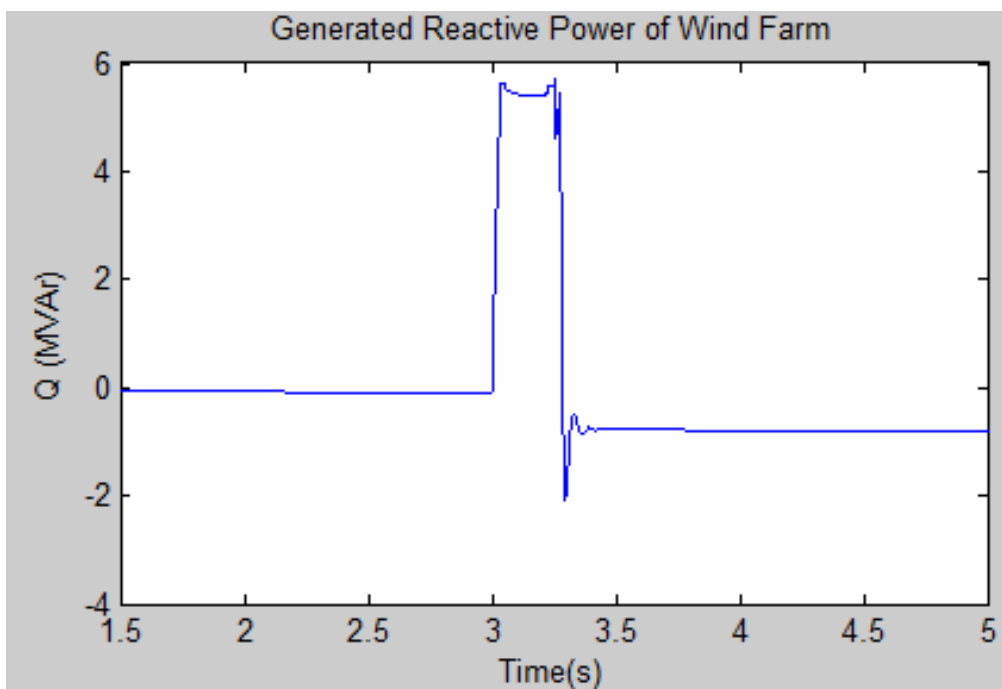
Στις προσομοιώσεις που θα ακολουθήσουν έχει επιλεγεί η ρύθμιση της τάσης (voltage regulation). Η ρύθμιση αυτή θέτει τη τάση αναφοράς ίση με 1 α.μ. Τα σφάλματα/βραχυκυκλώματα μεταξύ των φάσεων γίνονται σε απόσταση 20km από το δίκτυο, στην ένωση της εγκατάστασης 2MVA με το δίκτυο μεταφοράς (κόμβος B25). Εκτός της τελευταίας περίπτωσης λειτουργίας στην οποία το σφάλμα γίνεται στο κοινό σημείο σύνδεσης του δικτύου μεταφοράς με το αιολικό πάρκο. Για τη διενέργεια των προσομοιώσεων που θα ακολουθήσουν η ταχύτητα του ανέμου διατηρείται σταθερή στα 10 m/s και έχει τεθεί ως χρόνος προσομοίωσης $t = 40$ sec. Σε κάθε περίπτωση λειτουργίας που ακολουθεί, η διαταραχή εφαρμόζεται τη χρονική στιγμή $t = 3$ sec και η διάρκεια της διαταραχής αυτής είναι 15 κύκλοι ρολογιού ($15/60 = 0.25$ sec).

5.3.1. Μονοφασικό βραχυκύκλωμα φάσης Α ως προς γη

Στη περίπτωση αυτή εφαρμόζεται ένα μονοφασικό βραχυκύκλωμα της φάσης Α ως προς γη. Έχοντας θέσει όλες τις παραμέτρους σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν τα αποτελέσματα που λαμβάνονται για τη παραγόμενη ενεργό και άεργο ισχύ είναι αυτά των σχημάτων 5.6. και 5.7., αντίστοιχα.



Σχήμα 5.6. Παραγόμενη ενεργός ισχύς

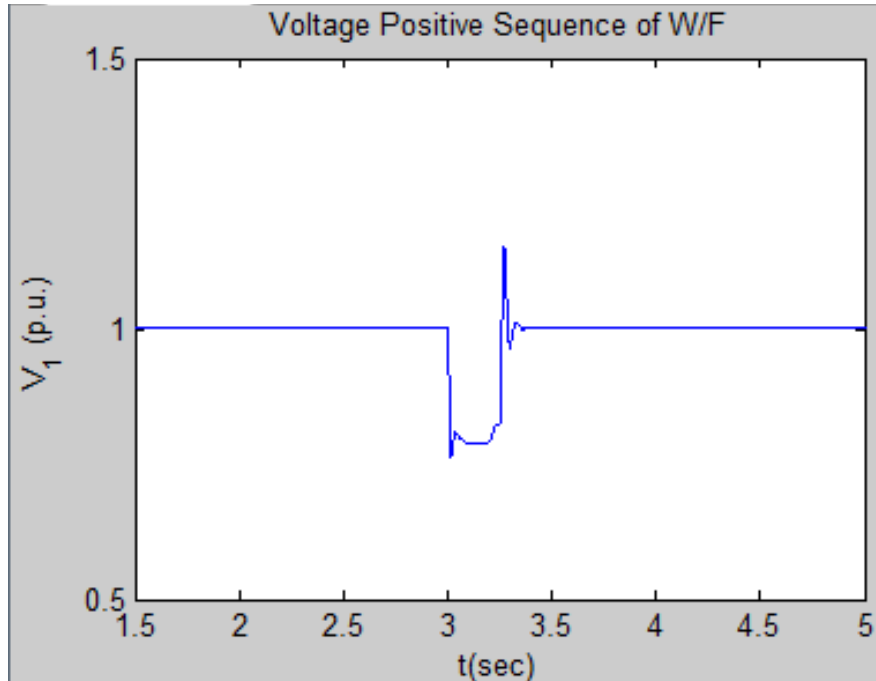


Σχήμα 5.7. Παραγόμενη άεργος ισχύς.

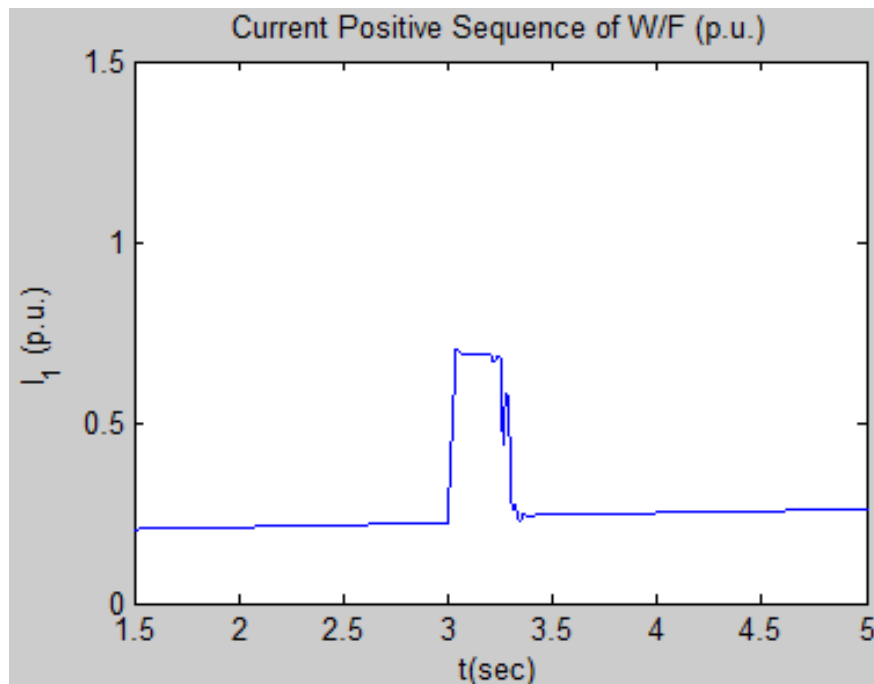
Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος της Α φάσης με τη Γη, το αιολικό πάρκο εγχέει άεργος ισχύς στο δίκτυο με σκοπό τη διατήρηση της τάσης στο σύστημα. Από το σχήμα 5.7 γίνεται αντιληπτό ότι δεν έχουμε καμία αποσύνδεση του αιολικού πάρκου από το δίκτυο, καθώς ύστερα από την

εκκαθάριση του σφάλματος, το αιολικό πάρκο συνεχίζει να παράγει ενεργό ισχύ η οποία αυξάνεται σταδιακά.

Η τάση και το ρεύμα της θετικής ακολουθίας των ανεμογεννητριών του αιολικού πάρκου φαίνονται στα σχήματα 5.8. και 5.9., αντίστοιχα.

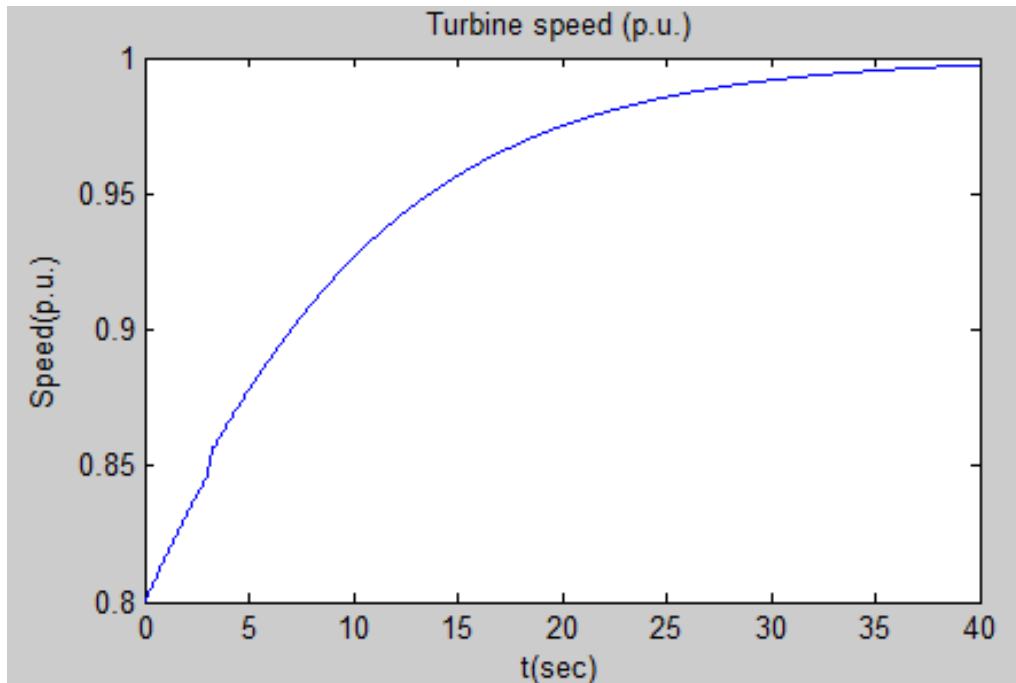


Σχήμα 5.8. Τάση θετικής ακολουθίας Α/Π

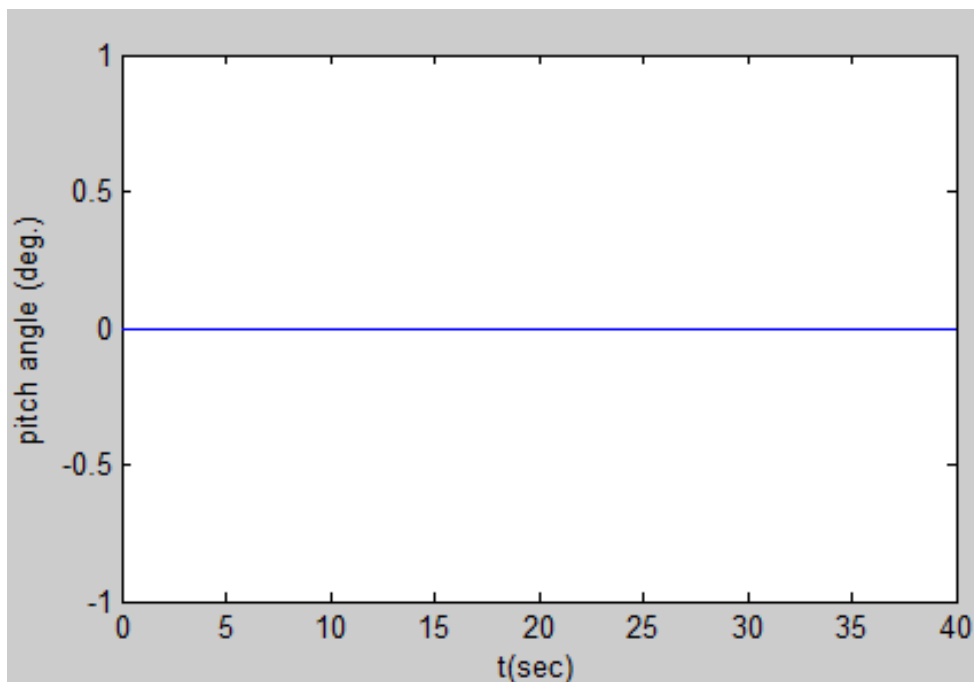


Σχήμα 5.9. Ρεύμα θετικής ακολουθίας Α/Π

Από τα σχήματα 5.8. και 5.9., παρατηρούμε ότι η τάση του συστήματός μας πέφτει και ταυτοχρόνως η τιμή του ρεύματος αυξάνεται. Γίνεται έτσι προφανής η λειτουργία του συστήματος ελέγχου και ο έλεγχος για παραγωγή αέργου ισχύος όπως αυτή παρουσιάζεται στο σχήμα 5.7.



