



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

ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΔΙΠΛΗΣ
ΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ ΓΙΑ ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΣΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΕ
ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αναστάσιος Ι. Παγώνης

Επιβλέπουσα : Μαρία-Παρασκευή Ιωαννίδου

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2018



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

ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΔΙΠΛΗΣ
ΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ ΓΙΑ ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΣΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΕ
ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αναστάσιος Ι. Παγώνης

Επιβλέπων : Μαρία-Παρασκευή Ιωαννίδου

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την Ιουνίου 2018.

.....

Μαρία-Παρασκευή Ιωαννίδου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....

Νικόλαος Θεοδώρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Παναγιώτης Τσαραμπάρης
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2018

.....

Αναστάσιος Ι. Παγώνης

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

Copyright © Αναστάσιος Ι. Παγώνης, 2018.

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.

Περίληψη

Η αύξηση της διείσδυσης των αιολικών συστημάτων στην αγορά της ενέργειας έχει οδηγήσει στην απαίτηση οι μονάδες παραγωγής ενέργειας από τον άνεμο να συμβάλλουν στη σταθερότητα και διαχείριση του δικτύου μεταφοράς ενέργειας, όπως και οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής. Η απαίτηση αυτή, μέρος της οποίας είναι η αυξημένη ανοχή των ανεμογεννητριών στις αναταραχές του δικτύου, αποτελεί πρόκληση για τις ασύγχρονες γεννήτριες διπλής τροφοδότησης, των οποίων ο στάτης συνδέεται απευθείας με το δίκτυο μεταφοράς.

Στην παρούσα εργασία, παρουσιάζεται αρχικά η διάταξη της ασύγχρονης γεννήτριας διπλής τροφοδότησης. Έπειτα, αναλύεται το σύστημα ελέγχου της μηχανής και η λειτουργία της στη μόνιμη κατάσταση. Αφού γίνει κατανοητό το μοντέλο της μηχανής, παρουσιάζονται και εξετάζονται, μέσω προσομοιώσεων, τρεις ενεργές μέθοδοι ελέγχου της μηχανής σε περιπτώσεις βύθισης της τάσης λόγω σφαλμάτων του δικτύου, με σκοπό την παραμονή της γεννήτριας σε λειτουργία μέχρι την εκκαθάριση του σφάλματος από το δίκτυο.

Λέξεις-Κλειδιά

Ασύγχρονη μηχανή διπλής τροφοδότησης, γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης, ΓΕΔΤ, παραμονή σε λειτουργία υπό βύθιση τάσης, μέθοδοι ελέγχου ΓΕΔΤ

Abstract

The ongoing rise in the use of wind power systems in the energy market, has created the demand that large wind power plants must contribute to the management and stability of the energy transfer network, as much as the conventional power plants. The aforementioned demand, part of which is the wind turbines' bearing of grid disturbances, constitutes a challenge for double-fed induction generators, whose stator is directly connected to the grid.

In the present theses, the model of a double-fed induction machine is being described. An analysis of the machines control scheme is then presented. After the model and its operation under normal conditions have been clarified, three active control methods will be presented, and examined through simulations, for the machine's capability of low voltage ride-through to be established.

Keywords

Doubly fed induction generator, DFIG, low voltage ride through, LVRT, control methods for DFIG, crowbar, rotor demagnetization, feed-forward transient current control, FFTCC

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά την οικογένειά μου για την ανελλιπή στήριξή της, όχι μόνο κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αλλά και κατά το σύνολο των φοιτητικών μου χρόνων.

Ευχαριστώ, επίσης, την καθηγήτρια Ε.Μ.Π. κ. Μαρία Ιωαννίδου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου την παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς και για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή της κατά τη συνεργασία μας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα οικεία μου πρόσωπα, που στάθηκαν άξιοι συνοδοιπόροι στο ανεξάντλητο ταξίδι της γνώσης.

Στα χρόνια που φεύγουν
Στα χρόνια που έρχονται

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	5
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	12
Κεφάλαιο 2 Γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης.	15
2.1 Ασύγχρονη ηλεκτρική μηχανή	17
2.2 Μετατροπέας AC/DC/AC (back-to-back converter).....	30
2.2.1 Αντιστροφέας πηγής τάσης.....	32
2.2.2 Τριφασική ανορθωτική γέφυρα.....	35
2.2.3 Φίλτρο μεταξύ του μετατροπέα πλευράς δικτύου και του δικτύου	36
2.3 Απώλειες Μαγνήτισης	37
2.4 Αεροδυναμικό μοντέλο ανεμογεννήτριας.....	38
Κεφάλαιο 3 Σύστημα ελέγχου	43
3.1 Έλεγχος μηχανικού μέρους ανεμογεννήτριας.....	44
3.1.1 Ελεγκτής βήματος γωνίας πτερυγίων	48
3.1.2 Περιοχές λειτουργίας της α/γ και χαρακτηριστικές καμπύλες μεγεθών ..	49
3.2 Έλεγχος μετατροπέων	55
3.2.1 Έλεγχος μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα.....	55
3.2.2 Έλεγχος μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου	60
Κεφάλαιο 4 Μέθοδοι Ελέγχου σε μεταβατική λειτουργία	66
4.1 Απαιτήσεις διαχειριστών δικτύου	67
4.2 Χρήση κυκλώματος προστασίας και απομαγνήτιση δρομέα.....	70
4.2.1 Περιγραφή εξεταζόμενης μεθόδου	70
4.2.2 Εξεταζόμενο σύστημα ελέγχου	72
4.2.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης	75
4.3 Μετατροπή της υπερβάλλουσας ενέργειας σε κινητική.....	80
4.2.1 Περιγραφή εξεταζόμενης μεθόδου	80
4.2.2 Εξεταζόμενο σύστημα ελέγχου	80
4.2.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης	83
4.4 Τροφοδότηση σήματος μεταβατικών ρευμάτων σε μετατροπέα.....	96
4.4.1 Περιγραφή εξεταζόμενης μεθόδου	96
4.4.2 Εξεταζόμενο σύστημα ελέγχου	96

4.4.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	101
Συμπεράσματα.....	107
Βιβλιογραφία	109

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Η ασύγχρονη μηχανή διπλής τροφοδότησης, είναι μία ηλεκτρική μηχανή επαγωγής, τυλιγμένου δρομέα, της οποίας τα τυλίγματα του στάτη αλλά και τα τυλίγματα του δρομέα συνδέονται σε εξωτερικό της μηχανής εξοπλισμό. Η διάταξη αυτή επιτρέπει τη λειτουργία της μηχανής σε ένα εύρος ταχυτήτων, εφόσον τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα τροφοδοτούνται με μεγέθη κατάλληλης συχνότητας.

Ιστορικά, η μηχανή επαγωγής διπλής τροφοδότησης προέρχεται από την ανακάλυψη του πολυφασικού κινητήρα επαγωγής τυλιγμένου δρομέα. Στον κινητήρα αυτό, τα τυλίγματα του δρομέα συνδέονται μέσω δακτυλίων σε εξωτερικές αντιστάσεις ώστε να βοηθήσουν στην εκκίνηση της μηχανής. Καθώς όμως η χρήση των εξωτερικών αντιστάσεων οδηγεί σε απώλειες ισχύος, οι προσπάθειες αύξησης της απόδοσης της μηχανής αποτέλεσαν την αφορμή ώστε να αναπτυχθούν μέθοδοι ανάκτησης των παραπάνω απωλειών.

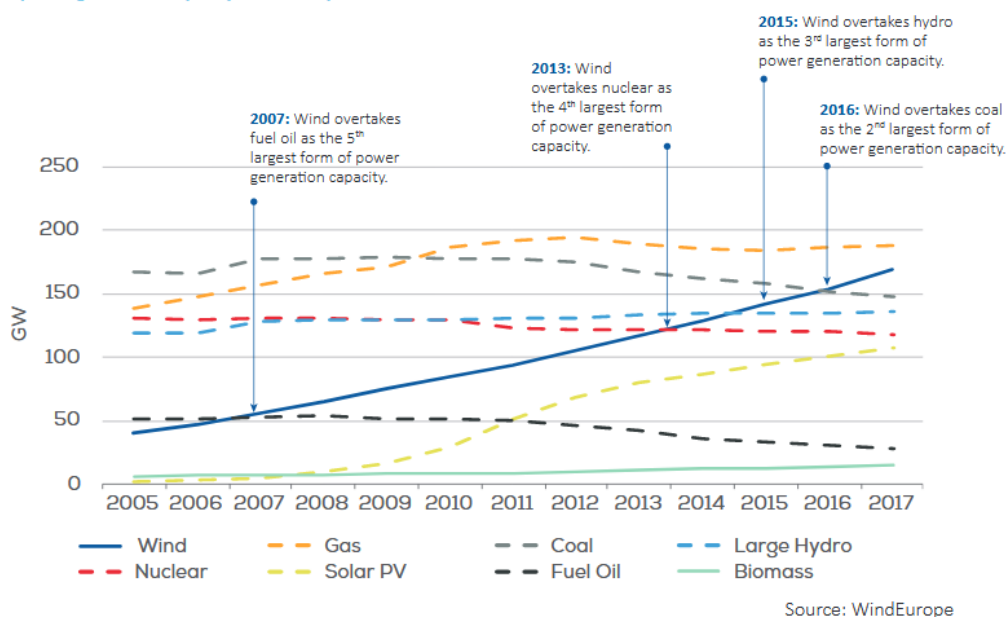
Αρχικά, έγιναν προσπάθειες ανάκτησης της χαμένης ισχύος με τη χρήση επιπλέον μηχανών AC ή DC (π.χ. Kraemer drives, Scherbius drives), οι οποίες συνδέονταν στον άξονα της μηχανής επαγωγής τυλιγμένου δρομέα ώστε να ανακτηθούν οι απώλειες ολίσθησης. Έπειτα, ξεκίνησε η χρήση ανορθωτή στην πλευρά του δρομέα (static Scherbius drive) η οποία μείωσε σημαντικά τον όγκο και το κόστος της διάταξης, αλλά η έλλειψη ελέγχου του ανορθωτή επέτρεπε τη ροή της ισχύος μόνο προς την κατεύθυνση εξόδου από το δρομέα. Στη διάταξη αυτή, μόνο υποσύγχρονη λειτουργία της μηχανής ως κινητήρα ήταν δυνατή. Στη συνέχεια, η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος εισήγαγε τη χρήση των ελεγχόμενων μετατροπέων, οι οποίοι και χρησιμοποιούνται σήμερα για τη σύνδεση του δρομέα της μηχανής στο δίκτυο και τη ρύθμιση της συχνότητας των ρευμάτων και των τάσεων στο δρομέα, επιτρέποντας τη λειτουργία της μηχανής τόσο σε υπερσύγχρονες όσο και σε υποσύγχρονες ταχύτητες.

Η δυνατότητα ρύθμισης της συχνότητας στο τύλιγμα του δρομέα καθιστά την ασύγχρονη μηχανή διπλής τροφοδότησης, ηλεκτρική μηχανή μεταβλητής ταχύτητας. Επιπλέον, καθώς οι μετατροπείς συνδέονται στο κύκλωμα του δρομέα δε χρειάζεται παρά να χειριστούν μόνο ένα κλάσμα της συνολικής ισχύος της μηχανής, το οποίο επιτρέπει τη μείωση του μεγέθους και του κόστους του. Οι παραπάνω λόγοι συνέβαλαν στη διευρυνόμενη χρήση της ασύγχρονης γεννήτριας διπλής τροφοδότησης στην αιολική παραγωγή, ιδιαίτερα σε ανεμογεννήτριες μεγάλης ισχύος.

Τα τελευταία χρόνια, η προώθηση των ανανεώσιμων πηγών λόγω της κλιματικής αλλαγής, αλλά και οι νέες τεχνολογίες που κατέστησαν την αιολική

παραγωγή ως μία βιώσιμη εναλλακτική μορφή παραγωγής ενέργειας, ανταγωνιστική έναντι των συμβατικών μορφών παραγωγής, οδήγησαν στην εγκατάσταση μεγάλου αριθμού αιολικών πάρκων. Χαρακτηριστική είναι διείσδυση της αιολικής ενέργειας στη γηραιά ήπειρο, όπου το 2016 η εγκατεστημένη ισχύς αιολικής παραγωγής ξεπέρασε την εγκατεστημένη ισχύ παραγωγής από άνθρακα, τη δεύτερη σε μέγεθος πηγή εγκατεστημένης παραγωγής ενέργειας.

Total power generation capacity in the European Union 2005-2017



Εικόνα 1.1 – Διάγραμμα εγκατεστημένης παραγωγής ισχύος στην Ευρώπη ανά πηγή ενέργειας.

Η διείσδυση της αιολικής ενέργειας στην παραγωγή, παρότι ευχάριστη από περιβαλλοντικής σκοπιάς, εισάγει νέες προκλήσεις στη διαχείριση του δικτύου ενέργειας. Η σημαντική αύξηση της εγκατεστημένης αιολικής ισχύος είχε ως συνέπεια την αλλαγή των κανονισμών της σύνδεσης στο δίκτυο μεταφοράς ενέργειας, ώστε τα μεγάλα αιολικά πάρκα να υποχρεούνται να συμβάλλουν στη διαχείριση του δικτύου.

Μία από τις υποχρεώσεις που εισήχθη, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, είναι η απαίτηση τα αιολικά πάρκα να παραμένουν συνδεδεμένα στο δίκτυο σε περιπτώσεις σφάλματος, για χρονικό διάστημα που καλύπτει την αυτόματη εκκαθάριση των σφαλμάτων από το δίκτυο, ώστε με αυτό τον τρόπο να συμβάλουν στη σταθερότητα του δικτύου. Η υποχρέωση αυτή αποτελεί πρόκληση για τις ανεμογεννήτριες επαγωγής διπλής τροφοδότησης, καθώς η απευθείας σύνδεση του στάτη με το δίκτυο τις καθιστά ευάλωτες σε διαταραχές του δικτύου. Συνεπώς, και λόγω του σημαντικού ποσοστού που καταλαμβάνουν στην αιολική παραγωγή οι ασύγχρονες γεννήτριες διπλής τροφοδότησης, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται ανάπτυξη της έρευνας

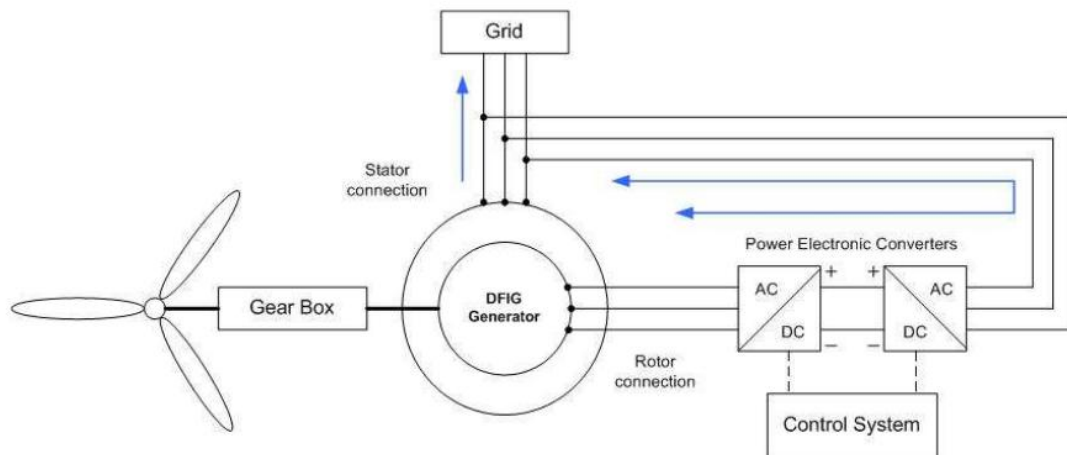
μεθόδων ελέγχου και προστασίας των συγκεκριμένων διατάξεων, με σκοπό την παραμονή τους σε λειτουργία κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στο συνδεδεμένο δίκτυο.