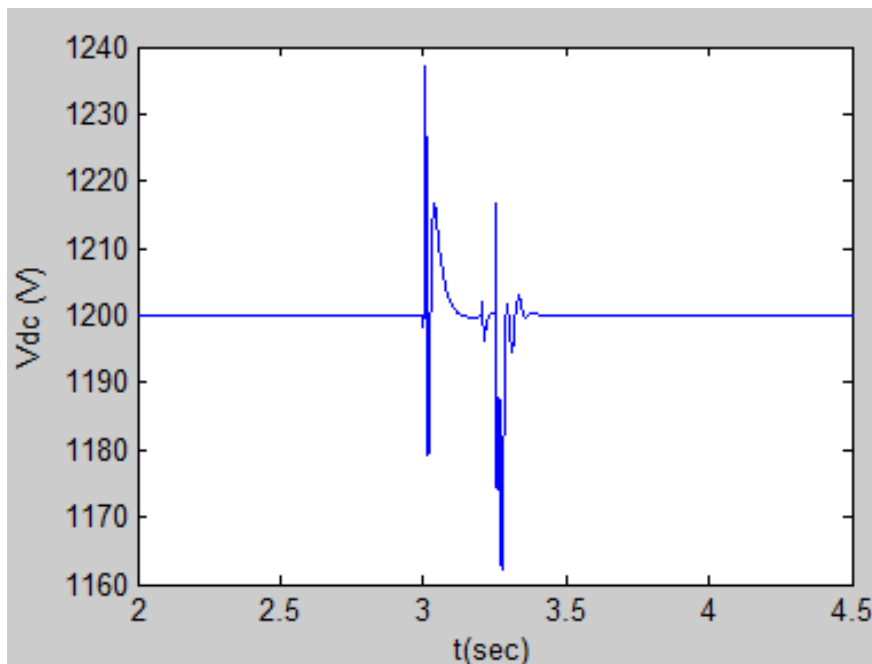
Σχήμα 5.10. Ταχύτητα περιστροφής τουρμπίνας.



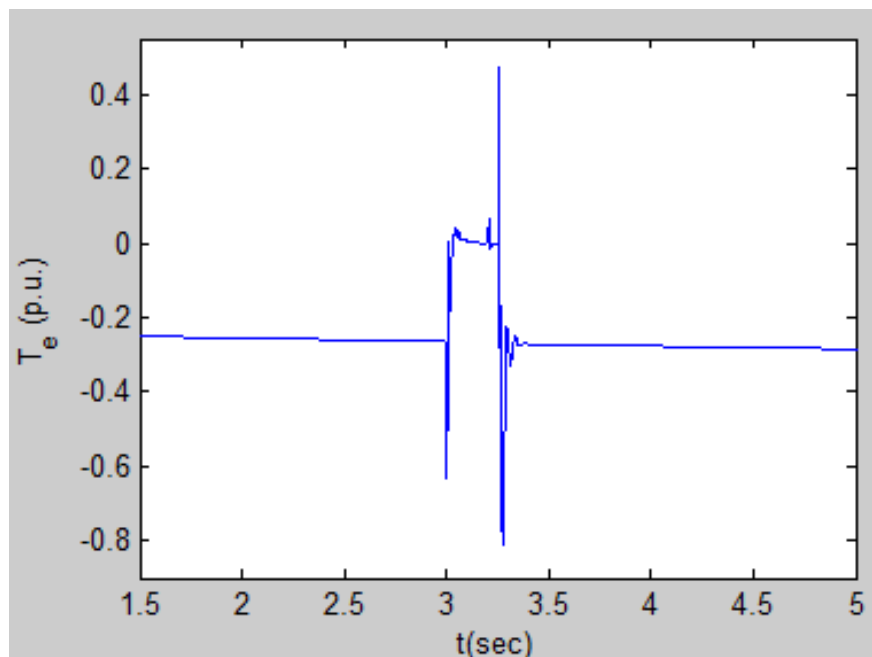
Σχήμα 5.11. Γωνία βήματος πτερωτών.

Από τα σχήματα 5.10. και 5.11. παρατηρούμε ότι η γωνία βήματος δεν μεταβάλλεται καθόλου κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος, ενώ η ταχύτητα περιστροφής της τουρμπίνας φτάνει το 1 p.u. κατά τη χρονική στιγμή $t = 40 \text{ sec}$.

Παρουσιάζεται η ηλεκτρομαγνητική ισχύς (σχήμα 5.13.) κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος, καθώς και η τάση της DC-σύνδεσης στο μετατροπέα (σχήμα 5.12.), μέσω της οποίας ελέγχεται η μεταβολή του συντελεστή ισχύος.



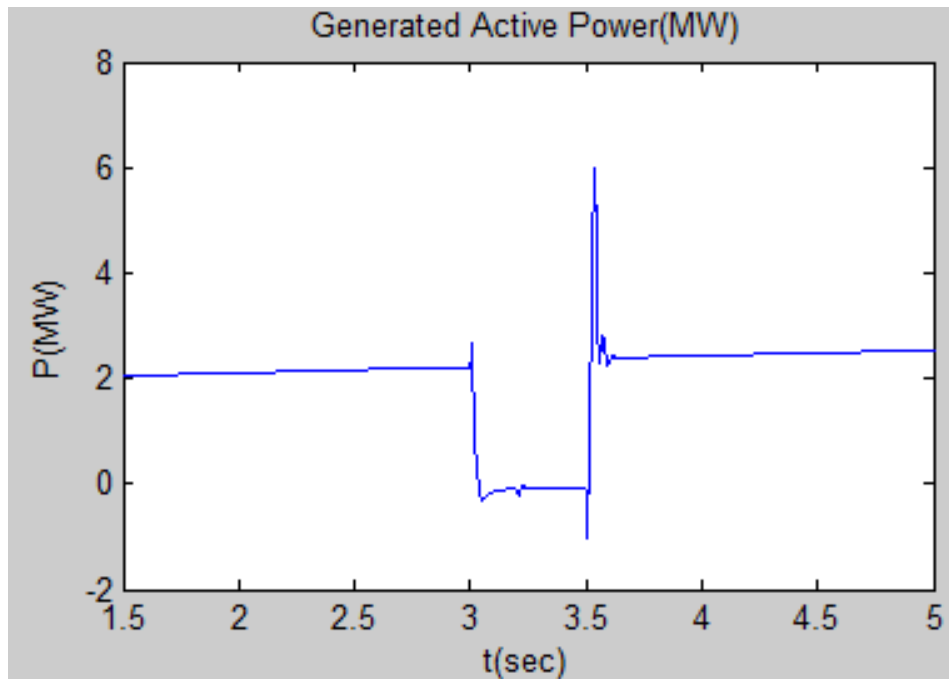
Σχήμα 5.12. Τάση της DC διασύνδεση



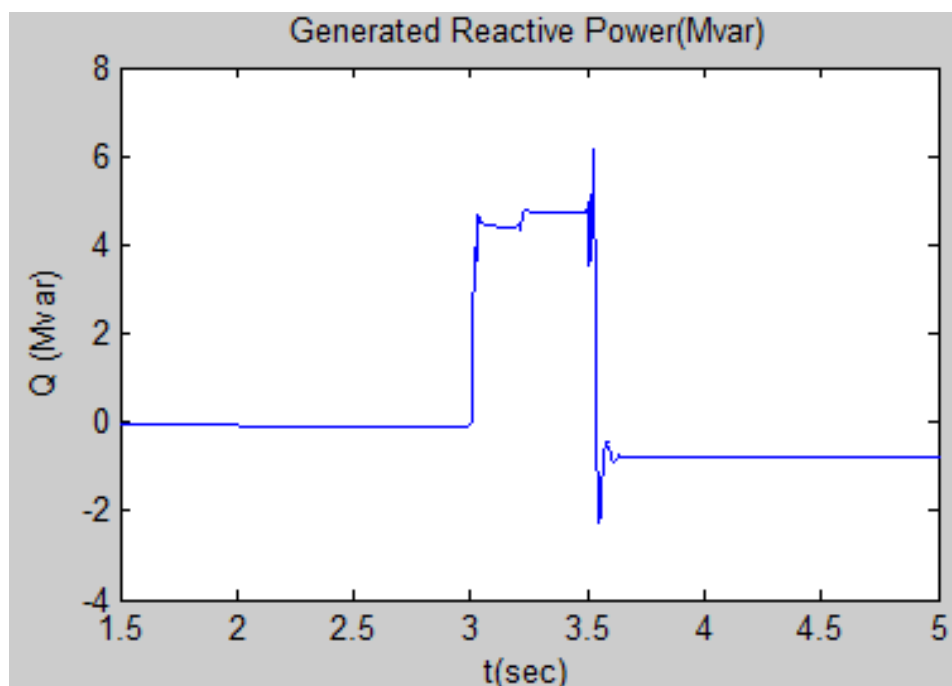
Σχήμα 5.13. Ηλεκτρομαγνητική ροπή A/Π

5.3.2. Διφασικό βραχυκύκλωμα φάσεων B και C

Στη περίπτωση αυτή εφαρμόζεται ένα διφασικό βραχυκύκλωμα μεταξύ των φάσεων B και C. Έχοντας θέσει σταθερή τη ταχύτητα του ανέμου στα 10 m/s, τη χρονική στιγμή εφαρμογής του σφάλματος $t = 3 \text{ sec}$ και τη διάρκεια επίδρασης στους 30 κύκλους ρολογιού ($30/60 = 0.5 \text{ sec}$), τα αποτελέσματα της παραγόμενης ενεργού και άεργου ισχύος είναι αυτά των σχημάτων 5.14. και 5.15., αντίστοιχα.

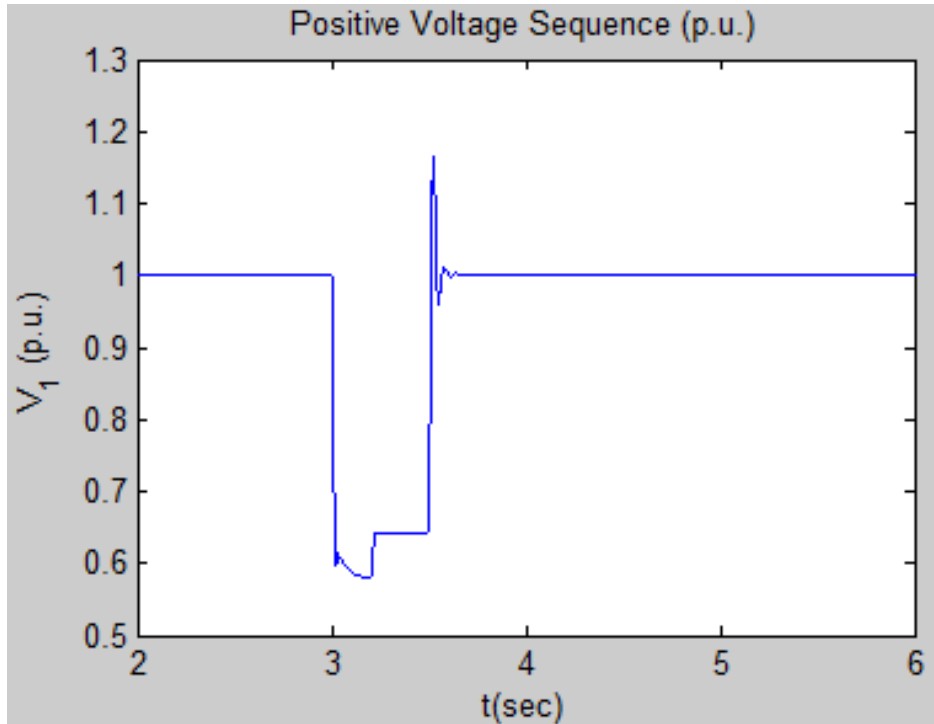


Σχήμα 5.14. Παραγόμενη ενεργός ισχύς.

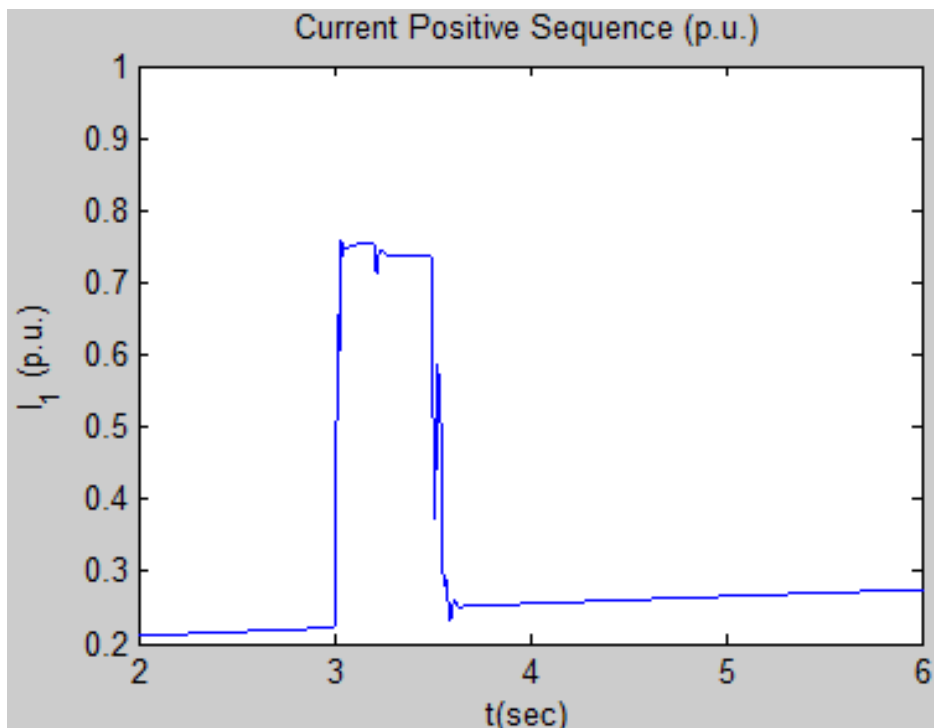


Σχήμα 5.15. Παραγόμενη άεργος ισχύς.

Από τα σχήματα 5.14. και 5.15. παρατηρούμε ότι για το χρονικό διάστημα επίδρασης του σφάλματος μας το αιολικό πάρκο παράγει άεργο ισχύ, ενώ η ενεργός ισχύς μηδενίζεται. Η παραγωγή αέργου ισχύος γίνεται εμφανής και από το σχήμα 5.17. στο οποίο το ρεύμα θετικής ακολουθίας αυξάνεται σημαντικά.