Στην παρούσα εργασία, αφού παρουσιαστούν το μοντέλο και η λειτουργία της ασύγχρονης μηχανής διπλής τροφοδότησης σε μία σύγχρονη διάταξη ανεμογεννήτριας, θα εξεταστούν ενεργές μέθοδοι ελέγχου της μηχανής κατά τη διάρκεια πτώσης τάσεως στο δίκτυο, και θα διερευνηθεί η αποτελεσματικότητά τους ως προς την παραμονή της ανεμογεννήτριας σε λειτουργία σύμφωνα με τους περιορισμούς δικτύων μεταφοράς ενέργειας ανεπτυγμένων κρατών.

Κεφάλαιο 2 Γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης.

Η γεννήτρια είναι μία στρεφόμενη ηλεκτρική μηχανή που μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Υπάρχουν δύο κύρια είδη ηλεκτρικών μηχανών, οι σύγχρονες και οι ασύγχρονες μηχανές. Οι σύγχρονες μηχανές λειτουργούν στη σύγχρονη ταχύτητα του δικτύου όπου συνδέονται. Οι ασύγχρονες μηχανές ή μηχανές επαγωγής λειτουργούν σε ταχύτητες μικρότερες ή μεγαλύτερες της ταχύτητας του δικτύου. Οι ασύγχρονες μηχανές, τις οποίες θα εξετάσουμε στην παρούσα εργασία, για να συμπεριφερθούν ως γεννήτριες πρέπει να στρέφονται σε ταχύτητες μεγαλύτερες της σύγχρονης ταχύτητας του δικτύου. Οι ασύγχρονες γεννήτριες διπλής τροφοδότησης έχουν την ίδια δομή με της συμβατικές γεννήτριες επαγωγής τυλιγμένου δρομέα, με τη διαφορά ότι στα τυλίγματα του δρομέα προστίθενται εξωτερικά κυκλώματα ηλεκτρονικών ισχύος.

Τα κύρια μέρη μίας γεννήτριας για την εκμετάλλευση αιολικής ενέργειας είναι ο δρομέας της ανεμογεννήτριας, οποίος κινείται από τον άνεμο, το κιβώτιο ταχυτήτων, η γεννήτρια και το σύστημα ελέγχου. Με την πρόοδο της τεχνολογίας των αιολικών συστημάτων το μέγεθος των ανεμογεννητριών μεγάλωσε ώστε να μπορούν να επιτύχουν μεγαλύτερη παραγωγή ισχύος. Αυτό απαιτεί μεγαλύτερα πτερύγια ώστε να δύναται να απορροφηθεί περισσότερη ισχύς από τον άνεμο. Καθώς τα πτερύγια επιμηκύνονται, ο δρομέας της ανεμογεννήτριας πρέπει να λειτουργεί σε μικρότερη ταχύτητα περιστροφής ώστε τα άκρα των πτερυγίων να μην υπερβαίνουν την ταχύτητα του ήχου και να προστατεύονται από μηχανικές καταπονήσεις. Όμως, η λειτουργία των γεννητριών απαιτεί αρκετά μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής, οπότε μεταξύ του δρομέα της ανεμογεννήτριας και του δρομέα της ηλεκτρικής μηχανής παρεμβάλλεται κιβώτιο ταχυτήτων που αυξάνει τη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα.



Εικόνα 2.1 – Διάγραμμα Γεννήτριας Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης

Στις ανεμογεννήτριες με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης (ΓΕΔΤ) η ηλεκτρική μηχανή είναι μία ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα. Το κύκλωμα του δρομέα είναι προσβάσιμο μέσω δακτυλίων, έτσι σε αντίθεση με τις γεννήτριες κλωβού όπου η μαγνήτιση της μηχανής επιτυγχάνεται μόνο από την πλευρά του στάτη, στις ΓΕΔΤ τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα μαγνητίζονται ανεξάρτητα. Τα τριφασικά τυλίγματα του δρομέα συνδέονται στο δίκτυο. Τα τυλίγματα του δρομέα τροφοδοτούνται από έναν AC-DC-AC μετατροπέα ο οποίος συνδέεται στο δίκτυο και παρέχει στο κύκλωμα του δρομέα τις επιθυμητές τριφασικές τάσεις και συχνότητες. Η σύνδεση ηλεκτρονικών ισχύος στο κύκλωμα του δρομέα επιτρέπει την αποδοτικότερη απορρόφηση ενέργειας από τον άνεμο σε σχέση με άλλου τύπου ανεμογεννήτριες. Καθώς μόνο ένα μέρος της ισχύος της γεννήτριας διέρχεται από το κύκλωμα του δρομέα, η ονομαστική ισχύς του μετατροπέα μπορεί να περιοριστεί σε ένα ποσοστό της ισχύος της γεννήτριας (συνήθως 20-30%).

Για να εξαχθεί η μέγιστη δυνατή ισχύς από τον άνεμο, χρησιμοποιείται ένα σύστημα ελέγχου για τη ρύθμιση των συχνοτήτων του δρομέα, και κατ' επέκταση των τάσεων και των ρευμάτων στα τυλίγματα. Ο κύριος τύπος ελέγχου που χρησιμοποιείται είναι ο διανυσματικός έλεγχος, καθώς επιτρέπει την αποσύνδεση των συνιστωσών ρεύματος του ευθύ και εγκάρσιου άξονα. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ανεξαρτησία μεταξύ του ελέγχου της ενεργού και αέργου ισχύος.

Οι ΓΕΔΤ είναι πιο σύνθετες και συνήθως πιο ακριβές από αντίστοιχες γεννήτριες τύπου κλωβού ή γεννήτριες τυλιγμένου δρομέα με αντιστάσεις, αλλά παρουσιάζουν μία σειρά από πλεονεκτήματα:

- Δυνατότητα ανεξαρτησίας ελέγχου ενεργού και αέργου ισχύος

- Εύρος ταχυτήτων λειτουργίας έως και 30% πάνω ή κάτω από την ονομαστική ταχύτητα της γεννήτριας, κατά το επιτυγχάνεται λειτουργία χωρίς σημαντικές απώλειες ολισθήσεως.
- Μεγιστοποίηση της απόδοσης της γεννήτριας (βέλτιστη απορρόφηση ισχύος από τον άνεμο)
- Βελτιωμένη επίδοση παραμονής σε σύνδεση υπό σφάλματα δικτύου
- Μείωση μηχανικών καταπονήσεων

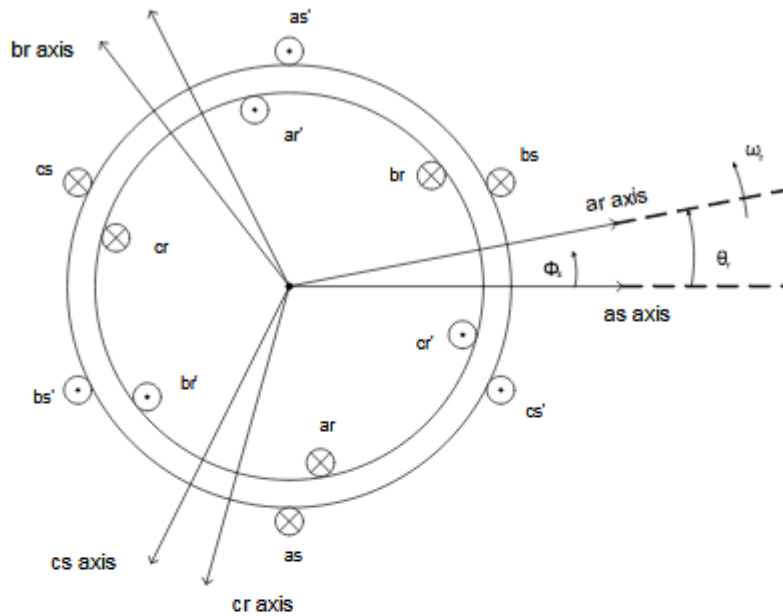
Επιπλέον οι ΓΕΔΤ έχουν κάποια πλεονεκτήματα έναντι γεννητριών που συνδέονται στο δίκτυο μέσω μετατροπέα AC-DC-AC από την πλευρά του στάτη.

- Μικρότερο κόστος, καθώς η ονομαστική ισχύς του μετατροπέα μπορεί να είναι μόνο ένα μέρος της ονομαστικής ισχύος της γεννήτριας.
- Συμβολή στην ασφάλεια του δικτύου, καθώς οι ΓΕΔΤ συνδέονται στο δίκτυο από την πλευρά του στάτη χωρίς χρήση μετατροπέα συμβάλουν στην αδράνεια του δικτύου και μπορούν να βοηθήσουν σε περίπτωση σφάλματος.

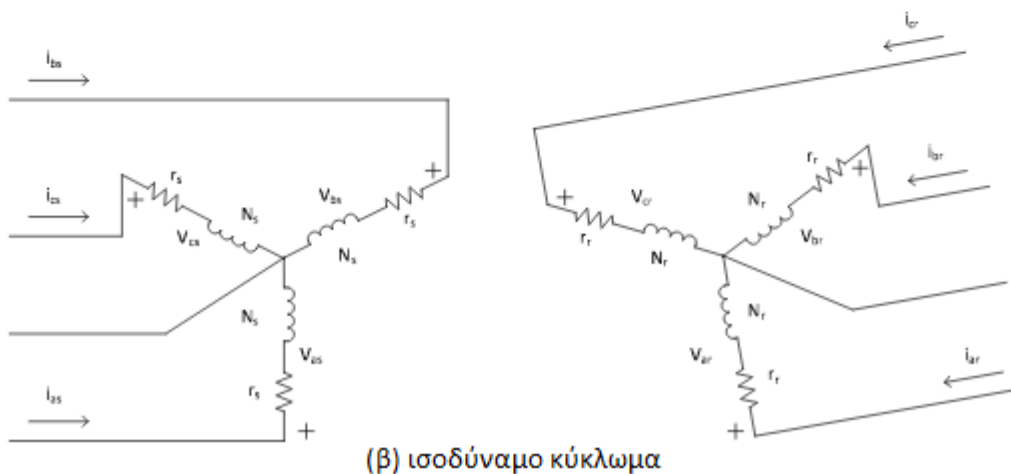
Για να εφαρμοστεί ο διανυσματικός έλεγχος για τη ρύθμιση της ενεργού και αέργου ισχύος θα εξεταστεί η δυναμική συμπεριφορά της ασύγχρονης μηχανής τυλιγμένου δρομέα. Παρακάτω θα παρουσιαστούν η διάταξη των τυλιγμάτων, το ισοδύναμο κύκλωμα και οι αρχές λειτουργίας της μηχανής τυλιγμένου δρομέα μαζί με τις αντίστοιχες εξισώσεις.

2.1 Ασύγχρονη ηλεκτρική μηχανή

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η διάταξη των τυλιγμάτων μιας συμβατικής διπολικής τριφασικής μηχανής επαγωγής συνδεδεμένη σε αστέρα. Το τύλιγμα κάθε φάσης αναπαριστάται από πηνίο ενός βρόγχου, και στις τομές του κάθε πηνίου δίνεται η συμβατική φορά του ρεύματος. Οι άξονες a_s , b_s και c_s αναπαριστούν τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από τα αντίστοιχα τυλίγματα a , b , c σύμφωνα με τον κανόνα του δεξιού χεριού. Οι τρεις αυτοί άξονες διαμορφώνουν το σταθερό σύστημα αναφοράς abc . Ομοίως ισχύει και για τους άξονες a_r , b_r και c_r που αφορούν τα τυλίγματα του δρομέα. Οι άξονες a_r , b_r και c_r είναι σταθεροί ως προς το κύκλωμα του δρομέα, περιστρέφονται δηλαδή με γωνιακή ταχύτητα ω_r . Στα διαγράμματα δίνονται επιπλέον ως θ_r η γωνιακή μετατόπιση του δρομέα σε σχέση με τον άξονα a_s του στάτη, και ως φ_s το αντίστοιχο τόξο της μετατόπισης του δρομέα στο ύψος της περιφέρειας των τυλιγμάτων του στάτη.



(α) σχηματικό διάγραμμα τυλιγμάτων



(β) ισοδύναμο κύκλωμα

Εικόνα 3.2 – Σχηματικό διάγραμμα τυλιγμάτων και ισοδύναμο κύκλωμα μίας διπολικής τριφασικής ασύγχρονης μηχανής

Για την παραπάνω μηχανή τα τυλίγματα του στάτη θεωρούνται όμοια και συμμετρικά με αριθμό τυλιγμάτων N_s και αντίσταση r_s . Αντίστοιχα τα τυλίγματα του δρομέα θεωρούνται κι αυτά όμοια και συμμετρικά με αριθμό τυλιγμάτων N_r και αντίσταση r_r . Τα πλήθη N_s και N_r αναπαριστούν τον ισοδύναμο αριθμό βρόγχων των τυλιγμάτων της μηχανής όταν αυτά έχουν κατανομηθεί ημιτονοειδώς στις περιφέρειες του στάτη και του δρομέα.

Θα αναλύσουμε κάποια φυσικά μεγέθη για τη λειτουργία της μηχανής. Χωρίς βλάβη της γενικότητας η ανάλυση θα επικεντρωθεί στο τύλιγμα as ,

αλλά παρόμοιοι υπολογισμοί μπορούν να γίνουν και για τα άλλα δύο τυλίγματα λαμβάνοντας υπόψη τη σχετική τους μετατόπιση γύρω από τον άξονα περιστροφής, $-\frac{2\pi}{3}$ για το τύλιγμα bs και $+\frac{2\pi}{3}$ για το τύλιγμα cs. Οι ίδιοι υπολογισμοί μπορούν να γίνουν και για τα τυλίγματα του δρομέα.

Η κατανομή του τυλίγματος as μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$N_{as}(\varphi_s) = \begin{cases} \frac{N_s}{2} \cdot \sin \varphi_s & 0 \leq \varphi_s \leq \pi \\ -\frac{N_s}{2} \cdot \sin \varphi_s & \pi \leq \varphi_s \leq 2\pi \end{cases} \quad (2.1)$$

όπου $\frac{N_s}{2}$ είναι η μέγιστη πυκνότητα βρόγχων εκφρασμένη σε βρόγχους ανά rad.

Η μαγνητεγερτική δύναμη (ΜΕΔ) ορίζεται ως το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα της έντασης H του μαγνητικού πεδίου. Λαμβάνοντας υπόψη το προηγούμενο και εφαρμόζοντας το νόμο του Ampere στην εξίσωση 2.1 προκύπτει η μαγνητεγερτική δύναμη του ισοδυνάμου as τυλίγματος ως:

$$MMF_{as}(\varphi_s) = \frac{N_s}{2} \cdot i_{as} \cdot \cos \varphi_s \quad (2.2)$$

Όπου με i_{as} συμβολίζεται το ρεύμα που διαρρέει το τύλιγμα as. Το μήκος διάκενου μεταξύ του στάτη και του δρομέα είναι σταθερό, με τιμή g . Χρησιμοποιώντας τον ορισμό της μαγνητεγερτικής δύναμης για το τύλιγμα as έχουμε:

$$MMF_{as}(\varphi_s) = g \cdot H_{as}(\varphi_s) \quad (2.3)$$

Σημειώνεται ότι οι τιμές της μαγνητεγερτικής δύναμης της έντασης του πεδίου εξαρτώνται από τη μετατόπιση στο μήκος της περιφέρειας του στάτη.

Τώρα, η πυκνότητα ροής στο διάκενο, λόγω του i_{as} , με όλα τα άλλα ρεύματα μηδενικά μπορεί να εκφραστεί ως:

$$B_r(\varphi_s, \theta_r) = \mu_0 \cdot H_{as}(\varphi_s) = \mu_0 \cdot \frac{MMF_{as}(\varphi_s)}{g} = \frac{N_s}{2} \cdot \frac{\mu_0 \cdot i_{as} \cdot \cos \varphi_s}{g} \quad (2.4)$$

Όπου B_r είναι η πυκνότητα μαγνητικής ροής και μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού.

Για να υπολογίσουμε την αυτεπαγωγή του τυλίγματος as , πρέπει αρχικά να υπολογιστεί η μαγνητική ροή που το διαρρέει λόγω του ρεύματος i_{as} . Θεωρούμε ένα βρόγχο του τυλίγματος του στάτη που βρίσκεται σε γωνία ίση με φ_s . Το τύλιγμα εκτείνεται για 180 μοίρες ή π rad και η ροή του υπολογίζεται μέσω ενός επιφανειακού ολοκληρώματος της πυκνότητας ροής στο διάκενο.

$$\Phi(\varphi_s, \theta_r) = \int_{\varphi_s}^{\varphi_s + \pi} B_r(\sigma, \theta_r) \cdot r \cdot l \cdot d\sigma \quad (2.5)$$

Όπου

- l είναι το μήκος του διακένου παράλληλα με τον άξονα περιστροφής
- r είναι η ακτίνα του μέσου του διακένου
- σ η μεταβλητή ολοκλήρωσης

Για να πάρουμε την πεπλεγμένη ροή για ολόκληρο το τύλιγμα, η ροή κάθε βρόγχου πρέπει να ολοκληρωθεί ως προς όλες τις πλευρές του τυλίγματος όπου ρέει ρεύμα προς την ίδια κατεύθυνση. Επιπλέον, πρέπει να συμπεριληφθεί στον υπολογισμό η ροή από μαγνητικές διαρροές στο στάτη λόγω του ρεύματος i_{as} . Συνεπώς, η συνολική ροή του τυλίγματος as που παράγεται από το ρεύμα i_{as} είναι:

$$\lambda_{asas} = L_{ls} \cdot i_{as} + \int N_{as}(\varphi_s) \cdot \Phi(\varphi_s, \theta_r) d\varphi \quad (2.6)$$

Όπου L_{ls} είναι η επαγωγή διαρροής στο στάτη, κυρίως λόγω μαγνητικής διαρροής στα άκρα του τυλίγματος.

Για τη λύση της εξίσωσης 2.6 λαμβάνουμε υπόψη τις 2.1 και 2.5 και έχουμε:

$$\lambda_{asas} = L_{ls} \cdot i_{as} + \left(\frac{N_s}{2}\right)^2 \cdot \frac{\pi \cdot \mu_0 \cdot r \cdot l}{g} \cdot i_{as} \quad (2.7)$$

Δεδομένης της ροής του τυλίγματος, λαμβάνουμε την αυτεπαγωγή L_{asas} διαιρώντας τη ροή με το ρεύμα i_{as} που την προκαλεί, άρα:

$$L_{asas} = L_{ls} + \left(\frac{N_s}{2}\right)^2 \cdot \frac{\pi \cdot \mu_0 \cdot r \cdot l}{g} \quad (2.8)$$

Ο δεύτερος όρος του δεξιού μέλους της εξίσωσης 2.8 αποτελεί την έκφραση της αυτεπαγωγής μαγνήτισης του στάτη:

$$L_{ms} = \left(\frac{N_s}{2}\right)^2 \cdot \frac{\pi \cdot \mu_0 \cdot r \cdot l}{g} \quad (2.9)$$

Λόγω της συμμετρίας των τριών τυλιγμάτων του στάτη και παρατηρώντας την εξίσωση 2.8 διαπιστώνεται ότι οι αυτεπαγωγές και των τριών τυλιγμάτων είναι ίσες και ισχύει:

$$L_{asas} = L_{bsbs} = L_{cscs} = L_{ls} + L_{ms} \quad (2.10)$$

Τώρα, για να υπολογίσουμε την αμοιβαία επαγωγή μεταξύ δύο τυλιγμάτων, π.χ. των τυλιγμάτων as και bs , θα υπολογίσουμε την πεπλεγμένη ροή που προκαλείται στο τύλιγμα as λόγω του ρεύματος i_{bs} που ρέει στο τύλιγμα bs .

$$\lambda_{asbs} = \int N_{as}(\varphi_s) \cdot \Phi(\varphi_s, \theta_r) d\varphi \quad (2.11)$$

Σημειώνεται ότι η μαγνητική σύζευξη στα άκρα των δύο τυλιγμάτων θεωρείται αμελητέα και αγνοείται. Η ολοκλήρωση ως προς τη μετατόπιση φ_s γίνεται στο διάστημα π έως 2π , οπότε η ροή έχει αρνητικό πρόσημο. Από την 2.11 και λαμβάνοντας υπόψη τις εξισώσεις 2.1 και 2.5 παίρνουμε:

$$\lambda_{asbs} = - \left(\frac{N_s}{2} \right)^2 \cdot \frac{\pi \cdot \mu_0 \cdot r \cdot l}{2 \cdot g} \cdot i_{bs} \quad (2.12)$$

Και διαιρώντας τα δύο μέλη της εξίσωσης με το ρεύμα i_{bs} λαμβάνουμε την αλληλεπαγωγή των τυλιγμάτων as και bs:

$$L_{asbs} = - \left(\frac{N_s}{2} \right)^2 \cdot \frac{\pi \cdot \mu_0 \cdot r \cdot l}{2 \cdot g} \quad (2.13)$$

Λόγω της συμμετρίας της μηχανής παρατηρείται ότι η αλληλεπαγωγές μεταξύ των τυλιγμάτων είναι ίσες και λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση 2.9 καταλήγουμε:

$$L_{asbs} = L_{bscs} = L_{csas} = -\frac{1}{2} L_{ms} \quad (2.14)$$

Όμοιοι υπολογισμοί γίνονται για το κύκλωμα του δρομέα. Αρχικά, υπολογίζεται η πυκνότητα μαγνητικής ροής του μαγνητικού πεδίου στο διάκενο λόγω των ρευμάτων στο δρομέα. Έπειτα η τιμή αυτή ολοκληρώνεται ως προς ένα βρόγχο του τυλίγματος για να υπολογιστεί η ροή στο βρόγχο. Στη συνέχεια ολοκληρώνουμε εκ νέου ως προς τις πλευρές του τυλίγματος όπου ρέει ρεύμα προς την ίδια κατεύθυνση για να λάβουμε την πεπλεγμένη ροή του τυλίγματος. Τέλος, διαιρούμε με το ρεύμα που ρέει στο τύλιγμα και λαμβάνουμε τις αυτεπαγωγές των τυλιγμάτων του δρομέα:

$$L_{arar} = L_{brbr} = L_{cr cr} = L_{lr} + L_{mr} \quad (2.15)$$

Όπου L_{lr} είναι η αυτεπαγωγή μαγνητικής διαρροής και L_{mr} είναι η αυτεπαγωγή μαγνήτισης του δρομέα.

$$L_{mr} = \left(\frac{N_r}{2} \right)^2 \cdot \frac{\pi \cdot \mu_0 \cdot r \cdot l}{g} \quad (2.16)$$

Αντίστοιχα με τους υπολογισμούς στο κύκλωμα του στάτη, για τις αλληλεπαγωγές των τυλιγμάτων του δρομέα έχουμε:

$$L_{arbr} = L_{brcr} = L_{crar} = -\frac{1}{2}L_{mr} \quad (2.17)$$

Για την αλληλεπαγωγή μεταξύ των τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα απαιτούνται ελαφρώς πιο σύνθετοι υπολογισμοί. Η πυκνότητα ροής του μαγνητικού πεδίου στο διάκενο, λόγω του ρεύματος του δρομέα, ολοκληρώνεται ως προς τη μετατόπιση του στάτη και λαμβάνουμε την πεπλεγμένη ροή μεταξύ των τυλιγμάτων του δρομέα και του στάτη. Διαιρώντας έπειτα με το ρεύμα δρομέα λαμβάνουμε την αλληλεπαγωγή μεταξύ στάτη και δρομέα. Έχουμε:

$$L_{asar} = L_{bsbr} = L_{cscr} = \left(\frac{N_s}{2}\right) \cdot \left(\frac{N_r}{2}\right) \cdot \frac{\pi \cdot \mu_0 \cdot r \cdot l}{g} \cdot \cos \theta_r = L_{sr} \cdot \cos \theta_r \quad (2.18)$$

Όπου L_{sr} είναι η αλληλεπαγωγή μεταξύ των τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα,

$$L_{sr} = \left(\frac{N_s}{2}\right) \cdot \left(\frac{N_r}{2}\right) \cdot \frac{\pi \cdot \mu_0 \cdot r \cdot l}{g} \quad (2.19)$$

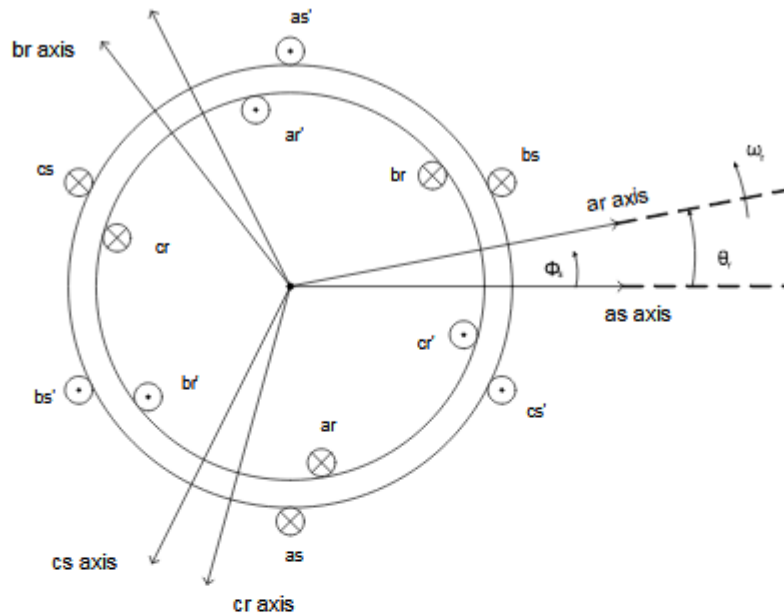
Αντίστοιχα με τα παραπάνω έχουμε:

$$L_{asbr} = L_{bscr} = L_{csar} = L_{sr} \cdot \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.20)$$

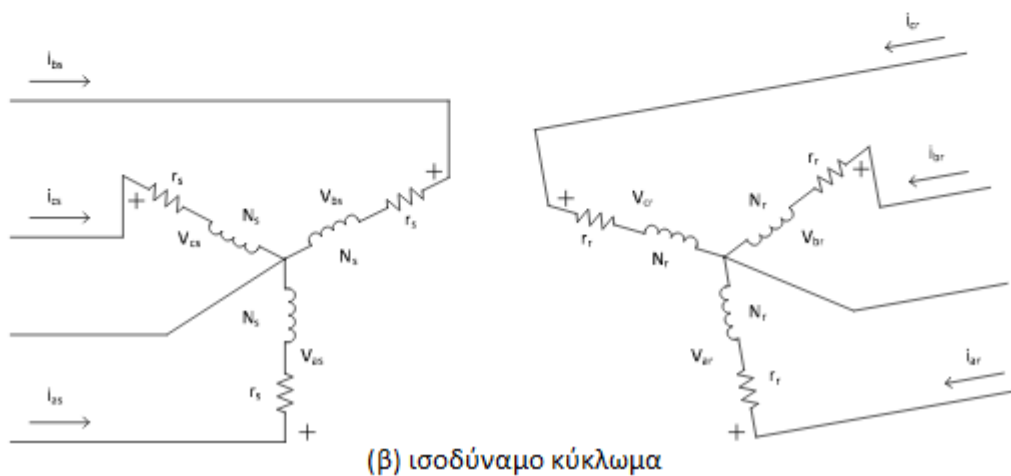
$$L_{ascr} = L_{bsar} = L_{csbr} = L_{sr} \cdot \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.21)$$

Η συνολική πεπλεγμένη ροή για το τύλιγμα as δίνεται από την εξίσωση 2.22. Αντίστοιχες εκφράσεις ισχύουν για τις συνολικές ροές των υπόλοιπων τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα.

$$\lambda_{as} = L_{asas} \cdot i_{as} + L_{asbs} \cdot i_{bs} + L_{ascs} \cdot i_{cs} + L_{asar} \cdot i_{ar} + L_{asbr} \cdot i_{br} + L_{ascr} \cdot i_{cr} \quad (2.22)$$



(α) σχηματικό διάγραμμα τυλιγμάτων



(β) ισοδύναμο κύκλωμα

Εικόνα 2.2 – Σχηματικό διάγραμμα τυλιγμάτων και ισοδύναμο κύκλωμα μίας διπολικής τριφασικής ασύγχρονης μηχανής

Η εξίσωση τάσης για το τύλιγμα ar του δρομέα, όπως φαίνεται και από την εικόνα 2.2, είναι:

$$V_{ar} = r_r \cdot i_{ar} + \frac{d\lambda_{ar}}{dt} \quad (2.23)$$

Αντίστοιχες είναι και οι εξισώσεις για τα τυλίγματα br και cr του δρομέα. Οι ποσότητες των εξισώσεων των κυκλωμάτων του δρομέα μπορούν να αναχθούν στο στάτη ώστε να προκύψουν οι αντίστοιχες εξισώσεις από την πλευρά του στάτη. Επομένως, για το ακίνητο πλαίσιο αναφοράς, οι σχέσεις μεταξύ τάσεων, ρευμάτων και πεπλεγμένων μαγνητικών ρών είναι οι εξής:

$$V_{as} = r_s \cdot i_{as} + \frac{d\lambda_{as}}{dt} \quad (2.24)$$

$$V_{bs} = r_s \cdot i_{bs} + \frac{d\lambda_{bs}}{dt} \quad (2.25)$$

$$V_{cs} = r_s \cdot i_{cs} + \frac{d\lambda_{cs}}{dt} \quad (2.26)$$

$$V'_{ar} = r'_r \cdot i'_{ar} + \frac{d\lambda'_{ar}}{dt} \quad (2.27)$$

$$V'_{br} = r'_r \cdot i'_{br} + \frac{d\lambda'_{br}}{dt} \quad (2.28)$$

$$V'_{cr} = r'_r \cdot i'_{cr} + \frac{d\lambda'_{cr}}{dt} \quad (2.29)$$

Όπου:

- λ είναι η πεπλεγμένη ροή
- οι δείκτες s και r συμβολίζουν αν η ποσότητα σχετίζεται με το στάτη ή το δρομέα, αντίστοιχα.
- Ο τόνος (') δηλώνει τις ανηγμένες στο στάτη τιμές των μεγεθών του κυκλώματος του δρομέα.