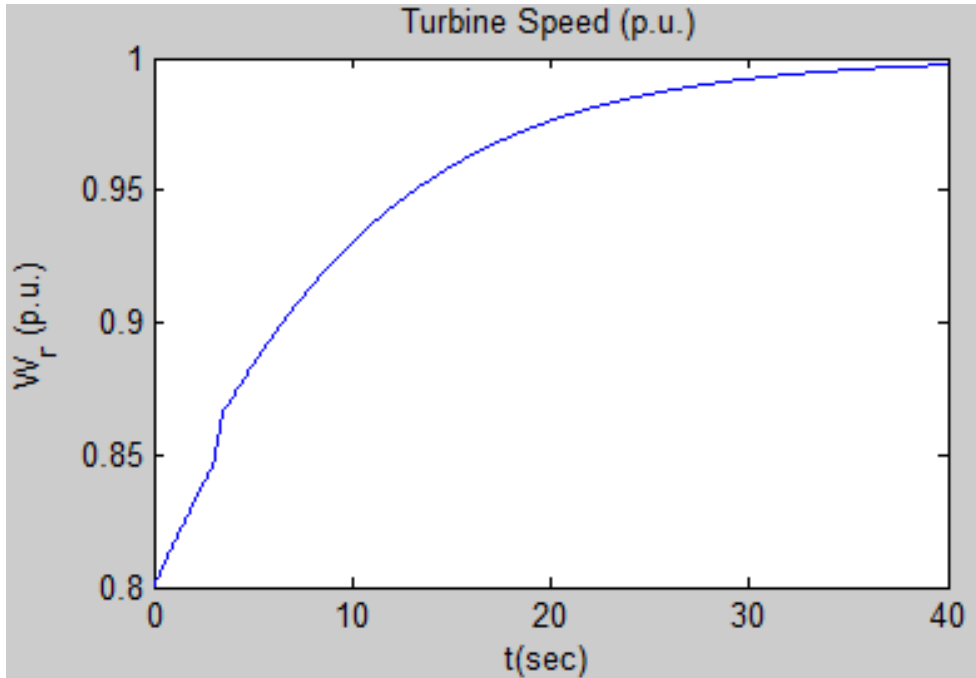


Σχήμα 5.16. Τάση θετικής ακολουθίας Α/Π.

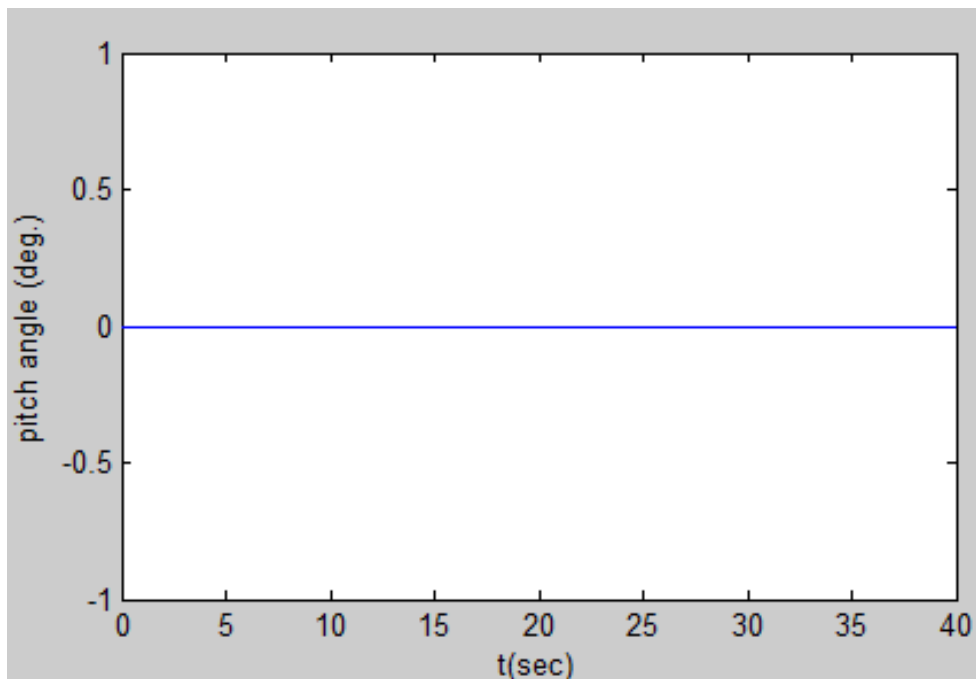


Σχήμα 5.17. Ρεύμα θετικής ακολουθίας Α/Π.

Από τα παραπάνω σχήματα παρατηρούμε την ενεργοποίηση των συστημάτων ελέγχου και προστασίας του συστήματός μας. Καθώς παρατηρείται η αύξηση του ρεύματος θετικής ακολουθίας (περίπου στο 70% επί του ονομαστικού) και η τάση μειώνεται κατά 40% επί της ονομαστικής τιμής της.



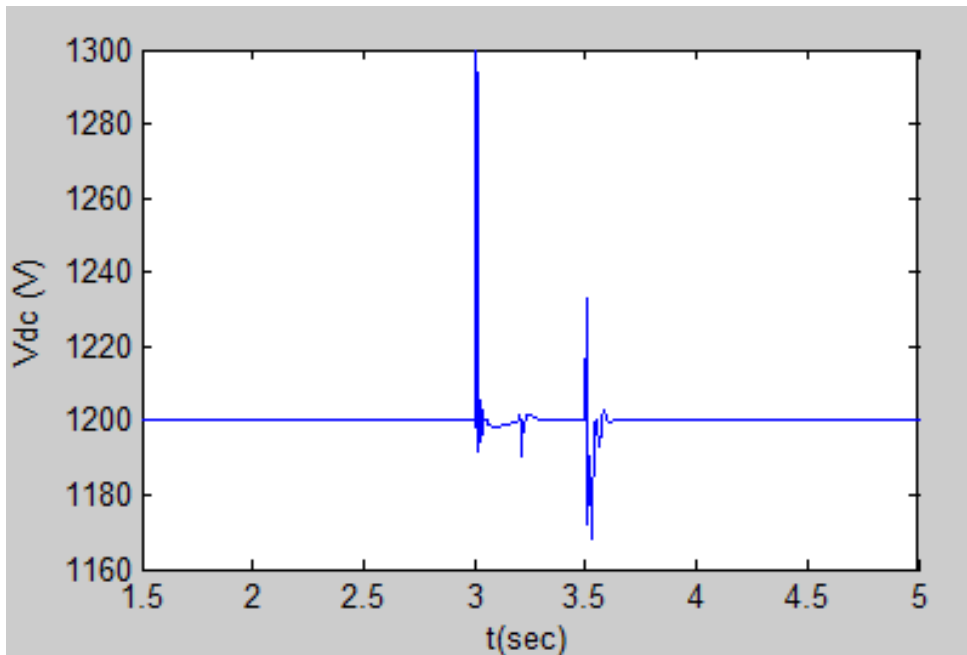
Σχήμα 5.18. Ταχύτητα περιστροφής τουρμπίνας.



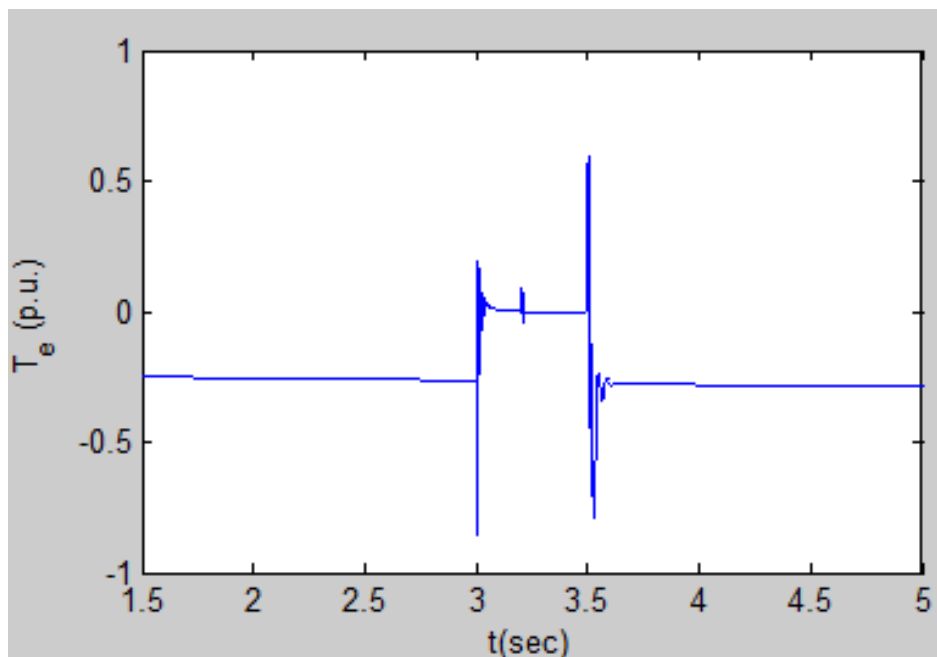
Σχήμα 5.19. Γωνία βήματος πτερωτών.

Παρόλο την υψηλή αύξηση του ρεύματος θετικής ακολουθίας και της παραγωγής αέργου ισχύος, ο ελεγκτής βήματος της γωνίας των περυγίων δεν τέθηκε σε λειτουργία, καθώς η ταχύτητα περιστροφής της τουρμπίνας της κάθε ανεμογεννήτριας δεν υπερβαίνει το όριο του 1 p.u.

Από το σχήμα 5.20. παρατηρούμε ότι η τάση στη DC-σύνδεση παραμένει σταθερή στα 1200 V έχοντας 1 peak στο χρόνο έναρξης εφαρμογής του σφάλματός μας. Ο συντελεστής ισχύος διατηρείται σταθερός και σε αυτή την περίπτωση.



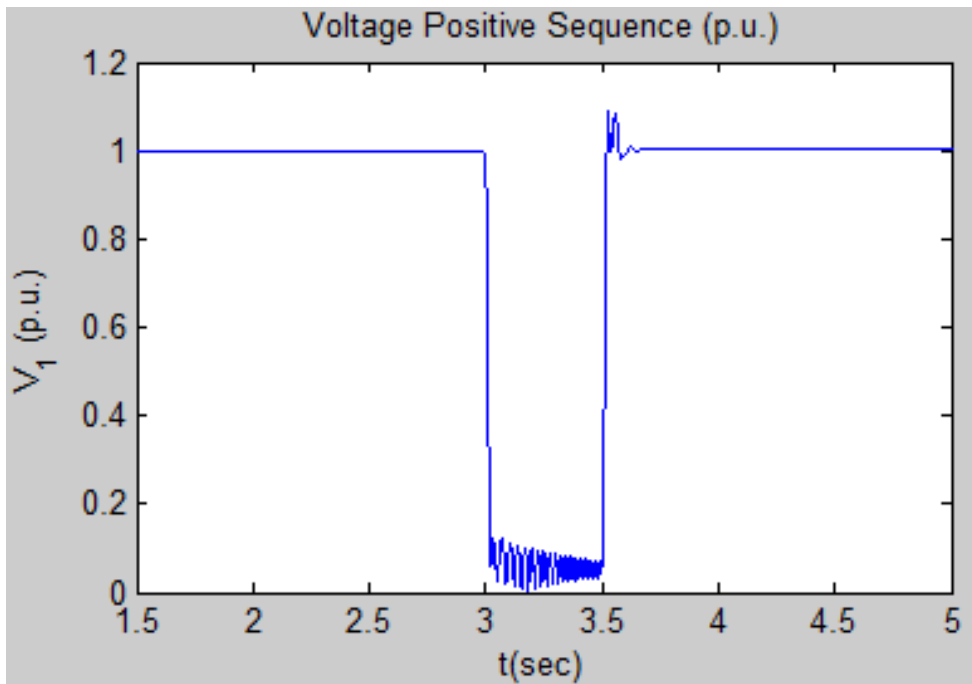
Σχήμα 5.20. Τάση DC- σύνδεσης.



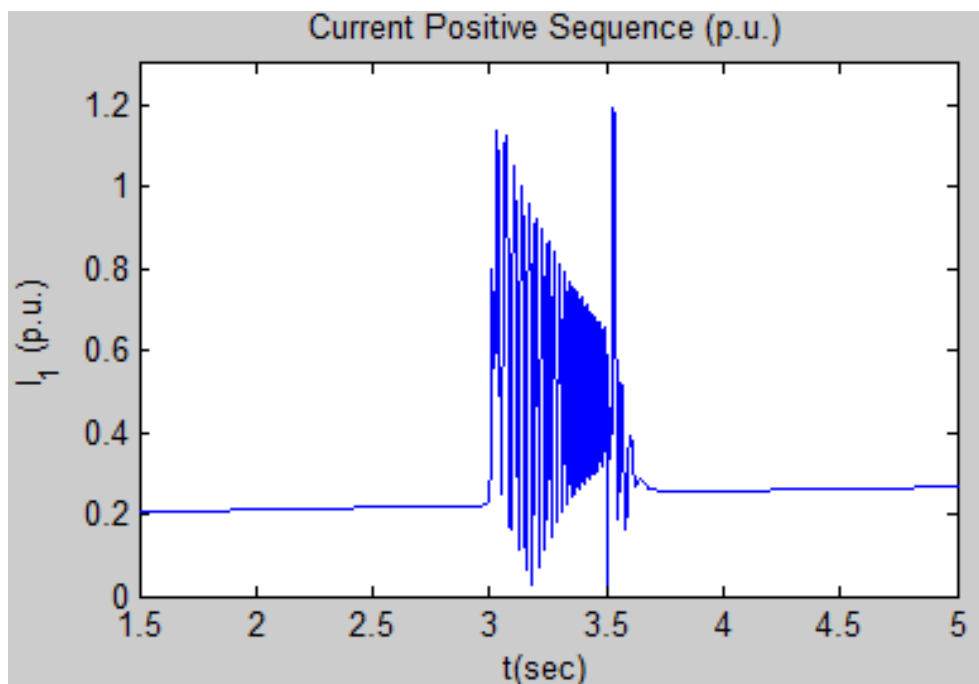
Σχήμα 5.21. Ηλεκτρομαγνητική ροπή.

5.3.3. Τριφασικό βραχυκύκλωμα φάσεων A, B και C ως προς γη

Στη περίπτωση αυτή εφαρμόζεται ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα μεταξύ των φάσεων A, B και C. Θέτοντας σταθερή τη ταχύτητα του ανέμου στα 10 m/s, τη χρονική στιγμή εφαρμογής του σφάλματος $t = 3$ sec και τη διάρκεια επίδρασης στους 30 κύκλους ρολογιού ($30/60 = 0.5$ sec), οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος θετικής ακολουθίας είναι αυτά των σχημάτων 5.22. και 5.23., αντίστοιχα.

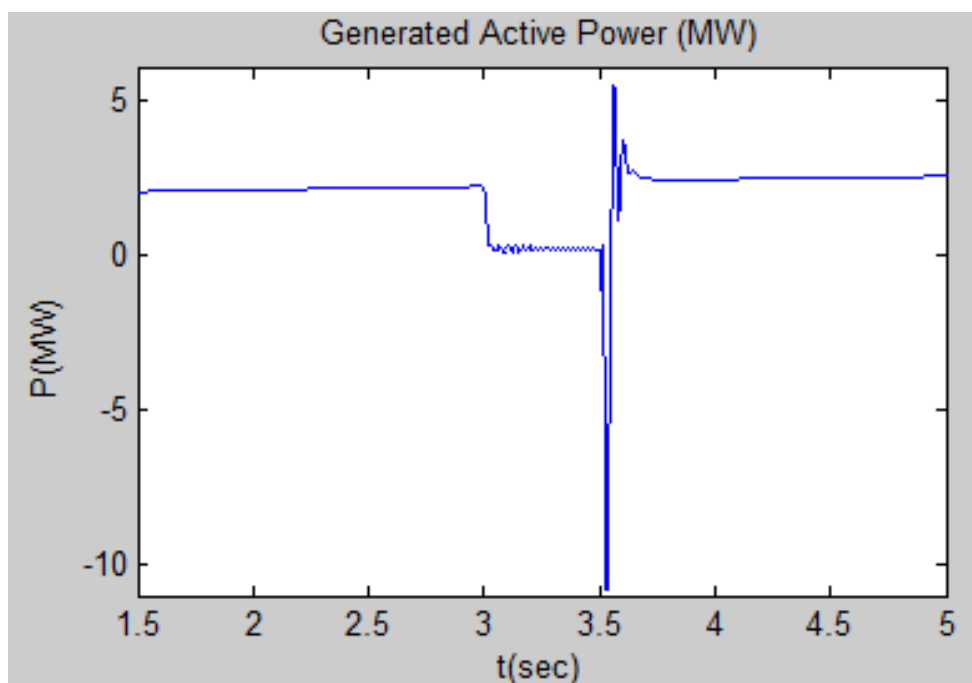


Σχήμα 5.22. Τάση θετικής ακολουθίας Α/Π.

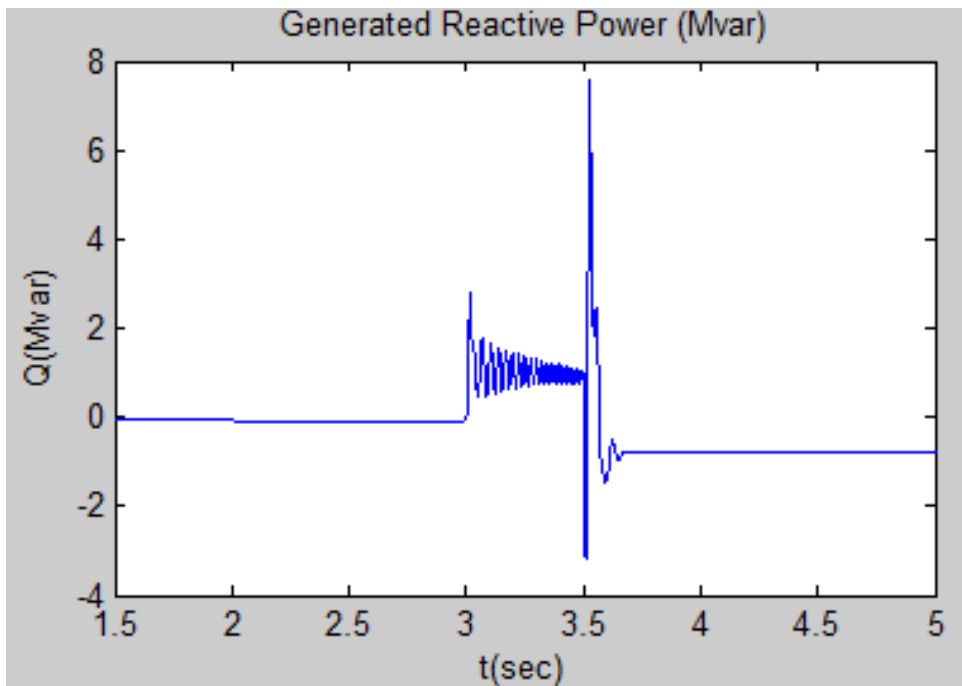


Σχήμα 5.23. Ρεύμα θετικής ακολουθίας Α/Π.

Από τις παραπάνω κυματομορφές γίνεται εμφανής το γεγονός ότι το τριφασικό βραχυκύκλωμα σε σχέση με το μονοφασικό και το διφασικό βραχυκύκλωμα, είναι το πιο επιβλαβές σφάλμα για το σύστημα που μελετάμε. Όπως τα συστήματα ελέγχου και προστασίας που διαθέτει το μοντέλο μας καθιστούν δυνατή την εκκαθάριση του τριφασικού βραχυκυκλώματος και τη επαναφορά στην ομαλή λειτουργία του συνολικού συστήματος. Όπως αναμενόταν η βύθιση της τάσης φτάνει σε κάποια peaks σχεδόν το 100% της ονομαστικής τιμής της. Η βύθιση της τάσης έχει ως αποτέλεσμα τη κατανάλωση ενεργού ισχύος όπως θα διαπιστώσουμε αργότερα από τη σχετική κυματομορφή της παραγόμενης ενεργού ισχύος (σχήμα 5.24.). Ταυτοχρόνως, έχουμε υψηλό ρεύμα το οποίο υπερβαίνει το 1 p.u.

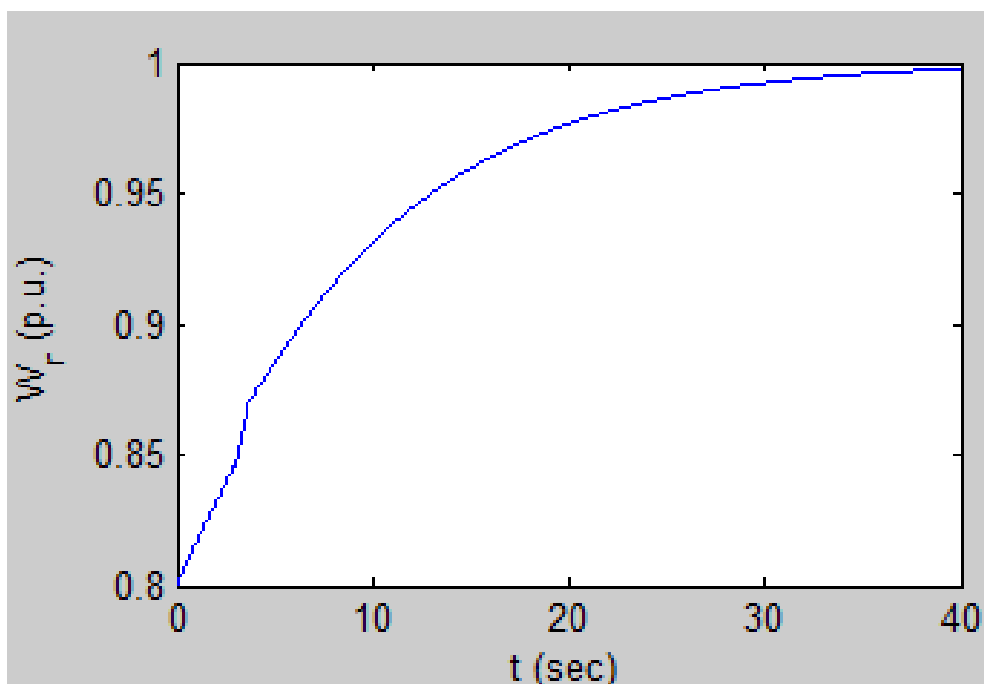


Σχήμα 5.24. Παραγόμενη ενεργός ισχύς Α/Π.

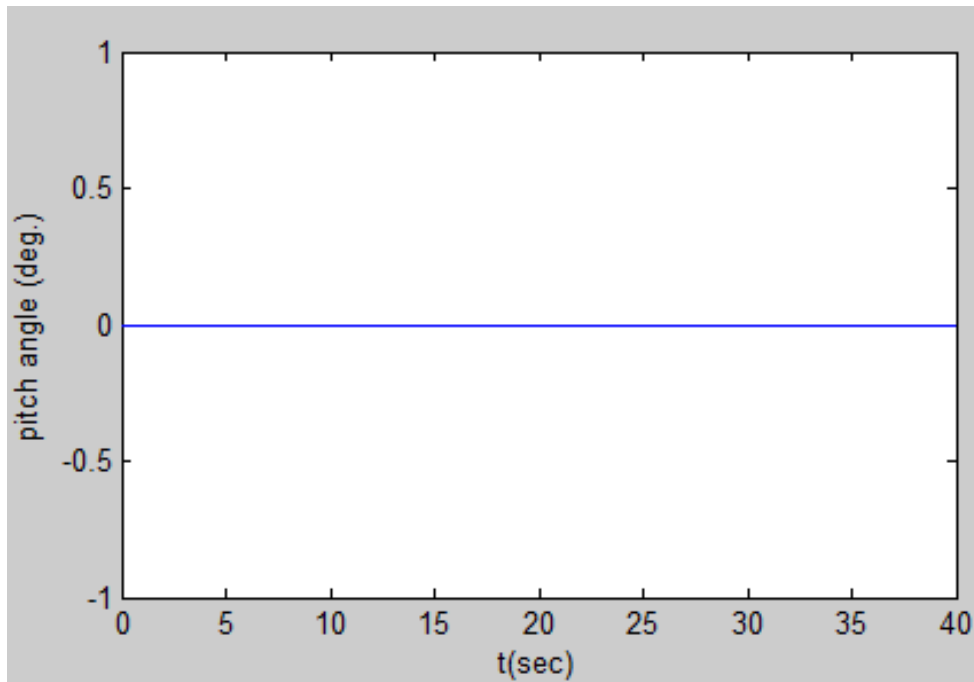


Σχήμα 5.25. Παραγόμενη άεργος ισχύς Α/Π.

Η ενεργός ισχύς (σχήμα 5.24.) ακολουθεί τη μεταβολή της τάσης, και η άεργος ισχύς (σχήμα 5.25.) τη μεταβολή του ρεύματος, όπως αναμενόταν. Η απώλεια ενεργού ισχύος δεν είναι επιθυμητή, ωστόσο σε σφάλματα αυτής της κλίμακας (σχεδόν 110%, $\approx 10\text{MW}$) το σύστημά μας αδυνατεί να εξισορροπήσει αυτά τα σφάλματα άμεσα. Μετά την εκκαθάριση του σφάλματος το σύστημά μας δεν παράγει άεργο ισχύ.

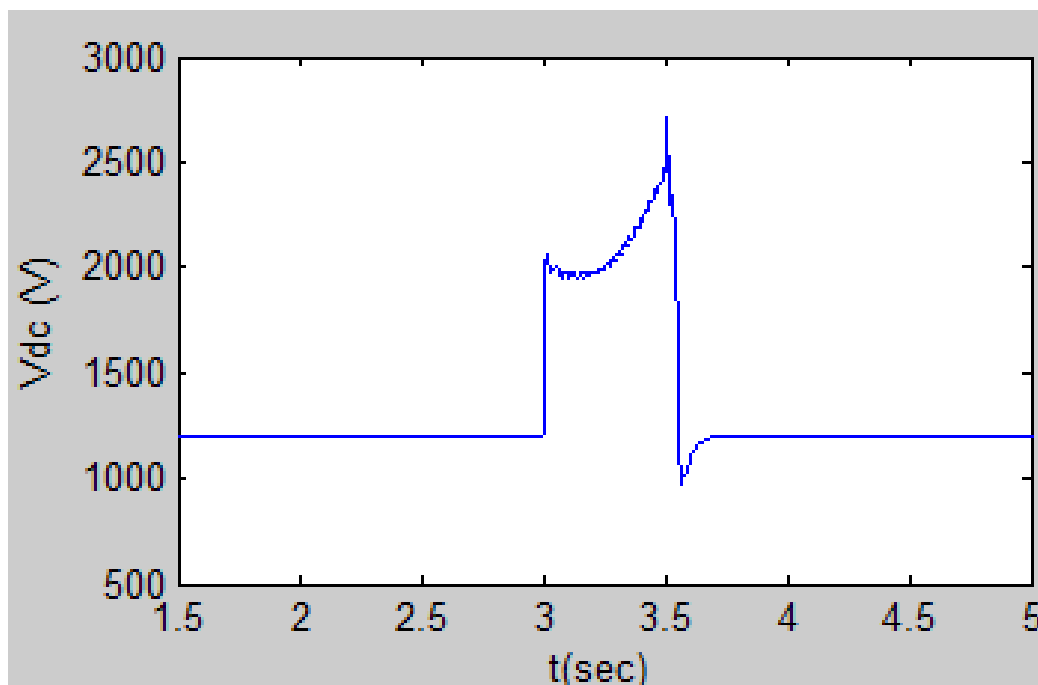


Σχήμα 5.26. Ταχύτητα περιστροφής τουρμπίνας.