Γράφοντας ξανά τις εξισώσεις σε μορφή πίνακα, αντικαθιστώντας των τελεστή παραγωγίσης με p λαμβάνουμε:

$$[V_{abcs}] = r_s \cdot [i_{abcs}] + p \cdot [\lambda_{abcs}] \quad (2.30)$$

$$[V'_{abcr}] = r'_r \cdot [i'_{abcr}] + p \cdot [\lambda'_{abcr}] \quad (2.31)$$

Οι πεπλεγμένες ροές των εξισώσεων 2.30 και 2.31 μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$[\lambda_{abcs}] = [L_{ss}] \cdot [i_{abcs}] + [L'_{sr}] \cdot [i'_{abcr}] \quad (2.32)$$

$$[\lambda'_{abcr}] = [L'_{sr}]^T \cdot [i_{abcs}] + [L'_{rr}] \cdot [i'_{abcr}] \quad (2.33)$$

Όπου οι πίνακες των επαγωγών των τυλιγμάτων είναι οι εξής:

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

$$[L'_{rr}] = \begin{bmatrix} L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_{lr} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

$$[L'_{sr}] = L_{ms} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

Στην εξίσωση 2.35, με L'_{lr} συμβολίζεται η επαγωγή μαγνητικής διαρροής των τυλιγμάτων του δρομέα, ανηγμένη στο στάτη. Επιπλέον, σημειώνεται ότι η εξίσωση 2.36 εξαρτάται από τη γωνιακή μετατόπιση του δρομέα θ_r , η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από τη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα ω_r . Συνεπώς, οι επαγωγές στον πίνακα $[L'_{sr}]$ είναι μεταβαλλόμενες με το χρόνο.

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 2.30 έως και 2.33, λαμβάνουμε:

$$[V_{abcs}] = ([r_s] + p \cdot [L_{ss}]) \cdot [i_{abcs}] + p \cdot [L'_{sr}] \cdot [i'_{abcr}] \quad (2.37)$$

$$[V'_{abcr}] = p \cdot [L'_{sr}]^T \cdot [i_{abcs}] + ([r'_r] + p \cdot [L'_{rr}]) \cdot [i'_{abcr}] \quad (2.38)$$

Οι τάσεις τα ρεύματα και οι επαγωγές στις εξισώσεις 2.37 και 2.38 υπολογίζονται στο ακίνητο πλαίσιο αναφοράς και άρα οι τιμές τους μεταβάλλονται με το χρόνο. Η μοντελοποίηση και ανάλυση αυτού του συστήματος είναι χρονοβόρα. Οι μεταβαλλόμενες στο χρόνο τιμές μπορούν να καταστούν σταθερές αν μετασχηματίσουμε τις εξισώσεις σε ένα περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς, το οποίο καλείται qd0 πλαίσιο αναφοράς. Το εν λόγω πλαίσιο περιστρέφεται γύρω από τον άξονα περιστροφής της μηχανής με γωνιακή ταχύτητα ίση με τη σύγχρονη ταχύτητα της μηχανής. Εφαρμόζοντας τον παραπάνω μετασχηματισμό (μετασχηματισμός Park) σε κάθε ποσότητα των εξισώσεων, λαμβάνουμε τις σχέσεις:

$$[V_{qd0s}] = r_s \cdot [i_{qd0s}] + \omega_{qd0} \cdot [\lambda_{dqs}] + p \cdot [\lambda_{qd0s}] \quad (2.39)$$

$$[V'_{qd0r}] = r'_r \cdot [i'_{qd0r}] + (\omega_{qd0} - \omega_r) \cdot [\lambda'_{dqr}] + p \cdot [\lambda'_{qd0r}] \quad (2.40)$$

Όπου:

- ω_{qd0} είναι η γωνιακή ταχύτητα του πλαισίου αναφοράς qd0, σε rad ανά second, η οποία είναι ίση με τη σύγχρονη ταχύτητα
- ω_r είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα σε rad/s
- ο όρος $(\omega_{qd0} - \omega_r)$ αντιπροσωπεύει την ταχύτητα ολίσθησης της μηχανής.

Αν αναπτύξουμε τις παραπάνω εξισώσεις, έχουμε:

Εξισώσεις στάτη:

$$V_{qs} = r_s \cdot i_{qs} + \omega_{qd0} \cdot \lambda_{ds} + p \cdot \lambda_{qs} \quad (2.41)$$

$$V_{ds} = r_s \cdot i_{ds} + \omega_{qd0} \cdot \lambda_{qs} + p \cdot \lambda_{ds} \quad (2.42)$$

$$V_{0s} = r_s \cdot i_{0s} + p \cdot \lambda_{0s} \quad (2.43)$$

Εξισώσεις δρομέα:

$$V'_{qr} = r'_r \cdot i'_{qr} + (\omega_{qd0} - \omega_r) \cdot \lambda'_{dr} + p \cdot \lambda'_{qr} \quad (2.44)$$

$$V'_{dr} = r'_r \cdot i'_{dr} + (\omega_{qd0} - \omega_r) \cdot \lambda'_{qr} + p \cdot \lambda'_{dr} \quad (2.45)$$

$$V'_{0r} = r'_r \cdot i'_{0r} + p \cdot \lambda'_{0r} \quad (2.46)$$

Ομοίως, εφαρμόζοντας το μετασχηματισμό Park στις σχέσεις των πεπλεγμένων ροών, λαμβάνουμε:

Εξισώσεις ροών στάτη:

$$\lambda_{qs} = (L_{ls} + L_M) \cdot i_{qs} + L_M \cdot i'_{qr} \quad (2.47)$$

$$\lambda_{ds} = (L_{ls} + L_M) \cdot i_{ds} + L_M \cdot i'_{dr} \quad (2.48)$$

$$\lambda_{0s} = L_{ls} \cdot i_{0s} \quad (2.49)$$

Εξισώσεις ροών δρομέα:

$$\lambda'_{qr} = L_M \cdot i_{qs} + (L'_{lr} + L_M) \cdot i'_{qr} \quad (2.50)$$

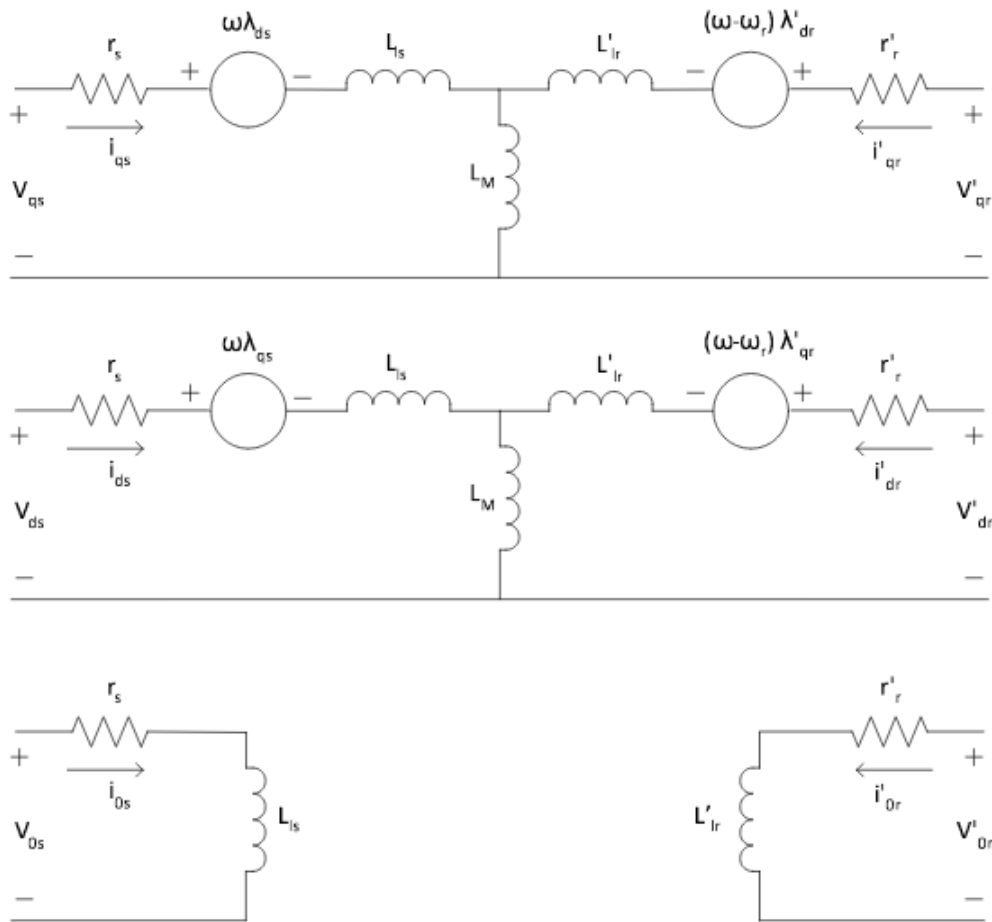
$$\lambda'_{dr} = L_M \cdot i_{ds} + (L'_{lr} + L_M) \cdot i'_{dr} \quad (2.51)$$

$$\lambda'_{0r} = \lambda'_{0r} \cdot i'_{0r} \quad (2.52)$$

Όπου με L_M αντικαταστήσαμε τον όρο:

$$L_M = \frac{3}{2} L_{ms} \quad (2.53)$$

Οι εξισώσεις 2.41 έως και 2.53 περιγράφουν το ισοδύναμο κύκλωμα της μηχανής όπως φαίνεται στην εικόνα 2.3



Εικόνα 2.3 – Ισοδύναμο κύκλωμα τριφασικής ασύγχρονης μηχανής σε πλαίσιο αναφοράς dq0

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή που αναπτύσσεται στο κύκλωμα του δρομέα αντιστοιχεί στην ηλεκτρική ισχύ ανά τη σύγχρονη ταχύτητα και μπορεί να εκφραστεί ως:

$$T_{em} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot (\lambda_{ds} \cdot i_{qs} - \lambda_{qs} \cdot i_{ds}) \quad [\sigma \epsilon Nm] \quad (2.54)$$

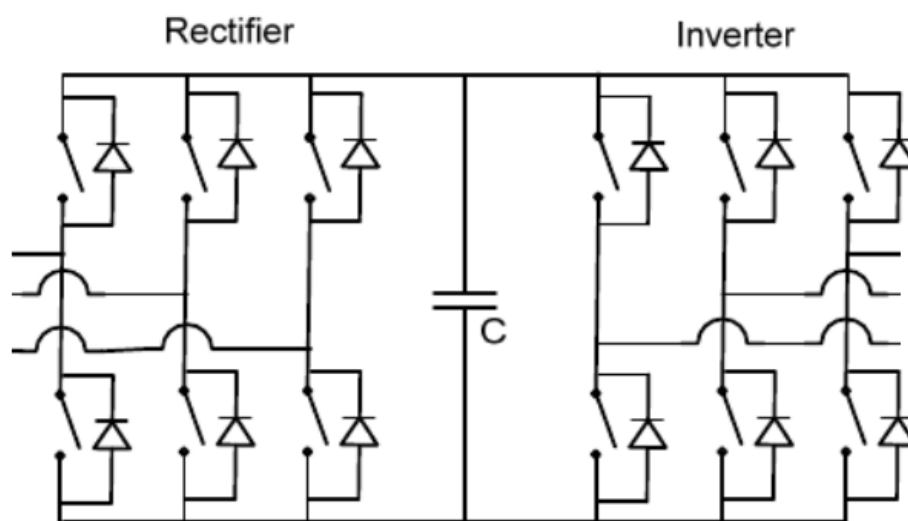
Όπου με P συμβολίζουμε τον αριθμό πόλων της μηχανής.

Καθίσταται εμφανές ότι η ηλεκτρομαγνητική ροπή μπορεί να εκφραστεί αναφορικά με τα ρεύματα και τις πεπλεγμένες ροές των q και d αξόνων.

2.2 Μετατροπέας AC/DC/AC (back-to-back converter)

Στη διάταξη μίας γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης, η σύνδεση του κυκλώματος του δρομέα της ασύγχρονης γεννήτριας με το δίκτυο γίνεται μέσω ενός μετατροπέα AC/DC/AC.

Ο παραπάνω μετατροπέας αποτελείται από δύο άλλους μετατροπείς συνδεδεμένους σε σειρά. Από την πλευρά της μηχανής, συνδέεται στα τυλίγματα του δρομέα μετατροπέας AC/DC (Rotor Side Converter, RSC) που λειτουργεί ως ανορθωτής τύπου πηγής τάσης. Ακολουθεί, από την πλευρά του δικτύου, μετατροπέας DC/AC (Grid Side Converter, GSC) που λειτουργεί ως αντιστροφέας πηγής τάσης. Οι δύο μετατροπείς συνδέονται μεταξύ τους από την πλευρά σταθερής τάσης με χρήση ενός πυκνωτή συνδεδεμένου εν παραλλήλω, ώστε να επιτυγχάνεται μείωση των διακυμάνσεων της τάσης της dc-σύνδεσης.



Εικόνα 2.4 – Διάγραμμα διαδοχικά (back-to-back) συνδεδεμένων μετατροπέων

Καθώς η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα της μηχανής επαγωγής εξαρτάται από τις συχνότητες των ρευμάτων στο στάτη και το δρομέα, η διασύνδεση μέσω του μετατροπέα AC/DC/AC είναι εκείνη που επιτρέπει τη λειτουργία σε μεταβλητό αριθμό στροφών.

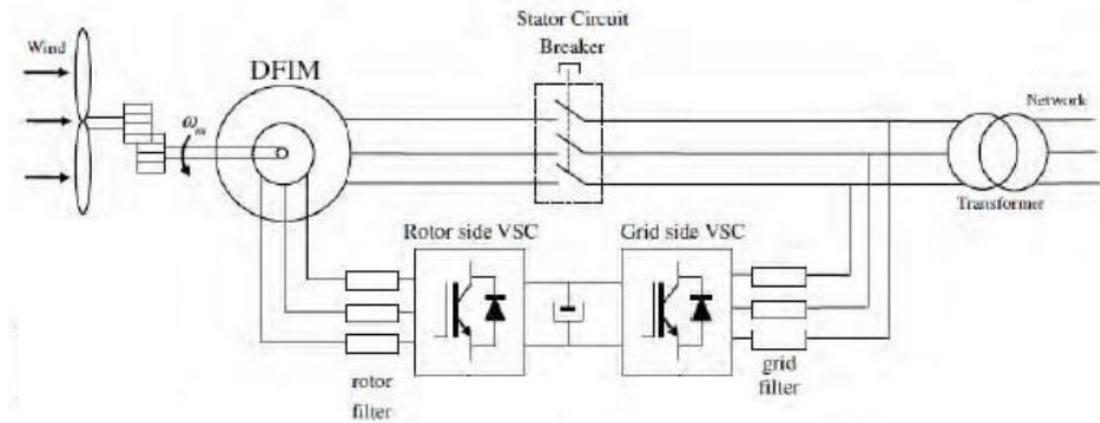
Με τη dc διασύνδεση των μετατροπέων επιτυγχάνεται απόζευξη του κυκλώματος του δρομέα από το δίκτυο και τα ηλεκτρικά μεγέθη στα τυλίγματα του δρομέα μπορούν να ρυθμιστούν μέσω του συστήματος ελέγχου στις

επιθυμητές συχνότητες, ώστε να επιτυγχάνεται βέλτιστη λειτουργία, δηλαδή λειτουργία στο σημείο μέγιστης ισχύος.

Το εύρος των συχνοτήτων, και άρα των αντίστοιχων ταχυτήτων, του δρομέα εξαρτάται από το μέγεθος του μετατροπέα. Μεγαλύτερος μετατροπέας επιτρέπει τη λειτουργία της μηχανής σε ευρύτερο φάσμα ταχυτήτων, ενώ μικρότερος μετατροπέας συνεπάγεται μείωση του συνολικού κόστους της ανεμογεννήτριας. Διατηρώντας επομένως ένα επαρκές εύρος ταχυτήτων για την αποδοτική λειτουργία της μηχανής, το οποίο κυμαίνεται συνήθως στο $\pm 30\%$ γύρω από την ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας, έχουμε τη δυνατότητα να μειώσουμε αντίστοιχα την ονομαστική ισχύ του μετατροπέα.

Επομένως, χρησιμοποιώντας τον μετατροπέα μόνο για τη διασύνδεση του κυκλώματος του δρομέα στο δίκτυο, και εφόσον εκείνος διαχειρίζεται μόνο περίπου το 30% της ισχύος της μηχανής, επιτυγχάνουμε σημαντική μείωση του κόστους για τα ηλεκτρονικά ισχύος και περιορίζουμε επίσης τις απώλειες του μετατροπέα.

Η απόζευξη του κυκλώματος του δρομέα από το δίκτυο διευκολύνει επίσης τον έλεγχο της μηχανής σε περιπτώσεις σφαλμάτων του δικτύου και μειώνει τις επιδράσεις των μεταβατικών φαινομένων. Επιτυγχάνεται αποσύνδεση του ελέγχου της ενεργού και της άεργου ισχύος, μέσω του ελέγχου των ρευμάτων στα τυλίγματα του δρομέα. Επιπροσθέτως, ο μετατροπέας από την πλευρά του δικτύου λειτουργεί σε μοναδιαίο συντελεστή ισχύος εφόσον διατηρείται σταθερή η τάση της dc-σύνδεσης. Υπάρχει, τέλος, δυνατότητα παραγωγής άεργου ισχύος ανεξάρτητα από την ισχύ που ανταλλάσει η ανεμογεννήτρια με το δίκτυο. Δηλαδή, υπάρχει η δυνατότητα η γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης να ρυθμιστεί κατάλληλα, ώστε να συνεισφέρει στη διαχείριση του δικτύου καταναλώνοντας ή παράγοντας άεργο ισχύ, συμμετέχοντας για παράδειγμα στη ρύθμιση τάσης του δικτύου.

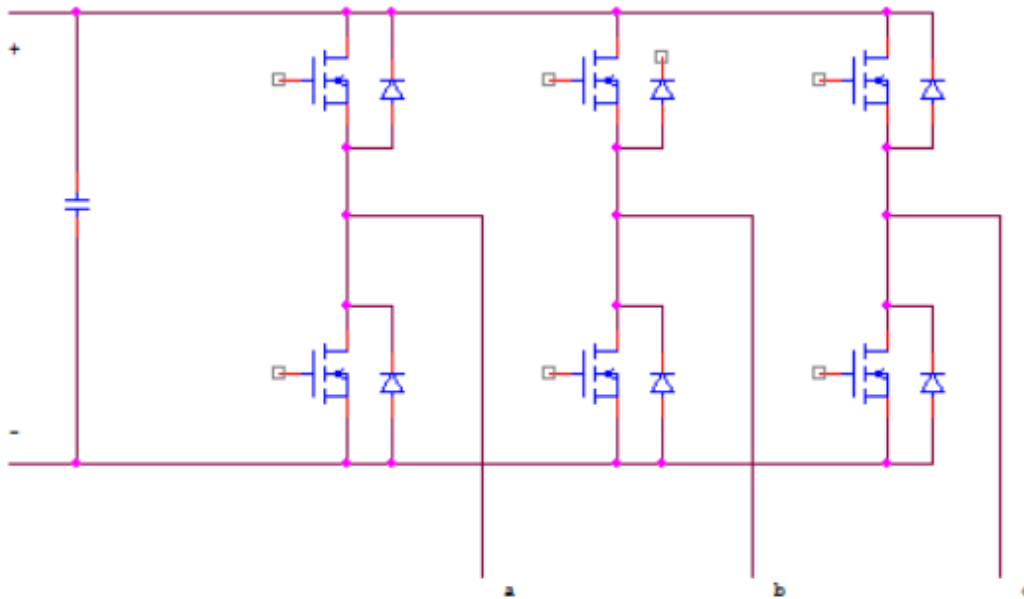


Εικόνα 2.5 – Συνδεσμολογία των μετατροπέων στη διάταξη της ΓΕΔΤ

Ο AC/DC/AC μετατροπέας επιτρέπει την αμφίδρομη ροή ισχύος μεταξύ του δρομέα και του δικτύου. Δηλαδή ενώ σε κάθε περίπτωση ο στάτης τροφοδοτεί το δίκτυο με ενέργεια, ανάλογα με το αν η μηχανή λειτουργεί σε υπερσύγχρονη ή σε υποσύγχρονη κατάσταση έχουμε ροή ισχύος από το δρομέα προς το δίκτυο ή από το δίκτυο προς το δρομέα αντίστοιχα.

2.2.1 Αντιστροφείας πηγής τάσης

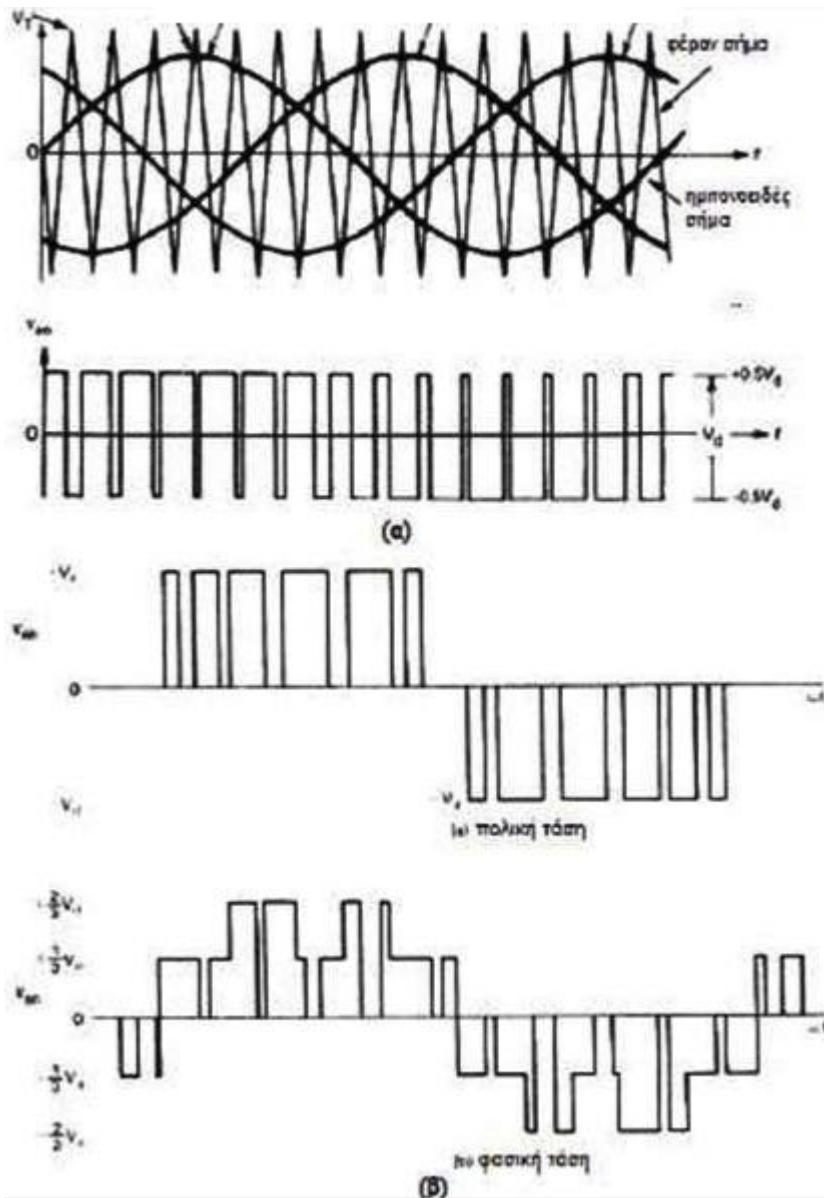
Από την πλευρά του δικτύου έχουμε ένα μετατροπέα που λειτουργεί ως τριφασικός αντιστροφείας πηγής τάσης. Χρησιμοποιεί διπολικά τρανζίστορ μονωμένης πύλης (IGBTs) ως διακόπτες για την αγωγή ή αποκοπή των εκάστοτε αγωγών. Η, αντιπαράλληλη των τρανζίστορ, τοποθέτηση διόδων επιτρέπει τη ροή ρεύματος και προς τις δύο διευθύνσεις.



Εικόνα 2.6 – Τριφασικός Αντιστροφέας Πηγής Τάσης

Η λειτουργία του αντιστροφέα για μία περίοδο της τάσης εξόδου διαιρείται σε έξι διαστήματα, σε καθένα από τα οποία άγουν μόνο δύο εκ των τρανζίστορ. Έτσι, το φορτίο διασυνδέεται με τη σταθερή τάση εισόδου και άγεται ένας παλμός πλάτους V με εύρος αντίστοιχο της χρονικής διάρκειας αγωγής του εκάστοτε ζεύγους διακοπών. Η τάση εξόδου διαμορφώνεται από τη βασική αρμονική συνιστώσα καθώς και ανώτερες αρμονικές αυτής.

Για τη μείωση των ανώτερων αρμονικών συνιστωσών χρησιμοποιείται η τεχνική SPWM για τη διαμόρφωση του εύρους των παλμών. Για την περίπτωση του τριφασικού αντιστροφέα γίνεται χρήση τριών ημιτονοειδών κυματομορφών αναφοράς και μία τριγωνική κυματομορφή φορέα. Το πλάτος της κυματομορφής αναφοράς είναι μεταβλητό σε σχέση με το πλάτος της κυματομορφής φορέα, το οποίο παραμένει σταθερό. Τα σημεία τομής μεταξύ των κυματομορφών αναφοράς και της κυματομορφής φορέα ορίζουν τις κυματομορφές των παλμών έναυσης των τρανζίστορ IGBT του αντιστροφέα.



Εικόνα 2.7 – Τεχνική SPWM

Με την τεχνική SPWM καταφέρνουμε να μετατοπίσουμε την επικρατούσα ανώτερη αρμονική σε συχνότητα αρκετά υψηλότερη της βασικής αρμονικής. Το πλάτος και η τάξη της επικρατούσας αρμονικής είναι:

$$\begin{pmatrix} V_{AB} = V_{dc} \\ d = F_{nc} - 2 \\ F_{nc} = \frac{F_c}{F_r} \end{pmatrix}$$

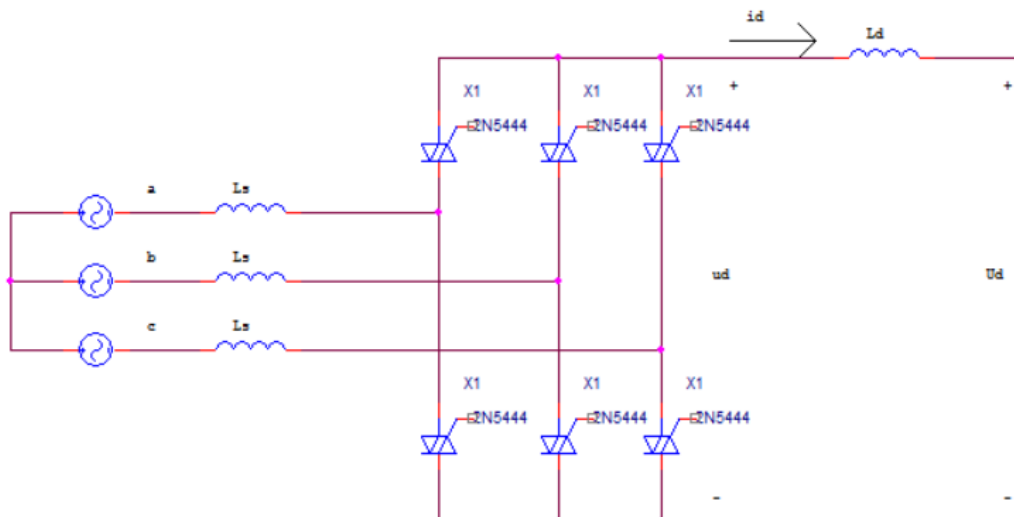
Όπου F_{nc} είναι η ανηγμένη συχνότητα του φορέα και V_{dc} η τάση εισόδου του αντιστροφέα, δηλαδή η τάσης της dc σύνδεσης.