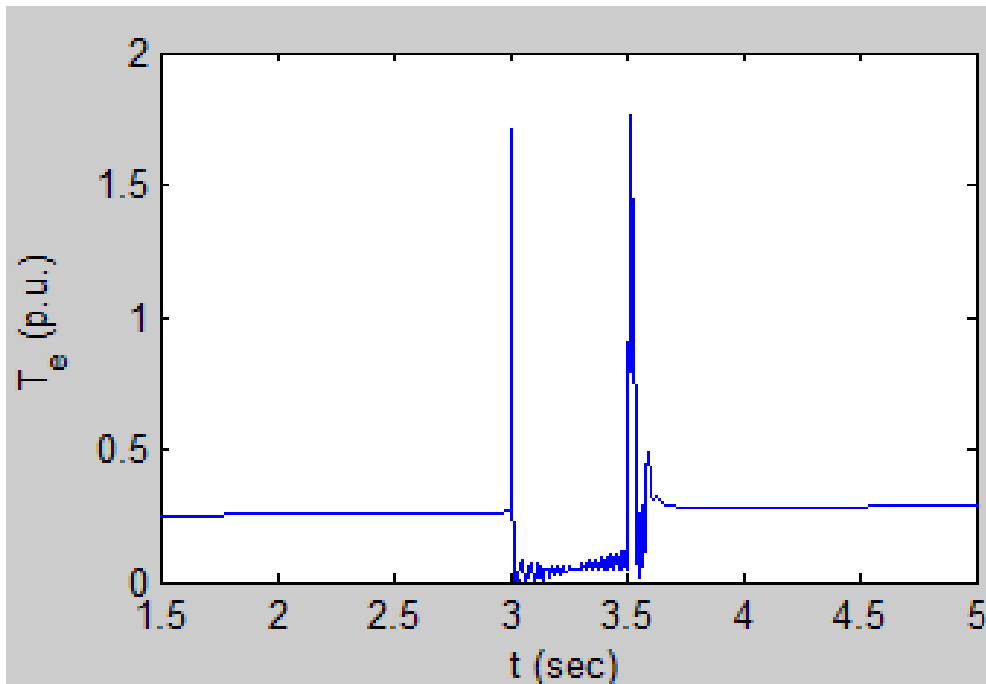


Σχήμα 5.27. Γωνία βήματος πτερωτών.

Η τάση στη DC σύνδεση είναι αυτή που φαίνεται στο σχήμα 5.28., παρατηρούμε ότι παρουσιάζει 2 κορυφές, ενώ καθ' όλη τη διάρκεια του υφιστάμενου σφάλματος σχεδόν διπλασιάζεται η τιμή της σε σχέση με την ονομαστική της τιμή (1200V).

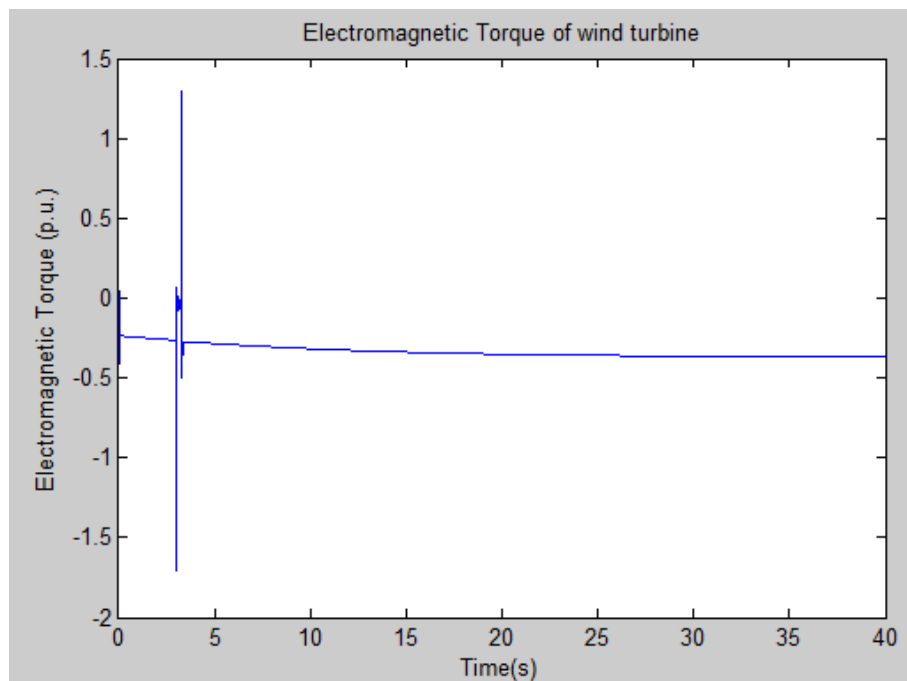


Σχήμα 5.28. Τάση DC-σύνδεσης



Σχήμα 5.29. Ηλεκτρομαγνητική ροπή.

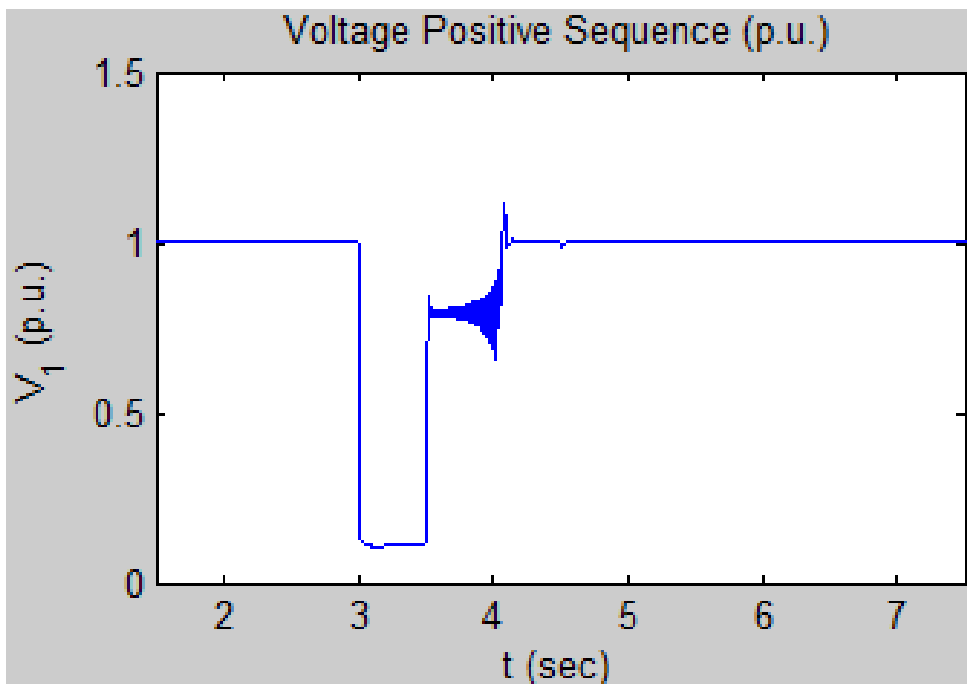
Από το σχήμα 5.29. παρατηρούμε ότι η ηλεκτρομαγνητική ροπή ακολουθεί την κυματομορφή της τάσης. Επίσης παρατηρούμε ότι για χρόνο $t \approx 20 \text{ sec}$ αρχίζει να σταθεροποιείται στη τιμή 0.73 p.u. όπως φαίνεται από το σχήμα 5.30



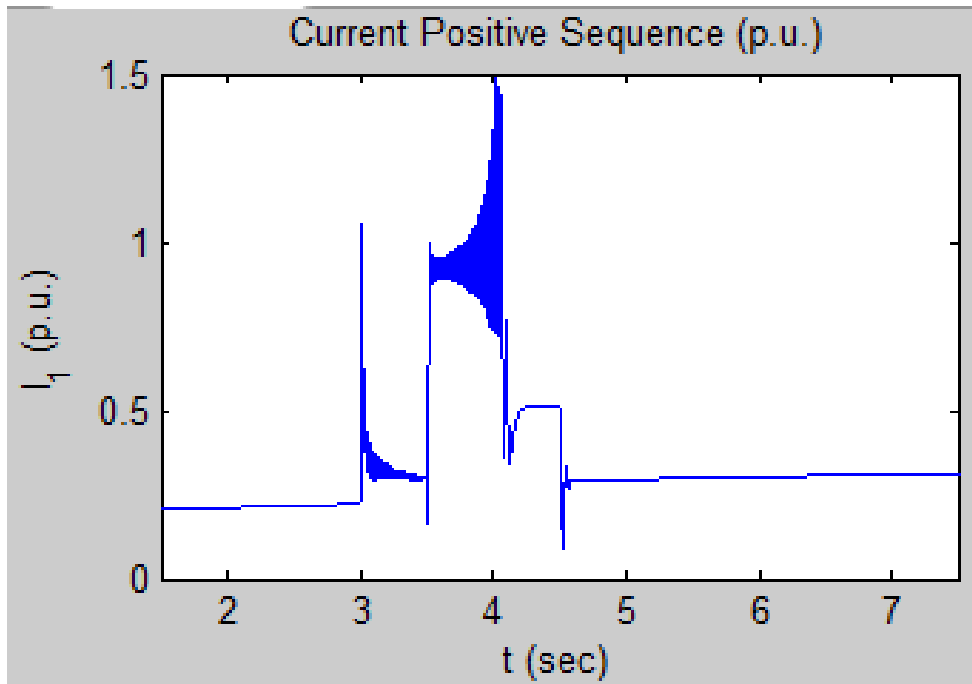
Σχήμα 5.30. Ηλεκτρομαγνητική ροπή.

5.3.4. Τριφασικό βραχυκύκλωμα φάσεων A, B και C στο κοινό σημείο σύνδεσης με το αιολικό πάρκο

Στη περίπτωση αυτή θα εξετασθεί το ενδεχόμενο βραχυκύκλωσης των τριών φάσεων του δικτύου μεταφοράς στο κοινό σημείο σύνδεσης του δικτύου με το αιολικό πάρκο. Η μελέτη της συγκεκριμένης περίπτωσης γίνεται για να συγκριθούν τα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που έγινε στην ενότητα 5.4.3. Ο χρόνος έναρξης και αποκοπής του σφάλματος είναι ο ίδιος με την προηγούμενη περίπτωση. Η τάση και το ρεύμα θετικής ακολουθίας του αιολικού πάρκου παρουσιάζονται στα σχήματα 5.31. και 5.32., αντίστοιχα.

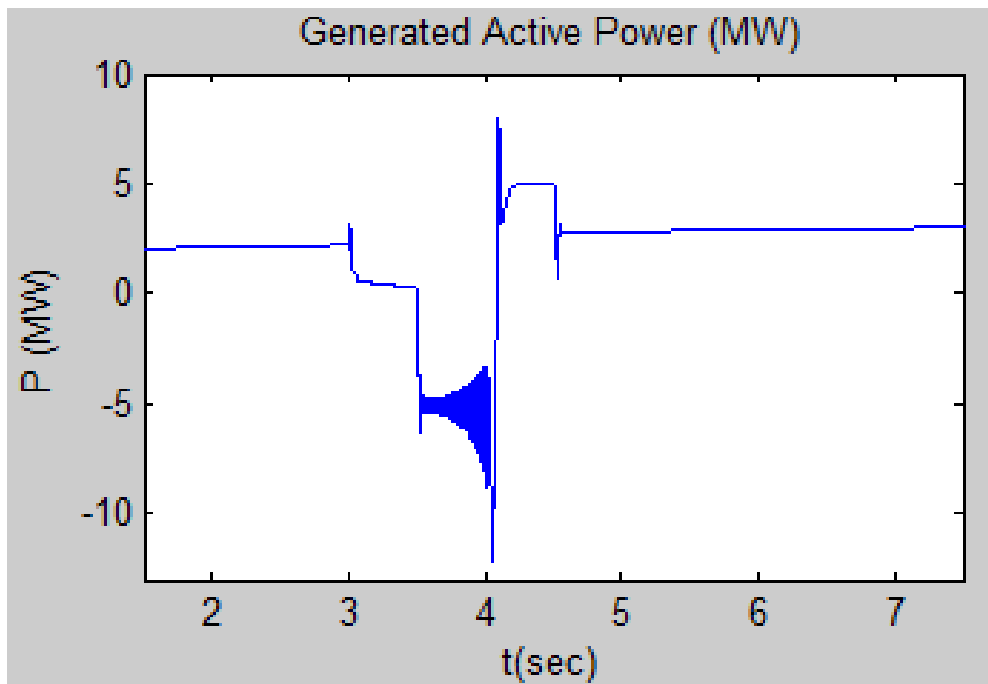


Σχήμα 5.31. Τάση θετικής ακολουθίας Α/Π.