2.2.2 Τριφασική ανορθωτική γέφυρα

Σε μία τριφασική ανορθωτική γέφυρα υπάρχουν 6 θυρίστορ, τα οποία άγουν με συγκεκριμένη σειρά, ώστε στην έξοδο να ανορθώνεται κάθε φορά το θετικό ή αρνητικό μέρος μίας φάσης της πηγής εισόδου. Τα θυρίστορ D_1, D_3, D_5 – όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα - άγουν για να ανορθώσουν το θετικό μέρος των φάσεων a,b,c και τα θυρίστορ D_4, D_6, D_2 άγουν για να ανορθώσουν το αρνητικό μέρος. Ως αποτέλεσμα σε ένα κύκλο λειτουργίας της τάσης εξόδου παρατηρούμε 6 παλμούς, έναν για το θετικό και έναν για το αρνητικό μέρος κάθε φάσης. Η μέση τιμή της εξόδου δίνεται από τη σχέση:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{6}V_m}{\pi} \cdot \cos \alpha \quad (2.55)$$

Όπου V_m είναι η rms τιμή της τάσης εισόδου και α είναι η γωνία έναυσης των θυρίστορ.



Εικόνα 2.8 – Τριφασική Ανορθωτική Γέφυρα

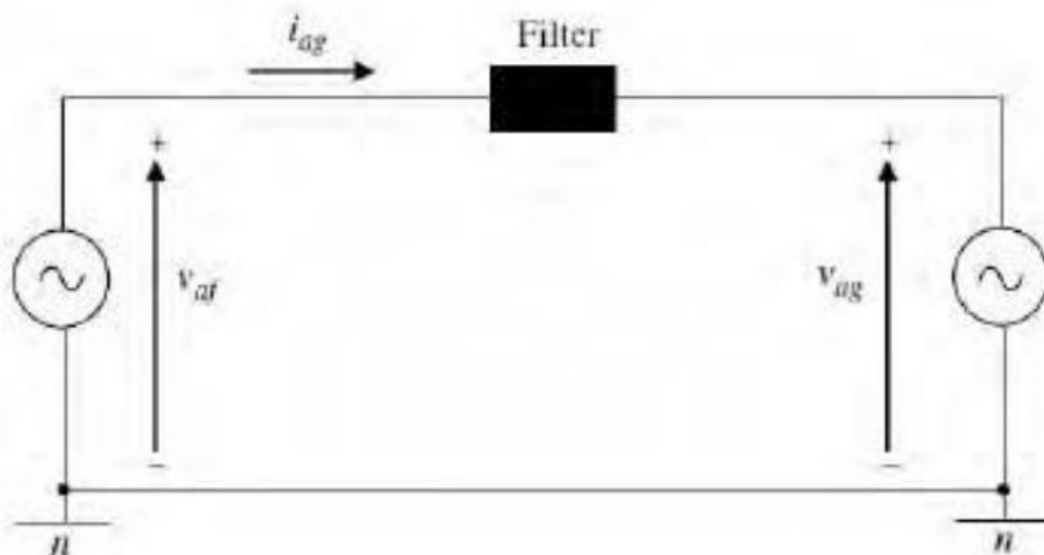
Μεταξύ του μετατροπέα και του κυκλώματος του δρομέα χρησιμοποιείται φίλτρο ώστε να προστατεύονται τα κυκλώματα της μηχανής από ενδεχόμενο σφάλμα στο μετατροπέα.

2.2.3 Φίλτρο μεταξύ του μετατροπέα πλευράς δικτύου και του δικτύου

Για τη μείωση των ανώτερων αρμονικών συνιστωσών της εξόδου του αντιστροφέα πηγής τάσης χρησιμοποιείται φίλτρο για τη διασύνδεση του μετατροπέα και του δικτύου. Το βάρος, το μέγεθος και το κόστος του φίλτρου εξαρτώνται από το πλάτος και τη συχνότητα της βασικής αρμονικής συνιστώσας.

Για την υλοποίηση του φίλτρου κάθε φάση εξόδου του μετατροπέα συνδέεται με μία αυτεπαγωγή (L) προτού συνδεθεί στο δίκτυο. Εάν χρειάζεται υψηλό φίλτρο η διάταξη μπορεί να τροποποιηθεί κατάλληλα σε μορφή LC ή LCL φίλτρου ώστε να αποκλείονται οι επιθυμητές συχνότητες.

Εάν υποθέσουμε την τάση του δικτύου ιδανική, η συμμετρία των τριών φάσεων συνεπάγεται το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα που εμφανίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 2.9 – Μονοφασικό ισοδύναμο διάγραμμα φίλτρου του μετατροπέα GSC

Από το ισοδύναμο κύκλωμα μπορούμε να εξάγουμε τις παρακάτω σχέσεις που περιγράφουν τη λειτουργία του φίλτρου:

$$V_a = R_f \cdot I_{ag} + L_f \cdot \frac{dI_{ag}}{dt} + V_{ag} \quad (2.56)$$

$$V_b = R_f \cdot I_{bg} + L_f \cdot \frac{dI_{bg}}{dt} + V_{bg} \quad (2.57)$$

$$V_c = R_f \cdot I_{cg} + L_f \cdot \frac{dI_{cg}}{dt} + V_{cg} \quad (2.58)$$

Όπου:

- L_f είναι η αυτεπαγωγή του φίλτρου
- R_f είναι η αντίσταση του φίλτρου
- V_{ag}, V_{bg}, V_{cg} είναι οι τάσεις των φάσεων a,b,c του δικτύου
- I_{ag}, I_{bg}, I_{cg} είναι τα ρεύματα εξόδου του μετατροπέα
- V_a, V_b, V_c είναι οι τάσεις εξόδου του μετατροπέα

2.3 Απώλειες Μαγνήτισης

Στη διάταξη της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης, εφόσον ο στάτης συνδέεται απευθείας στο δίκτυο και όχι μέσω μετατροπέα, δεν έχουμε τη δυνατότητα να ρυθμίσουμε την τιμή της μαγνητικής ροής ώστε να περιορίσουμε τις απώλειες μαγνήτισης σε μικρά φορτία.

Θεωρώντας την τάση του δικτύου σταθερή, λόγω της απευθείας σύνδεσης της μηχανής στο δίκτυο, λαμβάνουμε και σταθερή μαγνητική ροή. Επομένως για να περιορίσουμε τις απώλειες μαγνήτισης θα πρέπει να μεταβάλουμε τη σύνδεση του στάτη με το δίκτυο.

Ένας τρόπος να το πετύχουμε αυτό είναι η εναλλαγή της σύνδεσης του στάτη σε διάταξη τριγώνου ή αστέρα, ώστε να μεταβάλουμε το πλάτος της τάσης στα άκρα της μηχανής. Για να πραγματοποιηθεί η μεταβολή στη διάταξη θα πρέπει ωστόσο να μηδενιστεί η ισχύς της γεννήτριας, να αποσυνδεθεί μέσω διακόπτη ο στάτης από το δίκτυο και μετά την αλλαγή της συνδεσμολογίας να συγχρονιστεί ξανά η γεννήτρια.

Ένας άλλος τρόπος να περιορίσουμε τις απώλειες μαγνήτισης στις ΓΕΔΤ είναι η βραχυκύκλωση του στάτη στις μικρές ταχύτητες και η χρήση του μετατροπέα για τη μεταφορά ισχύος. Για να το πετύχουμε αυτό αποσυνδέουμε το στάτη από το δίκτυο μέσω ενός διακόπτη και έπειτα

βραχυκυκλώνουμε τα τυλίγματά του. Ως αποτέλεσμα, μπορούμε μέσω του μετατροπέα, που είναι συνδεδεμένος στο δρομέα, να ελέγξουμε τη μαγνητική ροή της μηχανής, καθώς αυτή λειτουργεί ως γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού (με τον κλωβό να βρίσκεται στο στάτη αντί του δρομέα).

2.4 Αεροδυναμικό μοντέλο ανεμογεννήτριας

Η μηχανική ενέργεια που αντλεί μία ανεμογεννήτρια από τον άνεμο δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_{wt} = \frac{\rho}{2} \cdot A_{wt} \cdot C_p(\lambda, \theta) \cdot V_w^3 \quad (2.59)$$

Όπου

- P_{wt} είναι η μηχανική ενέργεια που απορροφά η α/γ από τον άνεμο
- ρ είναι η πυκνότητα του αέρα
- C_p είναι ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος
- θ είναι η γωνία βήματος
- A_{wt} είναι η επιφάνεια που προκύπτει από την περιστροφή των πτερυγίων
- V_w είναι η ταχύτητα του ανέμου
- λ είναι ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου

Για το λόγο ταχύτητα ακροπτερυγίου έχουμε:

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega_r}{V_w} \quad (2.60)$$

Όπου R είναι η ακτίνα της έλικας και ω_r η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα.

Παρατηρούμε ότι η ταχύτητα του ανέμου είναι ο σημαντικότερος παράγοντας της συνολικής ισχύος που απορροφά η ανεμογεννήτρια. Οπότε

οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι απότομες μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου θα έχουν σημαντική επίπτωση στην παραγόμενη ισχύ της γεννήτριας.

Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος C_p είναι συνάρτηση του λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου και της γωνίας βήματος. Για να μεγιστοποιήσουμε την απορρόφηση ισχύος της ανεμογεννήτριας θα πρέπει να μεγιστοποιούμε τον αεροδυναμικό συντελεστή, ρυθμίζοντας κατάλληλα τα λ και θ .

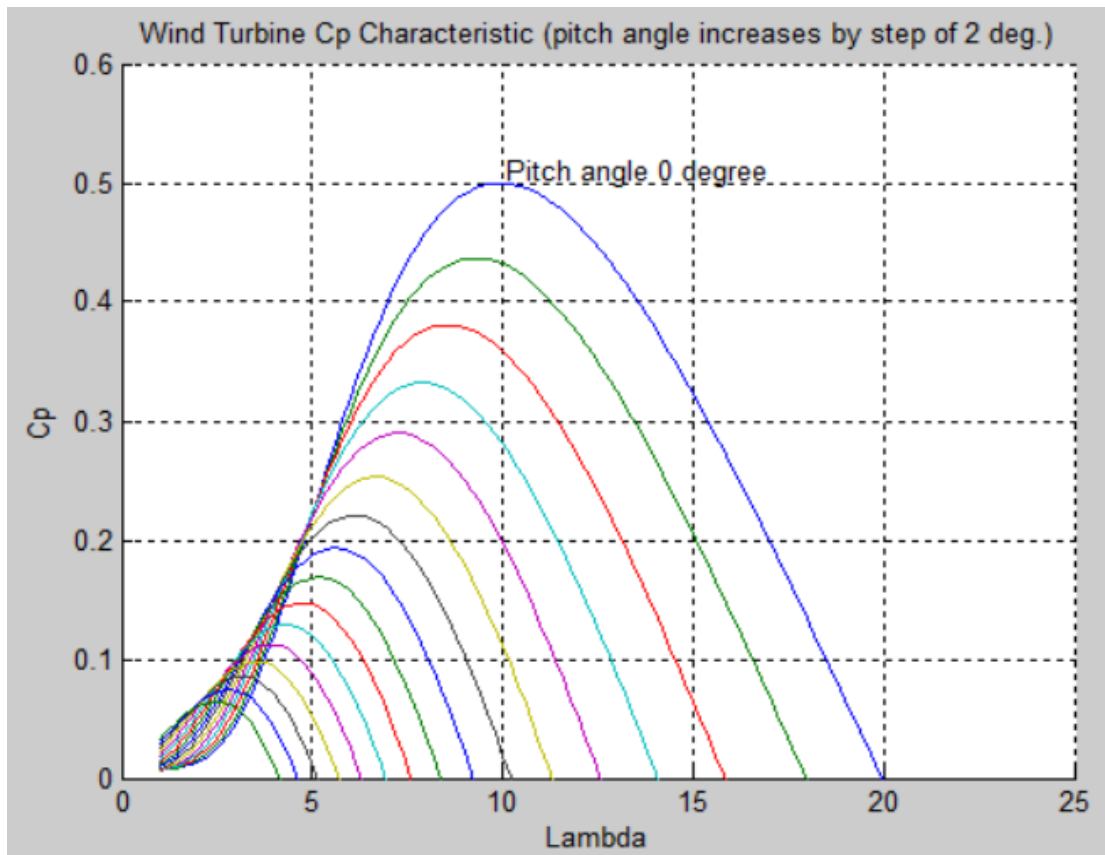
Η τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή υπολογίζεται προσεγγιστικά από την παρακάτω σχέση, και δεν μπορεί να ξεπεράσει το όριο Betz (59.3%), το οποίο δίνει το μεγαλύτερο δυνατό ποσοστό απορρόφησης της κινητικής ενέργειας του αέρα:

$$C_p(\lambda, \theta) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} 0.4\theta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (2.61)$$

Όπου για το λ_i ισχύει:

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\theta} - \frac{0.035}{\theta^3 + 1} \quad (2.62)$$

Με χρήση των παραπάνω σχέσεων μπορούμε να λάβουμε τις τιμές του αεροδυναμικού συντελεστή C_p σε σχέση το λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου, για κάποιες περιπτώσεις της γωνίας βήματος θ .



Εικόνα 2.10 – Καμπύλες αεροδυναμικού συντελεστή $C_p(\lambda, \theta)$

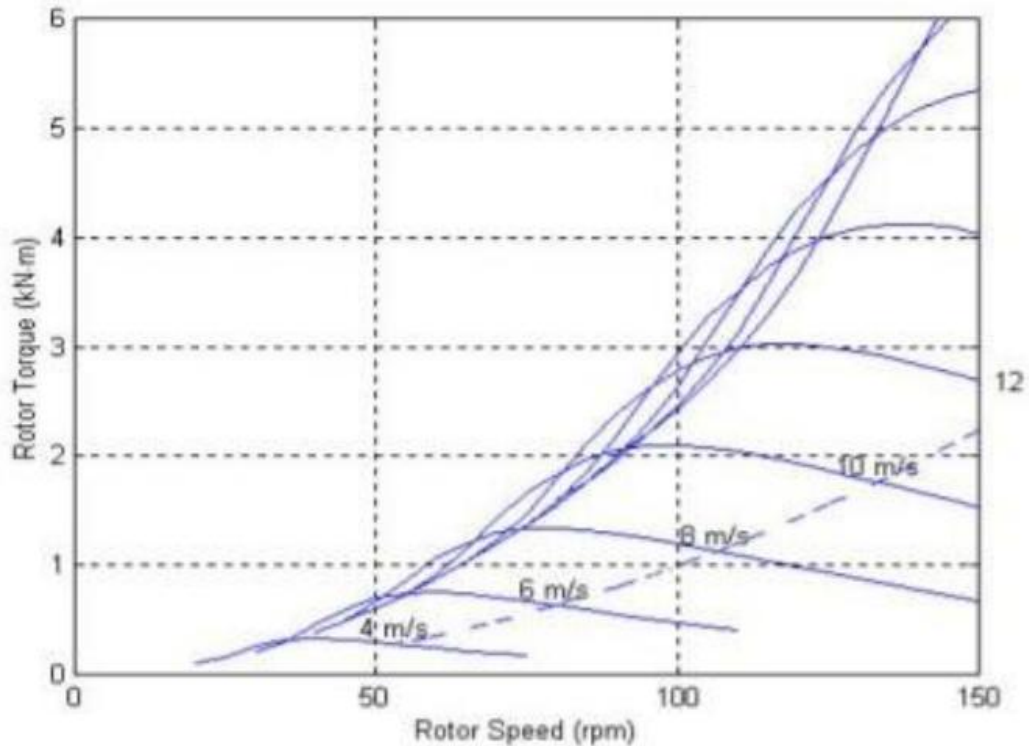
Παρατηρούμε ότι η βέλτιστη τιμή του συντελεστή ισχύος προκύπτει για γωνία βήματος ίση με μηδέν και ότι η αύξηση της γωνίας βήματος οδηγεί σε μείωση του αεροδυναμικού συντελεστή. Επιπλέον, η μέγιστη τιμή του C_p είναι ίση με 0.4382 ή 43.82%, δεν ξεπερνά δηλαδή το όριο του Betz.

Τέλος, καταλαβαίνουμε ότι για να επιτυγχάνεται μέγιστος αεροδυναμικός συντελεστής θα πρέπει να ρυθμίζεται ο λόγος ακροπτερυγίου, δηλαδή επιβεβαιώνουμε ότι η αποδοτικότερη λειτουργία της ανεμογεννήτριας απαιτεί τη ρύθμιση των στροφών ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου.

Δεδομένων των ανωτέρω και της σχέσης μεταξύ μηχανικής ισχύος και στροφών:

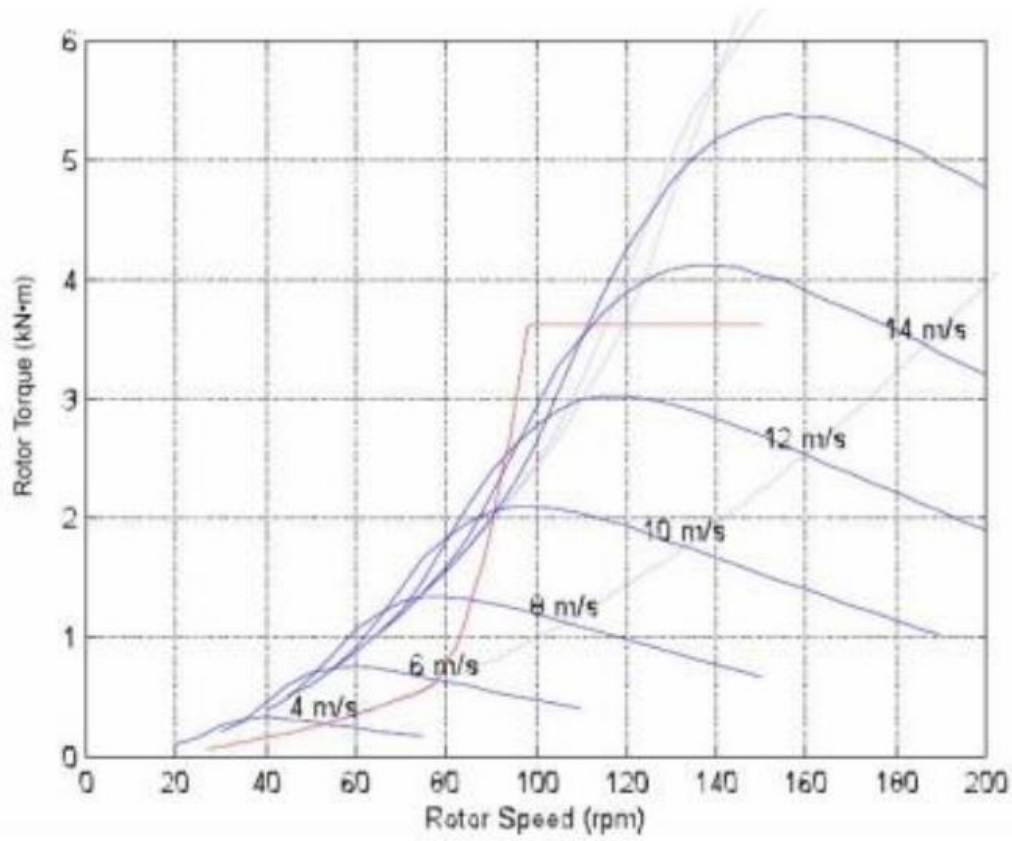
$$P_m = T_m \cdot \omega \cdot R \quad (2.63)$$

παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες ροπής-στροφών της α/γ , για βέλτιστο συντελεστή ισχύος σε διάφορες ταχύτητες περιστροφής του δρομέα.



Εικόνα 2.11 – Διάγραμμα ροπής-στροφών ανά ταχύτητα δρομέα σε διάφορες ταχ. ανέμου

Τα σημεία μέγιστης ισχύος για τις παραπάνω καμπύλες προκύπτουν από το γινόμενο της ροπής με την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Τα σημεία αυτά κείτονται επί της διακεκομμένης γραμμής που παρουσιάζεται στο παραπάνω σχήμα και αποτελούν τη βέλτιστη καμπύλη ροπής-στροφών, η οποία και χρησιμοποιείται για τη λειτουργία της α/γ σε ισχείς αρκετά χαμηλότερες της ονομαστικής, όπου δε χρειάζεται να περιοριστούν οι στροφές του δρομέα για να προστατευτεί η α/γ από μηχανικές καταπονήσεις. Σε μεγαλύτερες ισχείς περιορίζονται οι στροφές του δρομέα ώστε να μην υπερβούν τις ονομαστικές, οπότε προκύπτει η κόκκινη καμπύλη του παρακάτω σχήματος.



Εικόνα 2.12 – Διάγραμμα ροπής-στροφών ανά ταχύτητα δρομέα και (κόκκινη) καμπύλη σημείων λειτουργίας

Κεφάλαιο 3 Σύστημα ελέγχου

Μία ανεμογεννήτρια με μηχανή επαγωγής σε διάταξη διπλής τροφοδότησης προσφέρει, όπως έχουμε δει στα προηγούμενα κεφάλαια, μία σειρά πλεονεκτημάτων ως προς τις εναλλακτικές μεθόδους παραγωγής ενέργειας από τον άνεμο. Για να εκμεταλλευτούμε τα πλεονεκτήματα αυτά, απαιτείται ένα σύστημα ελέγχου ικανό να κατευθύνει την α/γ στην επιθυμητή κατάσταση λειτουργίας, ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες του ανέμου και του δικτύου.

Βασικοί σκοποί του ελέγχου είναι η ρύθμιση της παραγόμενης ενεργού ισχύος, ο εντοπισμός του σημείου βέλτιστης λειτουργίας, ο περιορισμός της ισχύος υπό υψηλές ταχύτητες ανέμου και η ρύθμιση της αέργου ισχύος που ανταλλάσσεται με το δίκτυο.

Λόγω των εγγενών ηλεκτρικών και μηχανικών χαρακτηριστικών ενός συστήματος ανεμογεννήτριας, μπορεί να γίνει μία βασική διάκριση των επιπέδων ελέγχου σύμφωνα με τους χρόνους απόκρισης της διάταξης στις ρυθμίσεις του ελέγχου.

Προκύπτουν με αυτό τον τρόπο δύο επίπεδα ελέγχου:

Ένα επίπεδο γρήγορης απόκρισης, που αφορά τον ανεξάρτητο έλεγχο της ενεργής και της αέργου ισχύος, και έχει μικρές σταθερές χρόνου λόγω της ηλεκτρικής του φύσης. Εδώ εντάσσεται ο ηλεκτρικός έλεγχος της γεννήτριας και των μετατροπών ισχύος, ο οποίος υλοποιείται μέσω δύο ελεγκτών, έναν για κάθε μετατροπή.

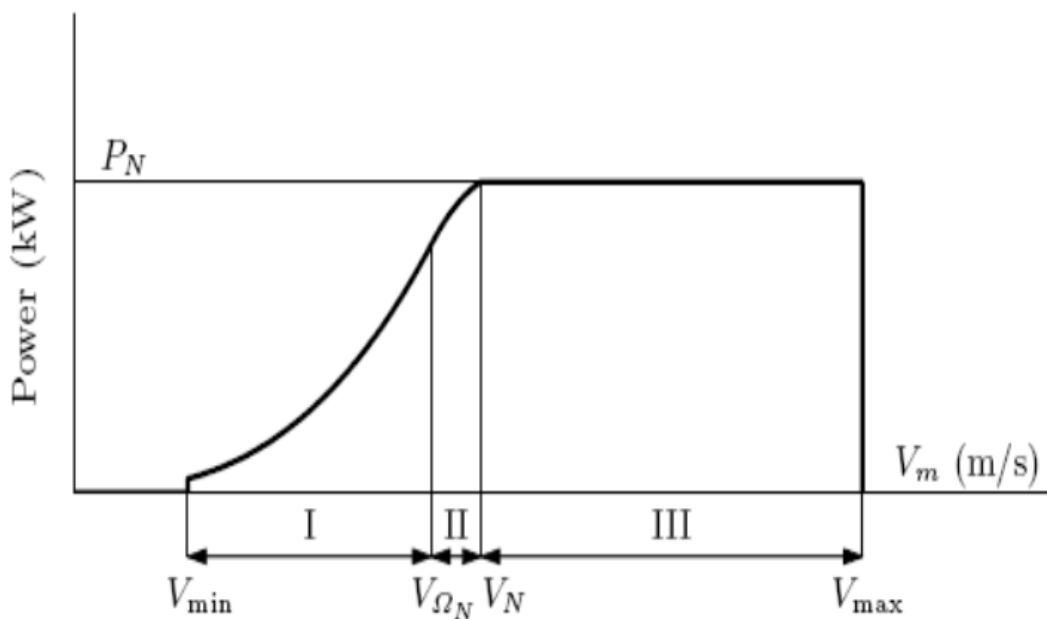
Το δεύτερο επίπεδο, με μεγαλύτερες χρονικές σταθερές λόγω των μηχανικών χαρακτηριστικών του, αφορά τον έλεγχο της γωνίας βήματος των πτερυγίων και την εύρεση του χαρακτηριστικού σημείου λειτουργίας μέγιστης ισχύος. Υλοποιείται μέσω δύο συζευγμένων ελεγκτών που ρυθμίζουν την ταχύτητα και την ενεργό ισχύ και παρέχουν ένα σήμα αναφοράς για τη γωνία βήματος των πτερυγίων και ένα σήμα αναφοράς της ενεργού ισχύος που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των μετατροπών.

Η μέθοδος ελέγχου σχεδιάζεται αρχικά για τις κανονικές συνθήκες λειτουργίας και σε επόμενο κεφάλαιο θα εξετάσουμε παραλλαγές της μεθόδου ελέγχου που χρησιμοποιούνται για την παραμονή των γεννητριών σε λειτουργία σε περιπτώσεις πτώσης τάσεως του δικτύου.

3.1 Έλεγχος μηχανικού μέρους ανεμογεννήτριας

Ο έλεγχος στο επίπεδο της ανεμογεννήτριας αποσκοπεί στην βέλτιστη παραγωγή ενεργού ισχύος, εξασφαλίζοντας παράλληλα την ασφαλή λειτουργία της διάταξης, τον περιορισμό των εκπομπών ήχου στα ανεκτά επίπεδα και τη διατήρηση της ποιότητας της παραγόμενης ισχύος.

Η χωρητικότητα της παραγωγής, η οποία περιγράφει την ποσότητα της ισχύος που μπορεί να απορροφηθεί από τον άνεμο, συνυπολογίζοντας τους φυσικούς και οικονομικούς περιορισμούς, συνήθως καθορίζεται από μία ιδεατή καμπύλη δυνατότητας παραγωγής ισχύος ανά ταχύτητα ανέμου. Μία τέτοια καμπύλη παρουσιάζεται στην εικόνα 3.1.



Εικόνα 3.1 – Ιδεατή παραγωγή ισχύος ανά ταχύτητα ανέμου

Παρατηρείται ότι η καμπύλη οριοθετείται από την ελάχιστη και μέγιστη ταχύτητα ανέμου κατά την οποία, βάση των οικονομοτεχνικών περιορισμών, επιτρέπεται η λειτουργία της γεννήτριας.

Σε ταχύτητες ανέμου μικρότερες της ταχύτητας έναυσης (cut in speed) η παραγόμενη ισχύς δεν καλύπτει τις απώλειες και το κόστος λειτουργίας της γεννήτριας. Συνήθως η ταχύτητα έναυσης κυμαίνεται μεταξύ ταχυτήτων ανέμου 3 έως 5 m/s, αλλά η συγκεκριμένη τιμή εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας. Διευκρινίζεται ότι η ταχύτητα έναυσης δεν είναι ίδια με την ταχύτητα εκκίνησης, κατά την οποία είναι δυνατή η περιστροφή των πτερυγίων από τον άνεμο.

Σε ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ταχύτητας αποκοπής (cut out speed) η γεννήτρια τίθεται εκτός λειτουργίας για να προστατευτεί από μηχανικές καταπονήσεις και υπερφόρτωση. Το όριο αυτό τίθεται στην ταχύτητα ανέμου εκείνη, πάνω από την οποία κρίνεται ότι η λειτουργία της ανεμογεννήτριας απαιτεί ασύμφορα αυξημένο κόστος κατασκευής ώστε να αντέχει τις απαιτούμενες μηχανικές πιέσεις.

Επιπλέον των ορίων λειτουργίας που θέτει η ταχύτητα ανέμου, παρατηρείται ότι για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής ταχύτητας V_N , η καμπύλη της ισχύος διατηρείται σταθερή και ίση με την ονομαστική ισχύ της ηλεκτρικής μηχανής που χρησιμοποιείται. Αυτό συμβαίνει για την προστασία της γεννήτριας από υπερφόρτωση. Όπως και με τους προηγούμενους περιορισμούς, τα κριτήρια που οδηγούν στην επιλογή του μεγέθους της γεννήτριας είναι οικονομοτεχνικά.