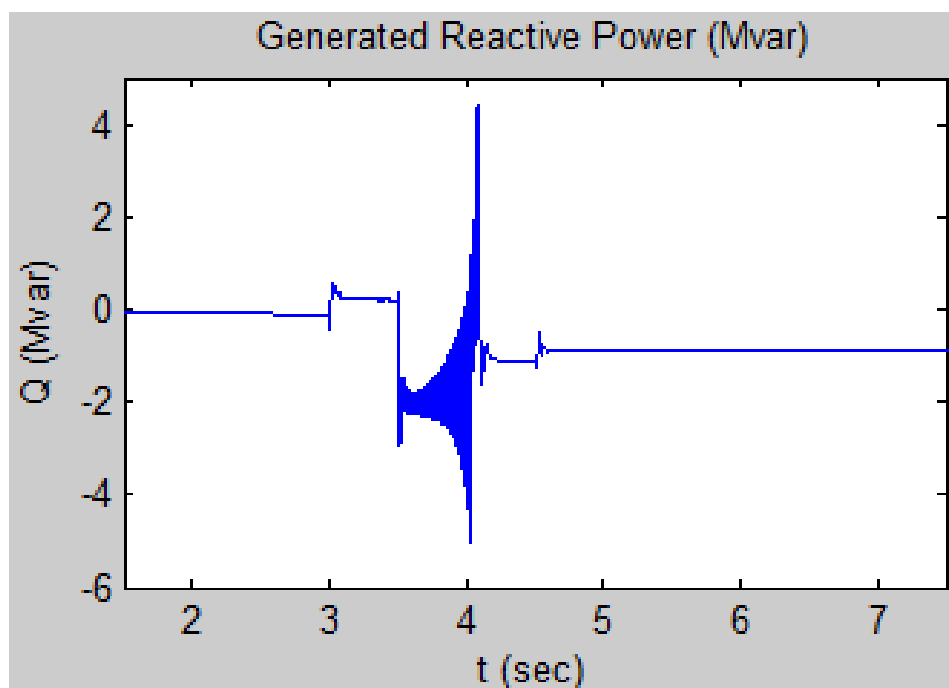


Σχήμα 5.32. Ρεύμα θετικής ακολουθίας Α/Π.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της περίπτωσης λειτουργίας (5.4.4) αυτής με αυτά της προηγούμενης περίπτωσης λειτουργίας (5.4.3) παρατηρούμε ότι το ρεύμα θετικής ακολουθίας έχει εντονότερη διακύμανση σχηματίζοντας περισσότερα peaks, και η αποκατάστασή του σε μία σταθερή τιμή γίνεται για χρόνο $t \approx 4.5$ sec. Η κυματομορφή της παραγόμενης ενεργού και αέργου ισχύς παρουσιάζονται στα σχήματα 5.33 και 5.34, αντίστοιχα. Να σημειωθεί ότι η απώλεια αέργου ισχύος, όπως συνέβη και προηγουμένως, οφείλεται στην αδυναμία του συστήματος για γρήγορη εξομάλυνση και επαναφορά στην ισορροπία του συστήματός μας (σταθερή κατάσταση). Ωστόσο τα συστήματα προστασίας και ελέγχου επαναφέρουν το σύστημα στη κατάσταση ισορροπίας, χωρίς να αποκόπτεται η λειτουργία του αιολικού πάρκου.



Σχήμα 5.33. Παραγόμενη ενεργός ισχύς.



Σχήμα 5.34. Παραγόμενη άεργος ισχύς.

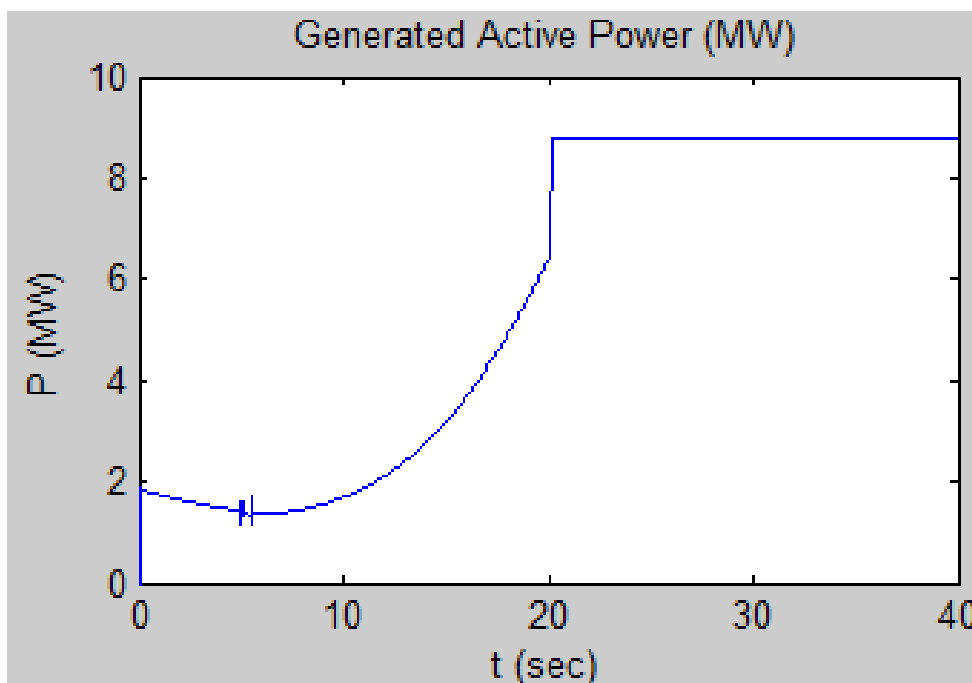
Συμπερασματικά τα τριφασικά σφάλματα όντως δημιουργούν τις μεγαλύτερες καταπονήσεις στις ανεμογεννήτριες για αυτό το λόγο και τα συστήματα προστασίας των ανεμογεννητριών συνεχώς εξελίσσονται και βελτιώνονται.

5.4. Βύθιση τάσεως κατά 15% στο δίκτυο

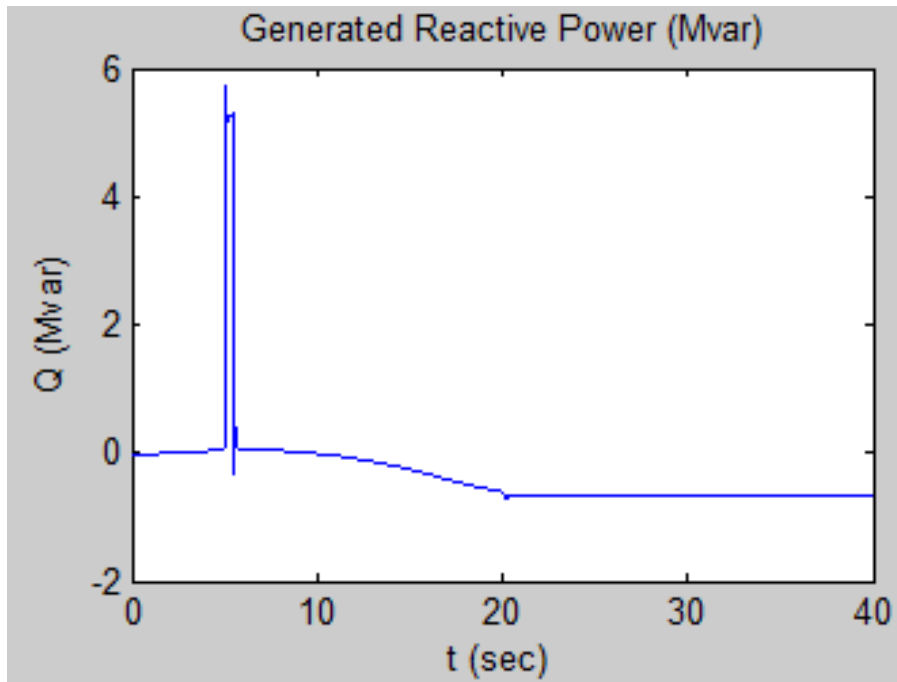
Στις υπό-ενότητες που ακολουθούν το σύστημα υφίσταται βύθιση τάσεως ίση με το 15% της ονομαστικής τάσης του δικτύου μεταφοράς (120kV). Η βύθιση τάσεως υφίσταται τη χρονική στιγμή $t = 5 \text{ sec}$ και έχει διάρκεια $t = 0.5 \text{ sec}$. Ταυτόχρονα η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται στη πρώτη περίπτωση από 6m/s στα 16 m/s και στη δεύτερη περίπτωση λειτουργίας από 16m/s στα 6m/s.

5.4.1. Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου από 6m/s στα 16m/s

Στη περίπτωση αυτή θα εξεταστούν οι επιπτώσεις που επιφέρουν στο σύστημα η βύθιση της τάσεως κατά 15% και η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου από τα 6m/s στα 16m/s. Η παραγόμενη ενεργός και άεργος ισχύς παρατίθενται στα σχήματα 5.35 και 5.36, αντίστοιχα. Από τη κυματομορφή της ενεργού ισχύος γίνεται αντιληπτό ότι η βύθιση της τάσης στο δίκτυο των 120kV δεν επιφέρει καμία σημαντική μεταβολή στη λειτουργία του αιολικού πάρκου, ωστόσο για να αντισταθμιστεί γρήγορα το σφάλμα αυτό παρατηρείται παραγωγή άεργου ισχύος όπως αυτό γίνεται εμφανές από το σχήμα 5.36. Μετά τα 20sec όπως μπορούμε να αντιληφθούμε από το σχήμα 5.35 η ενεργός ισχύς που παράγει το αιολικό πάρκο ισούται με την ονομαστική της τιμή, δηλαδή τα 9MW.

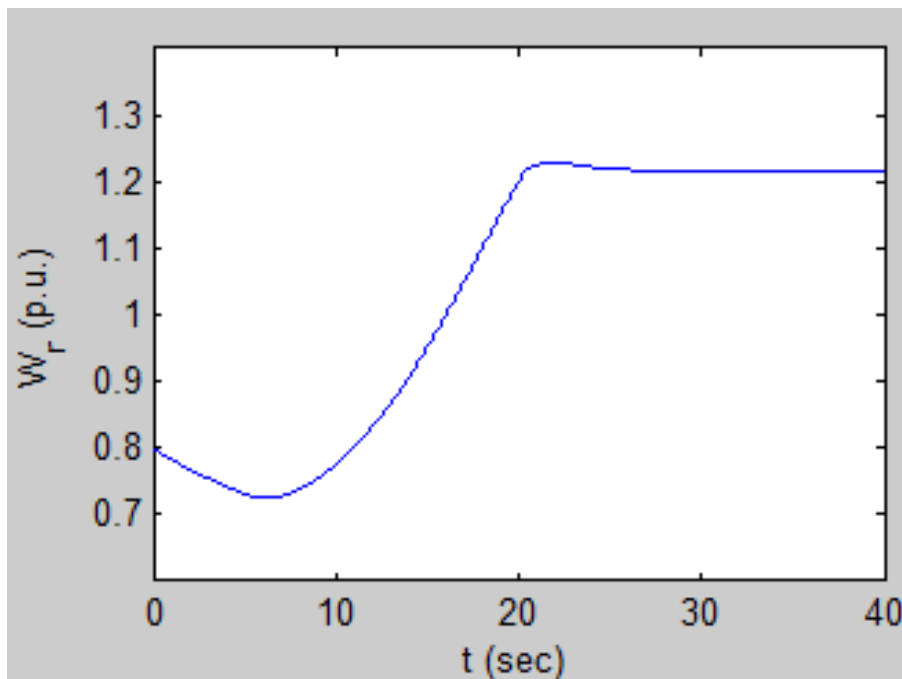


Σχήμα 5.35. Παραγόμενη ενεργός ισχύς

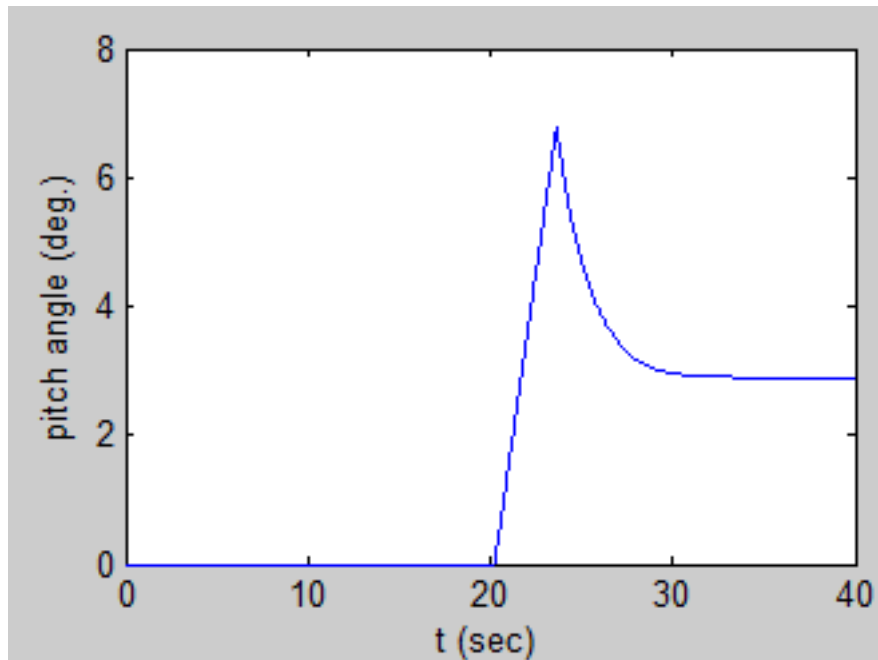


Σχήμα 5.36. Παραγόμενη άεργος ισχύς.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η κυματομορφή της ταχύτητας περιστροφής της τουρμπίνας (σχήμα 5.37.), καθώς και η κυματομορφή της γωνίας βήματος μεταβολής των περυγίων της τουρμπίνας (σχήμα 5.38).

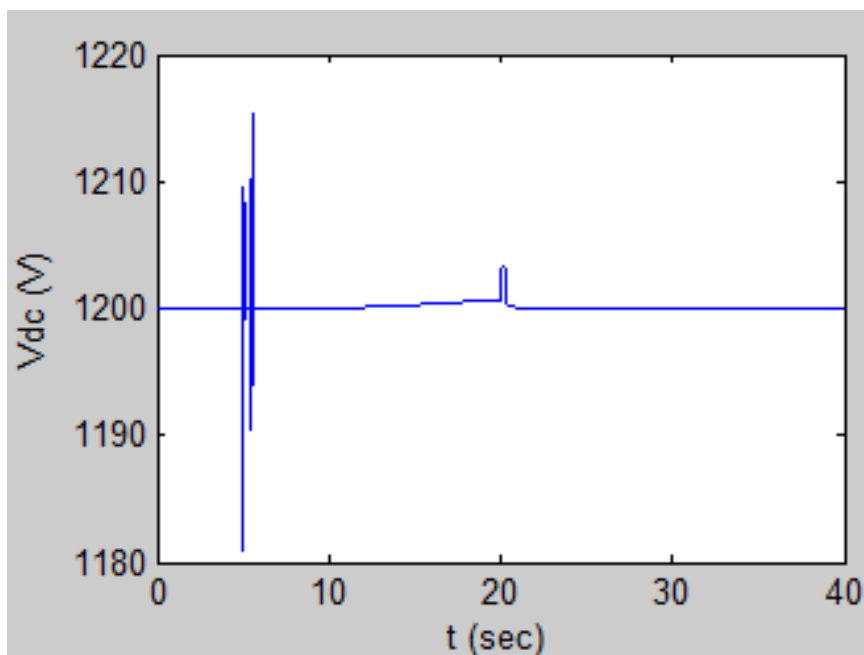


Σχήμα 5.37. Ταχύτητα περιστροφής τουρμπίνας.

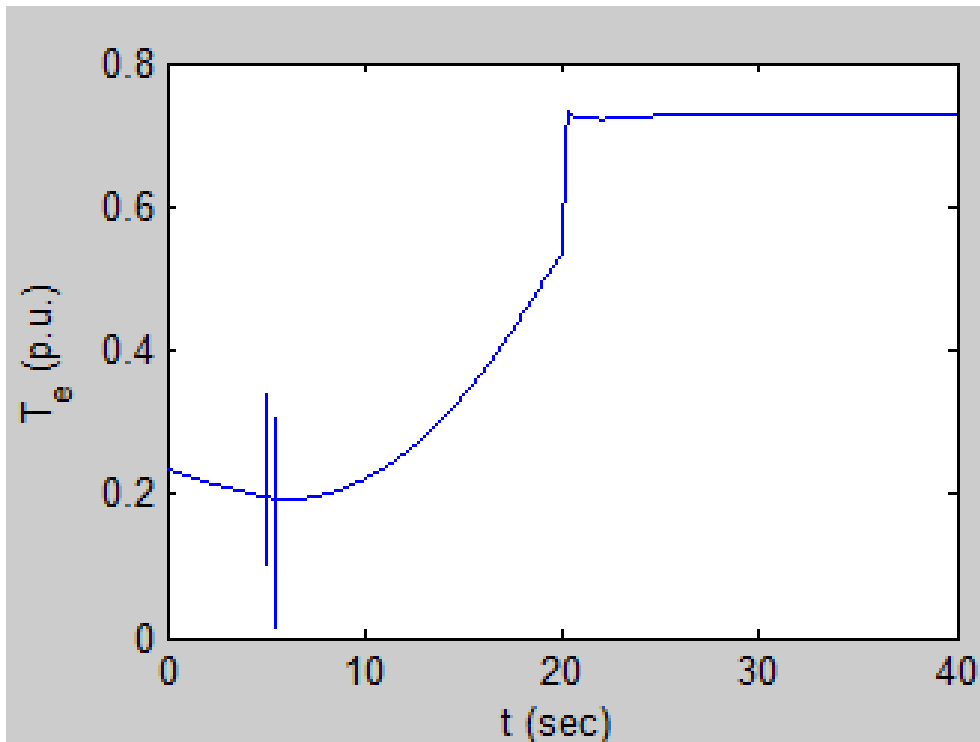


Σχήμα 5.38. Γωνία βήματος περωτών.

Από τα παραπάνω σχήματα 5.37 και 5.38, παρατηρείται ότι η ταχύτητα περιστροφής της τουρμπίνας υπερβαίνει το όριο του 1 α.μ., για το λόγο αυτό ο pitch controller ενεργοποιείται και ρυθμίζει τις μοίρες των περυγίων της τουρμπίνας έτσι ώστε να περιορίσει την ταχύτητα περιστροφής της τουρμπίνας. Κάτι που επιτυγχάνεται με τον περιορισμό της ταχύτητας περιστροφής στη τιμή 1.2 α.μ.. Η τάση της DC-σύνδεσης φαίνεται στο σχήμα 5.39 και η ηλεκτρομαγνητική ροπή στο σχήμα 5.40.



Σχήμα 5.39. Τάση DC-σύνδεσης.

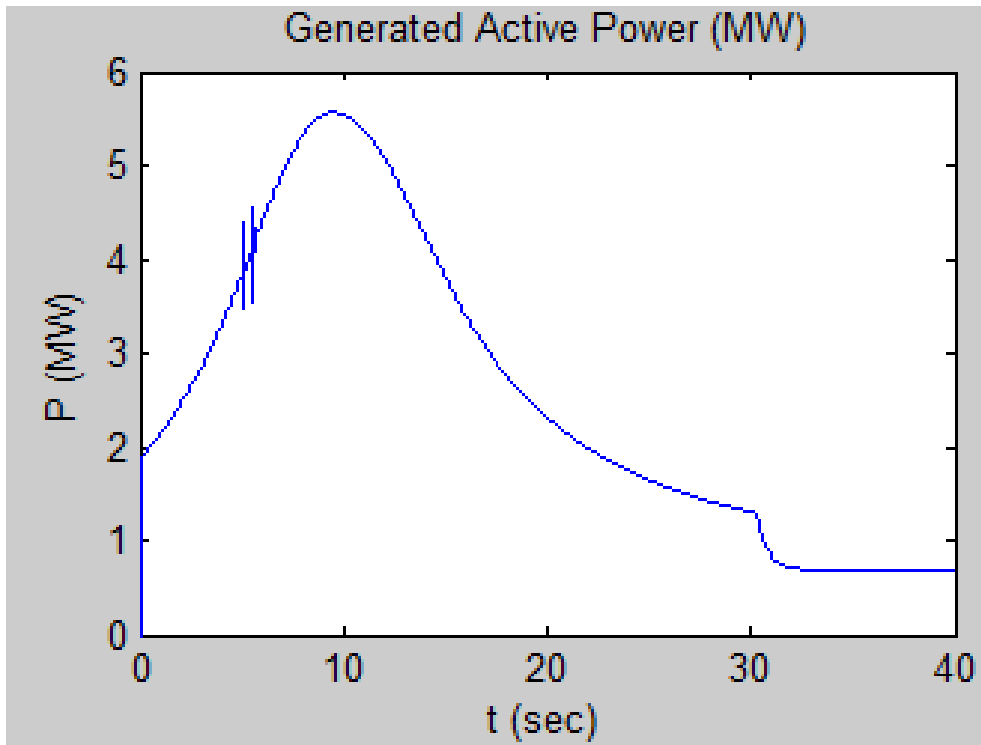


Σχήμα 5.40. Ηλεκτρομαγνητική ροπή.

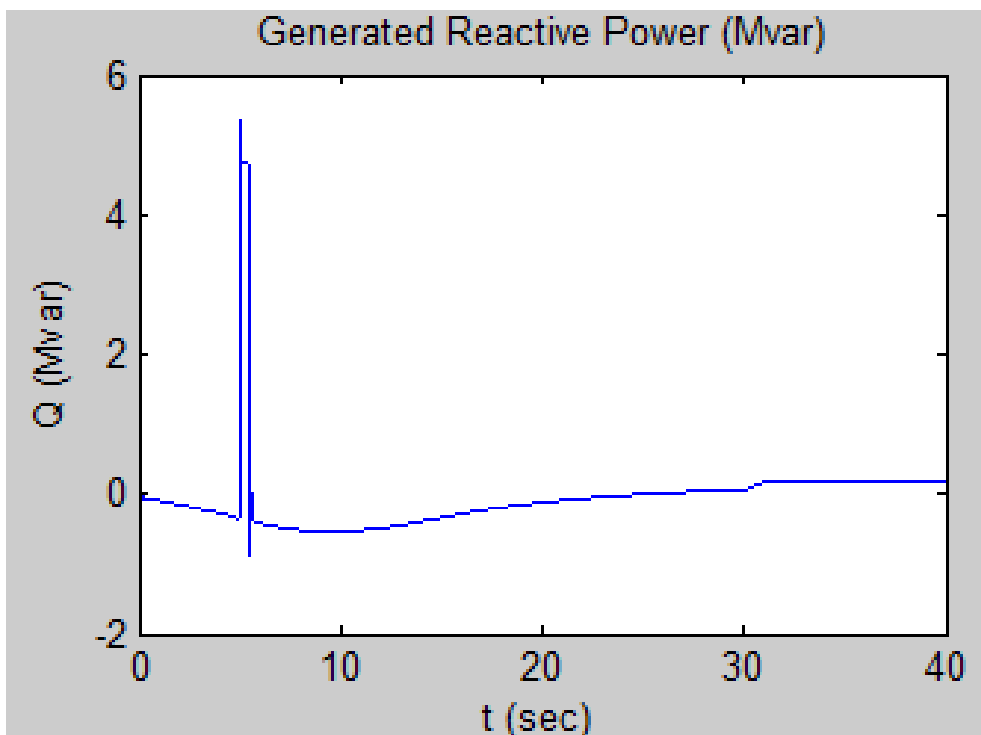
Από τα παραπάνω γίνεται εμφανές ότι δεν έχουμε καμία σοβαρή επίπτωση στο σύστημά μας από τη βύθιση της τάσης στο δίκτυο των 120kV. Όλα τα συστήματα λειτουργούν ομαλά και το αιολικό πάρκο είναι σε θέση να παράγει τη μέγιστη ισχύ του έχοντας ως είσοδο τη μέγιστη δυνατή ταχύτητα ανέμου.

5.4.2. Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου από 16m/s στα 6m/s

Η περίπτωση λειτουργίας αυτή είναι αντίστοιχη με την προηγούμενη περίπτωση λειτουργίας όμως η ταχύτητα του ανέμου μειώνεται από τη τιμή των 16m/s στη τιμή των 6m/s. Συνεπώς, η παραγόμενη ενεργός και άεργος ισχύς είναι παρουσιάζονται στα σχήματα 5.41 και 5.42.



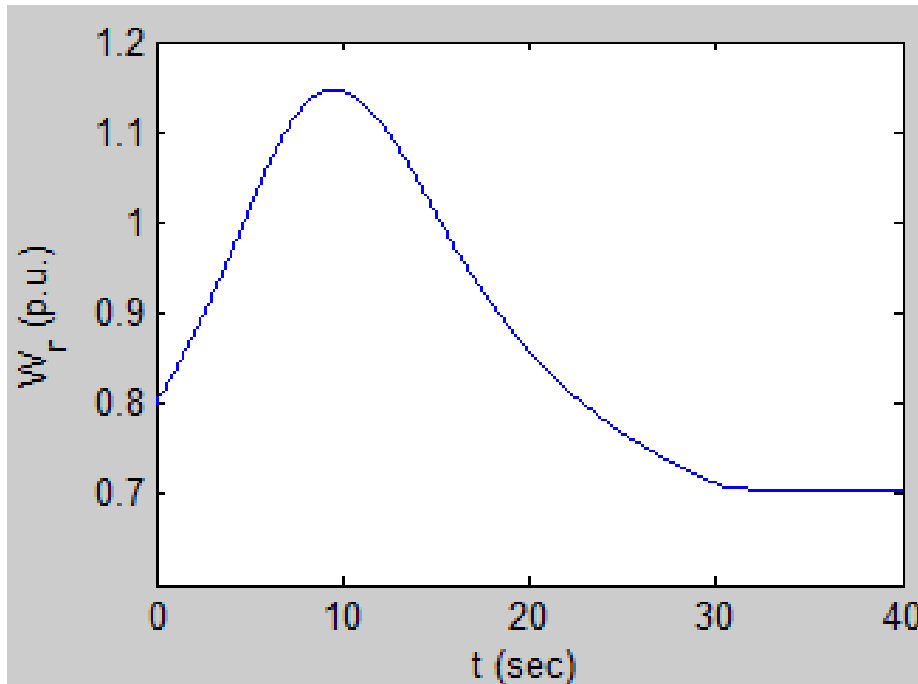
Σχήμα 5.41. Παραγόμενη ενεργός ισχύς.



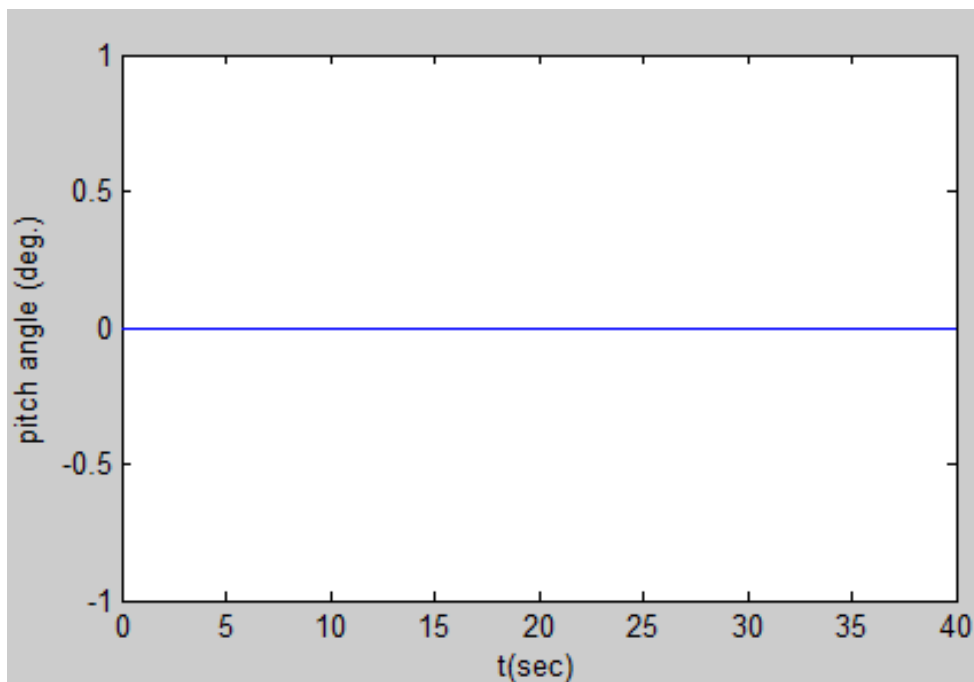
Σχήμα 5.42. Παραγόμενη άεργος ισχύς.

Από τα παραπάνω σχήματα παρατηρούμε ότι η βύθιση της τάσης έχει ως αποτέλεσμα τη παραγωγή άεργου ισχύος για 0.2 sec, ενώ η παραγόμενη ενεργός ισχύς μειώνεται αισθητά

καθώς πλησιάζουμε τη ταχύτητα ένταξης (5m/s) της κάθε ανεμογεννήτριας. Για τη διατήρηση της ευστάθειας του συστήματός μας όταν πλησιάζουμε τη ταχύτητα ένταξης έχουμε ταυτόχρονα παραγωγή αέργου ισχύος, όπως γίνεται εμφανές από το σχήμα 5.42 στο χρονικό διάστημα μεταξύ 32-40 sec. Η ταχύτητα περιστροφής και η γωνία βήματος των πτερυγίων της κάθε ανεμογεννήτριας παρουσιάζονται στα σχήματα 5.43 και 5.44, αντίστοιχα.



Σχήμα 5.43. Ταχύτητα περιστροφής τουρμπίνας.



Σχήμα 5.44. Γωνία βήματος πτερωτών.

Από τα παραπάνω σχήματα παρατηρείται ότι ο pitch controller δεν ενεργοποιείται διότι δεν έχουμε την υπέρβαση του ορίου της ταχύτητας περιστροφής (1 α.μ.) της κάθε ανεμογεννήτριας. Συγκριτικά με τη προηγούμενη περίπτωση λειτουργίας, ο pitch controller δεν ενεργοποιείται για το περιορισμό της ταχύτητας περιστροφής της κάθε ανεμογεννήτριας σε αυτή τη περίπτωση λειτουργίας. Όπως και στη προηγούμενη περίπτωση λειτουργίας, το σύστημά μας λειτουργεί κανονικά χωρίς την ύπαρξη κάποιου σοβαρού σφάλματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε μοντελοποίηση αιολικού πάρκου 9 MW και η μελέτη των μεταβατικών φαινομένων. Η DFIG είναι μία καλή λύση που εφαρμόζεται στα αιολικά συστήματα.

Από τις προσομοιώσεις προκύπτει συμπερασματικά ότι τα συστήματα ελέγχου ανταποκρίνονται στις οποιεσδήποτε μεταβολές της τάσης του συστήματος (είτε θα έχουμε μονοφασικό, είτε διφασικό, είτε τριφασικό σφάλμα). Για το μονοφασικό σφάλμα που προσομοιώθηκε στο κεφάλαιο 5 παρατηρούμε ότι τα συστήματα ελέγχου και προστασίας ανταποκρίνονται στις μεταβολές της τιμής της τάσης και προσπαθούν μέσω της έγχυσης άεργου ισχύος, να συμβάλλουν στη διατήρηση όλων των μεγεθών του αιολικού πάρκου εντός των ονομαστικών τιμών λειτουργίας. Μεγαλύτερη επίδραση από το μονοφασικό βραχυκύκλωμα είχε το διφασικό βραχυκύκλωμα, ωστόσο, όπως παρατηρούμε σημαντική επίδραση στο δίκτυο υπήρξε όταν εφαρμόστηκε τριφασικό βραχυκύκλωμα. Ωστόσο, για τις περιπτώσεις του τριφασικού βραχυκυκλώματος, αυτού που υφίσταται σε απόσταση 20km από το δίκτυο διανομής και αυτού που υφίσταται στο κοινό σημείο σύνδεσης του δικτύου με το αιολικό πάρκο, παρατηρούμε ότι και στις δύο περιπτώσεις λειτουργίας έχουμε δυσμενής συνθήκες λειτουργίας γιατί έχουμε απώλεια ενεργού ισχύος, κάτι μη επιθυμητό. Δυσμενότερη περίπτωση για το σύστημα από τις δύο περιπτώσεις του τριφασικού σφάλματος που παρατέθηκε αποτελεί η δεύτερη περίπτωση λειτουργίας, αυτή που υφίσταται στο κοινό σημείο σύνδεσης του δικτύου με το αιολικό πάρκο. Παράλληλα γίνεται αντιληπτή η λειτουργία του ελεγκτή της DC τάσης (V_{DC}) ως προς την έγχυση στο δίκτυο άεργου, συμβάλλοντας στη διατήρηση του συντελεστή ισχύος εντός των επιθυμητών ορίων.

Από τα αποτελέσματα που παρατέθηκαν παραπάνω συμπεραίνεται επίσης ότι τα σφάλματα που συμβαίνουν κοντά στο αιολικό πάρκο, πιο συγκεκριμένα στο κοινό σημείο σύνδεσης, δεν επιφέρουν την αποσύνδεση του αιολικού πάρκου από το δίκτυο, όταν έχουν μικρή διάρκεια εφαρμογής. Στη περίπτωση που έχουμε σφάλματα μεγάλης διάρκειας (πάνω του μισού λεπτού) που επιδρούν σε μία ή σε πολλές φάσεις του δικτύου είναι ικανά να προκαλέσουν την αποσύνδεση του αιολικού πάρκου από το δίκτυο. Σημαντικότερες αρνητικές επιδράσεις στο αιολικό πάρκο επιφέρουν τα τριφασικά σφάλματα κοντά στο κοινό σημείο σύνδεσης, τα οποία οδηγούσαν σε μη ορθή λειτουργία του πάρκου καθώς παρατηρήθηκε απώλεια ενεργού ισχύος. Σε κάθε είδους βραχυκυκλώματος μεταξύ των τριών φάσεων γίνεται αντιληπτή η προσπάθεια διατήρησης των τιμών στις ονομαστικές, καθώς και η παραγωγή άεργου ισχύος. Στην περίπτωση που τα σφάλματά είχαν μεγαλύτερο χρόνο

διάρκειας, τότε θα είχαμε εντονότερο το φαινόμενο υπέρβασης της ταχύτητας περιστροφής της ανεμογεννήτριας του ορίου του 1 α.μ..

Σε αυτή τη περίπτωση λειτουργίας θα είχαμε τη λειτουργία του pitch controller για τη ρύθμιση της γωνίας των πτερυγίων με στόχο το περιορισμό της ταχύτητας περιστροφής της ανεμογεννήτριας. Ο pitch controller περιορίζει την ταχύτητα περιστροφής της τουρμπίνας καθώς και την τιμή της ισχύς εξόδου, ταυτόχρονα.

Στη περίπτωση που μελετάται η βύθιση τάσεως στο δίκτυο διανομής μαζί με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου από 6 m/s στα 16 μ/s, οι επιπτώσεις αυτών των επιδράσεων στο συνολικό σύστημά δεν είναι σημαντικές, ενώ τα συστήματα προστασίας και ελέγχου της ανεμογεννήτριας ανταποκρίνονται απολύτως, διατηρώντας εντός λειτουργίας το αιολικό πάρκο.

Τελικώς, συγκρίνοντας την περίπτωση απότομης αύξησης της ταχύτητας του ανέμου με αυτήν της απότομης μείωσης παρατηρούμε ότι στη δεύτερη έχουμε παραγωγή ενεργού ισχύος μικρότερης από αυτή της πρώτης και έγχυση άεργου ισχύος. Ωστόσο, οι δυο αυτές περιπτώσεις σφάλματος δεν οδηγούν σε αποσύνδεση του αιολικού πάρκου από το δίκτυο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Οδηγία 2001/77/ΕΚ. Για την προαγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές στην εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας (<http://www.cea.org.cy/Legislaion/9-1-1%20Ananewsimes%20Piges%20Energeias/%CE%95%CF%85%CF%81%CF%89%CF%80%CE%B1%CE%B9%CE%BA%CE%AD%CF%82%20%CE%9F%CE%B4%CE%B7%CE%B3%CE%AF%CE%B5%CF%82/%CE%9F%CE%B4%CE%B7%CE%B3%CE%AF%CE%B1%202001-77-EK.pdf>)
- [2] J. G. Stead, W.E. Stead 2009. Management for a small planed 3rd edition, Armonk, NY: M.E.Sharpe
- [3] Ottmar Edenhofer, Ramón Pichs-Madruga, Youba Sokona. Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. 2012. Intergovernmental Panel on Climate Change
- [4] [What are “Renewable Resources”?](#), by A. John Armstrong, Esq. & Dr. Jan Hamrin, Chapter 1, The Renewable Energy Policy Manual, Organization of American States, undated. Retrieved 2013-01-05.
- [5] Energy 2020. A strategy for competitive, sustainable and secure energy. {SEC(2010) 1346} (<https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy-and-energy-union/2020-energy-strategy>)
- [6] ΠΑΕ. Έκθεση της ΠΑΕ: Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. 2003, Αθήνα
- [7] Dorf R., Energy, Resources & Policy, Addison-Wesley Publ. Comp., 1978
- [8] Χριστοφής Κορωνάιος, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Διδακτικές Σημειώσεις, ΕΜΠ, Δ.Δ.Π.Μ.Σ. «Περιβάλλον και ανάπτυξη», 2012
- [9] Iván Pineda and Pierre Tardieu. Wind in power: 2016 European statistics 2017 (<https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Statistics-2016.pdf>)
- [10] ΚΑΠΕ, 2005. http://www.cres.gr/kape/education/web_dynitikoι%20xristes.pdf
- [11] HWEA Wind Energy Statistics – 2016, ΕΛΕΤΑΕΝ (http://eletaen.gr/wp-content/uploads/2017/01/2016_-HWEA_Statistics_Greece1.pdf)
- [12] Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, Δεκαετές Πρόγραμμα Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς 2014-2023, Δεκέμβριος 2012 (http://www.admie.gr/fileadmin/groups/EDAS_DSS/MASM/DPA_2017-2026_Final/DPA_2017-2026.pdf)

- [13] Εύα Παρασκευαδάκη, Τεχνολογίες φωτοβολταϊκών πλατφόρμας, Electroepistimi, 2009
- [14] Gonzalo Abad, Jesus Lopez, Miguel Rodriguez, Luis Marroyo, Grzegorz Iwanski. Doubly fed induction machine: modeling and control for wind energy generation, volume 85. John Wiley & Sons, 2011. (Book)
- [15] Ciang, Chia Chen, Jung-Ryul Lee and Hyung-Joon Bang. "Structural health monitoring for a wind turbine system: a review of damage detection methods." Measurement Science and Technology 19.12 2008: 122001.
- [16] R.Uma Maheswari, J. Tamilvendhan. Analysis of modelling of active stall controlled and active pitch controlled variable speed wind turbines. 2012: vol 2, is. 4, pp. 2662-2667
- [17] [https://www.mathworks.com/examples/simpower/mw/sps_product-power_wind_dfig_det-wind-farm-dfig-detailed-model](https://www.mathworks.com/examples/simpower/mw/sps_product_power_wind_dfig_det-wind-farm-dfig-detailed-model)
- [18] H. Polinder, M.R. Dubois and J.G. Slootweg: Generator systems for wind turbines, PCIM 2003, Nuremberg, Germany, 20-22 May
- [19] Blaabjerg, F & Iov, Florin & Kerekes, Tamas & Teodorescu, R. 2010. Trends in power electronics and control of renewable energy systems. Proceedings of EPE-PEMC 14th International Power Electronics and Motion Control Conference. K-1
- [20] Slootweg, J.G. Wind Power: Modelling and Impact on Power System Dynamics. 2003. Ridderprint Offsetdrukkerij B.V, Netherlands
- [21] Morren Johan and Sjoerd WH De Haan. Ride-through of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip. IEEE Transactions on energy conversion 20.2 2005: 435-441.
- [22] Bollen Math HJ. Understanding power quality problems. Piscataway, USA: IEEE 2000
- [23] Marques G.D & Sousa D.M, Analysis of the DFIG During Voltage Dips, Conference paper, 2011
- [24] Wang Aimeng, Siwan Shu, and Shuhui Dong. Transient analysis of DFIG-based WECS under three-phase voltage dips via coupled simulation. Industrial Electronics Society, IECON 2015-41st Annual Conference of the IEEE. IEEE, 2015.
- [25] Lopez Jesus, et al. Dynamic behavior of the doubly fed induction generator during three-phase voltage dips. IEEE Transactions on Energy conversion 22.3 (2007): 709-717.
- [26] Yang, Jin, John E. Fletcher, and John O'Reilly. A series-dynamic-resistor-based converter protection scheme for doubly-fed induction generator during various fault conditions. IEEE Transactions on Energy Conversion 25.2 (2010): 422-432.

- [27] Lopez Jesus, et al. Wind turbines based on doubly fed induction generator under asymmetrical voltage dips." IEEE Transactions on Energy conversion 23.1 (2008): 321-330.
- [28] Kundur, Prabha, Neal J. Balu, and Mark G. Lauby. Power system stability and control. New York: McGraw-hill, 1994.
- [29] Α.Θ. Αλεξανδρίδης, Τεχνολογίες Ελέγχου στα Αιολικά Συστήματα, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2013.
- [30] Σ. Παπαθανασίου Μ. Τσίλη. Τεχνικές απαιτήσεις για τη σύνδεση αιολικών σταθμών στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας – επισκόπηση κωδικών άλλων χωρών και διαθέσιμων τεχνολογιών ανεμογεννητριών. Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ), 2006.
- [31] Sourkounis Constantinos, and Pavlos Tourou. "Grid code requirements for wind power integration in europe." Conference Papers in Science. Vol. 2013. Hindawi Publishing Corporation, 2013.,
- [32] R.H. Park Two Reaction Theory of Synchronous Machines AIEE Transactions 48:716-730 (1929) in IEEE Task Force, "Current usage and suggested practices in power system stability simulations for synchronous machines", IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. EC-1, No. 1, 1986, pp. 77-93
- [33] Mishra Nidhish G., and A. A. Shaikh. Simulation of active and reactive power control of DFIG. American Journal of Engineering Research (AJER) 3.4 (2014): 76-83.
- [34] Jamal A. Baroudi and Venkata Dinavahi and Andrew M. Knight. A review of power converter topologies for wind generators. Renewable Energy, 32(14):2369-2385, nov 2007
- [35] F.E.V. Taveiros and L.S. Barros and F.B. Costa. Back-to-back converter state-feedback control of DFIG (doubly-fed induction generator)-based wind turbines. Energy, 89:896-906, sep 2015.
- [36] Saleh Elkelani Babaa, Matthew Armstrong, Volker Pickert. Overview of Maximum Power Point Tracking Control Methods for PV Systems. Journal of Power and Energy Engineering , 2014, 2, 59-72
- [37] Paul C Krause, Oleg Wasynczuk & ScottD.Sudhoff "Analysis of Electric machinery And Drive Systems" S cond Edition, IEEE Power Engineering Society Sponsor, A.John Wiley & Sons, INC. Publication
- [38] <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/windturbinedoublyfedi nductiongeneratorphasortype.html>