Η ιδανική καμπύλη ισχύος χωρίζεται σε τρεις περιοχές λειτουργίας, σε κάθε μία από τις οποίες ο έλεγχος διασφαλίζει την λειτουργία εντός των ορίων των εκάστοτε περιορισμών.

- Στην πρώτη περιοχή (περιοχή I του σχήματος 3.1) η διαθέσιμη ισχύς του ανέμου είναι μικρότερη από την ονομαστική ισχύ της γεννήτριας και στόχος του ελέγχου είναι να διατηρήσει τη λειτουργία στο σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος.
- Στην τρίτη περιοχή (περιοχή III του σχήματος 3.1) η διαθέσιμη ισχύς του ανέμου είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική ισχύ της γεννήτριας και στόχος του ελέγχου είναι ο περιορισμός της παραγόμενης ισχύος ώστε να αποφευχθεί η υπερφόρτωση.
- Στη δεύτερη περιοχή (περιοχή II του σχήματος 3.1) η διαθέσιμη ισχύς του ανέμου είναι μεν μικρότερη από την ονομαστική ισχύ της γεννήτριας, αλλά περιορίζεται η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα ώστε είτε να μην ξεπεραστεί το ανεκτό όριο θορύβου είτε να προστατευθεί ο δρομέας από μηχανικές καταπονήσεις λόγω υψηλής ταχύτητας περιστροφής. Η περιοχή αυτή λειτουργίας μπορεί να παραλείπεται εφόσον, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας, οι περιορισμοί της δεν παραβιάζονται επεκτείνοντας την περιοχή I μέχρι την περιοχή III.

Στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου ο σκοπός του ελέγχου είναι η λειτουργία στο σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει να μεγιστοποιηθεί ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p της ανεμογεννήτριας. Όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο αεροδυναμικός συντελεστής μεγιστοποιείται για μηδενική γωνία βήματος και με κατάλληλη ρύθμιση του λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου. Συνεπώς για τις χαμηλές ταχύτητες ανέμου

το σήμα αναφοράς της γωνίας βήματος των πτερυγίων θα είναι μηδενικό και η ταχύτητα του δρομέα θα ρυθμίζεται ανάλογα με την ταχύτητα ανέμου για να επιτυγχάνεται ο βέλτιστος λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου.

Για καλύτερη εποπτεία, παρουσιάζονται ξανά κάποιες σχέσεις του αεροδυναμικού μέρους της γεννήτριας από το προηγούμενο κεφάλαιο:

$$P_{wt} = \frac{\rho}{2} \cdot A_{wt} \cdot C_p(\lambda, \theta) \cdot V_w^3 \quad (2.59)$$

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega_r}{V_w} \quad (2.60)$$

Για μηδενική γωνία βήματος ($\theta=0$) ο βέλτιστος αεροδυναμικός συντελεστής $C_{p,opt}$ αντιστοιχεί σε ένα βέλτιστο λόγο ακροπτερυγίου λ_{opt} . Οπότε μπορούμε να αντικαταστήσουμε, στη σχέση της ισχύος, την τιμή του ανέμου βάσει του τύπου:

$$V_w = \frac{R \cdot \omega_r}{\lambda_{opt}} \quad (3.1)$$

Λαμβάνοντας:

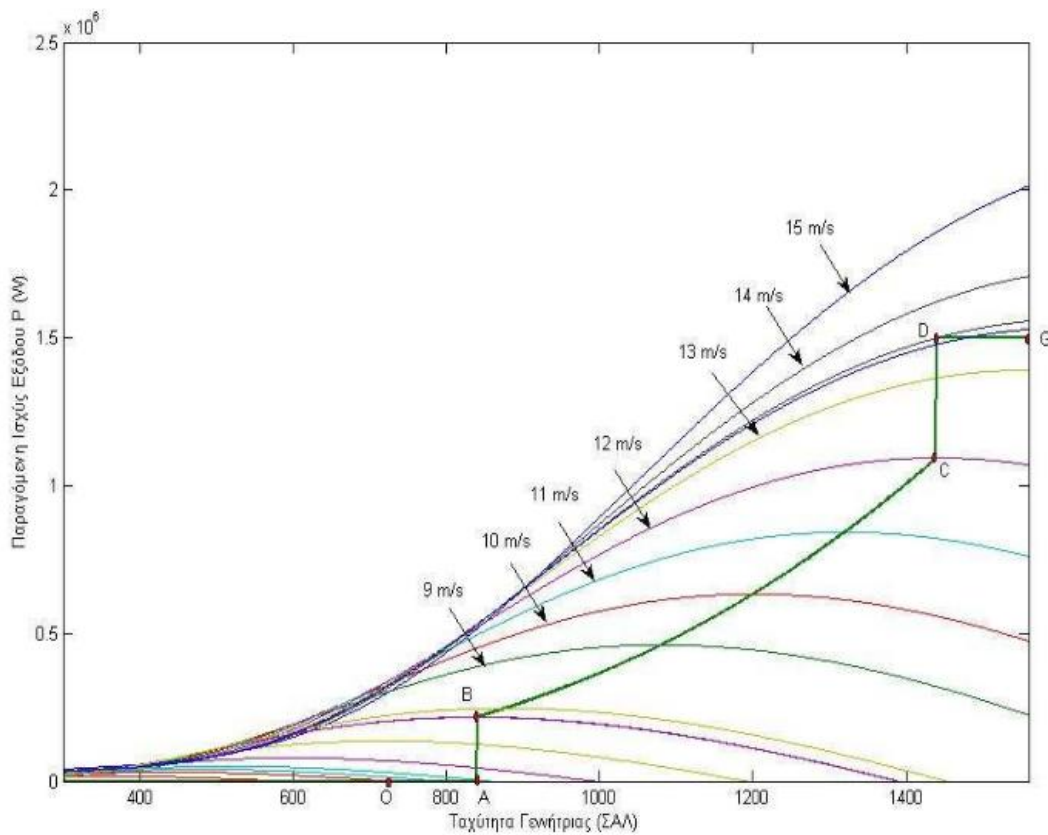
$$P_{wt,opt} = \frac{\rho}{2} \cdot A_{wt} \cdot C_{p,opt} \cdot \left(\frac{R \cdot \omega_r}{\lambda_{opt}} \right)^3 \quad (3.2)$$

Δηλαδή έχουμε μία σχέση της μορφής $P_{wt,opt}(\omega_r)$, οπότε μέσω της ιδανικής καμπύλης της παραγόμενης ισχύος μπορούμε για κάθε τιμή της ταχύτητας ανέμου να υπολογίσουμε την αντίστοιχη ταχύτητα περιστροφής του δρομέα ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη λειτουργία.

Καθώς στη διάταξη διπλής τροφοδότησης το μειωμένο μέγεθος του μετατροπέα θέτει όρια στο εύρος των στροφών όπου είναι δυνατό να λειτουργήσει ο δρομέας, ο έλεγχος στην περιοχή I ενδέχεται να μην είναι εφικτό να ακολουθεί το σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος σε όλο το φάσμα

της περιοχής. Για το λόγο αυτό, σε ταχύτητες ανέμου λίγο πάνω από την ταχύτητα έναυσης τίθεται μία ελάχιστη ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, και για ένα περιορισμένο εύρος ταχυτήτων πάνω από την ταχύτητα έναυσης η μηχανή λειτουργεί με σταθερή περιστροφική ταχύτητα. Αντίστοιχα, σε ταχύτητες ανέμου μικρότερες της ονομαστικής, και κοντά στην ονομαστική ταχύτητα του ανέμου, περιορίζεται η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα λόγω των ορίων θορύβου. Στο διάστημα αυτό των ταχυτήτων ανέμου η μηχανή λειτουργεί με σταθερή περιστροφική ταχύτητα και η αύξηση της παραγόμενης ισχύος επιτυγχάνεται με αύξηση της ροπής.

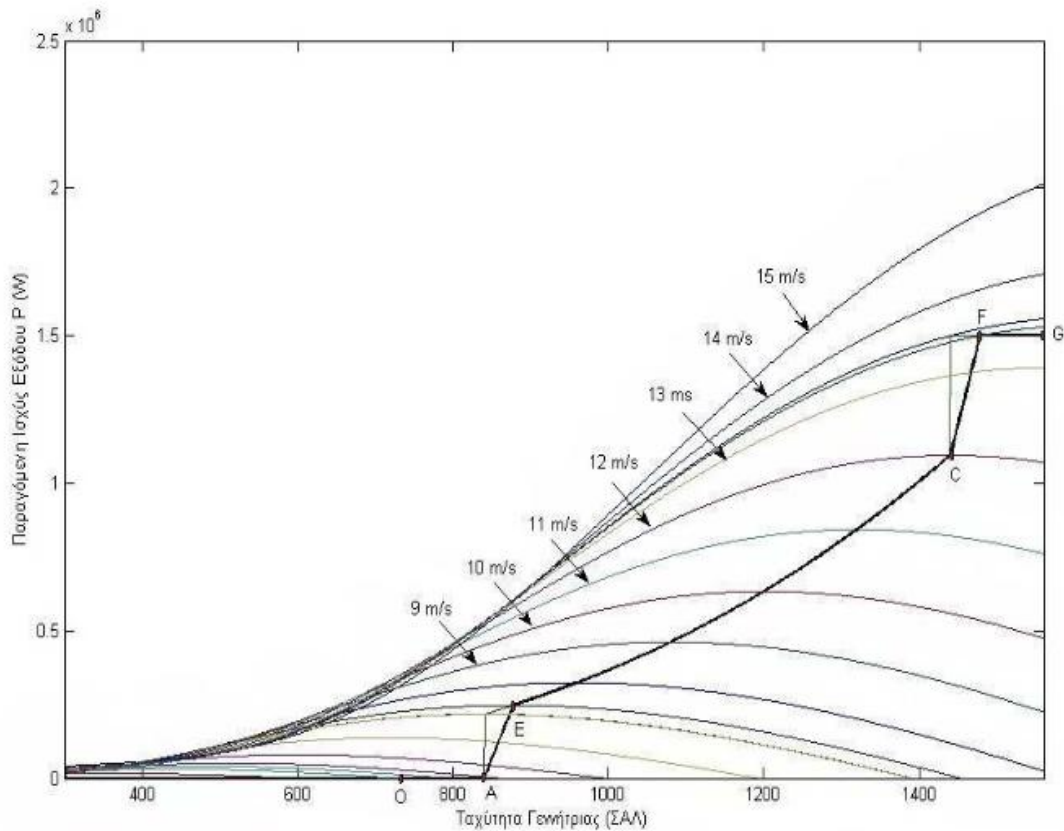
Το παρακάτω σχήμα 3.2 απεικονίζει την καμπύλη παραγόμενης ισχύος ανάλογα με την περιστροφική ταχύτητα της μηχανής.



Εικόνα 3.2 – Καμπύλη ισχύος εξόδου ανά ταχύτητα μηχανής

Η παραπάνω καμπύλη λειτουργίας παρουσιάζει το μειονέκτημα ότι οι ασυνέχειες στα σημεία της ταχύτητας έναυσης και της ονομαστικής ταχύτητας τους ανέμου, προκαλούν μεγάλες αποκλίσεις στην τιμή της ισχύος για μικρές μεταβολές της ταχύτητας ανέμου. Για να πετύχουμε ομαλότερη λειτουργία στα σημεία αυτά, θα αποφύγουμε τις ασυνέχειες μεταβάλλοντας την καμπύλη λειτουργίας σύμφωνα με το σχήμα 3.3. Οι ασυνέχειες στα σημεία της ταχύτητας έναυσης και της ονομαστικής ταχύτητας έχουν παρακαμφθεί,

αντικαθιστώντας την σταθερή ταχύτητα περιστροφής στα σημεία αυτά με ένα περιορισμένο εύρος ταχυτήτων περιστροφής.

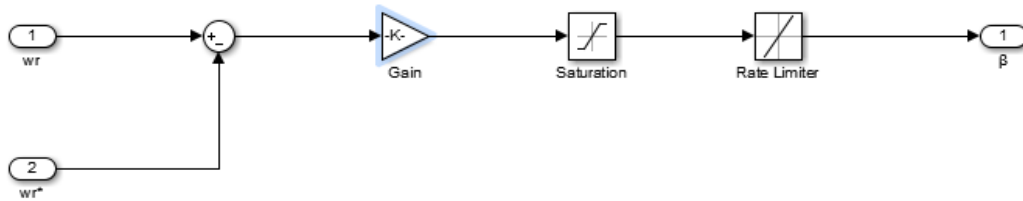


Εικόνα 3.3 – Χαρακτηριστική καμπύλη ελέγχου ισχύος εξόδου ανά ταχύτητα μηχανής

Για τις υψηλές ταχύτητες ανέμου, δηλαδή για ταχύτητες άνω της ονομαστικής ταχύτητας του ανέμου, η γεννήτρια λειτουργεί με ονομαστική ταχύτητα περιστροφής και ο περιορισμός της ισχύος επιτυγχάνεται με τη μείωση του αεροδυναμικού συντελεστή. Η μείωση του C_p υλοποιείται αυξάνοντας τη γωνία βήματος θ των πτερυγίων. Ο ελεγκτής βήματος που θα χρησιμοποιηθεί παρουσιάζεται παρακάτω.

3.1.1 Ελεγκτής βήματος γωνίας πτερυγίων

Πέρα από το ανώτερο όριο της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα, το οποίο αντιστοιχεί στο σημείο λειτουργίας όπου η μηχανή παράγει ονομαστική ισχύ, η γωνία βήματος αυξάνεται ανάλογα με την απόκλιση της ταχύτητας ανέμου από την ονομαστική ταχύτητα V_N .



Εικόνα 3.4 – Διάγραμμα ελεγκτή βήματος στο Matlab Simulink

Η σημαντικότερη παράμετρος του ελεγκτή της γωνίας βήματος είναι η δυνατότητά του να ανταποκριθεί τάχιστα σε μεταβολές της ροπής που παράγεται από τον αέρα. Ως αποτέλεσμα ο σερβοκινητήρας σε συνδυασμό με τον υπόλοιπο μηχανισμό που ρυθμίζει τις γωνίες των πτερυγίων πρέπει να ανταποκρίνεται σε ταχείες μεταβολές. Καθώς οποιοσδήποτε μηχανισμός και να χρησιμοποιηθεί θα υπόκειται σε τεχνικούς περιορισμούς σχετικά με τις δυνατότητες απόκρισής του, στο μοντέλο υλοποίησης του μηχανισμού τίθεται όριο στην ταχύτητα μεταβολής της γωνίας βήματος και στο μέγεθος της γωνίας κλίσης των πτερυγίων.

Για τον ανωτέρω ελεγκτή επιλέχθηκαν τα μεγέθη:

$\theta_{\max} = 45^\circ$, όπου θ_{\max} είναι η μέγιστη γωνία βήματος των πτερυγίων

$\frac{d}{dt} \theta = 2$, η μέγιστη ταχύτητα μεταβολής της γωνίας βήματος

$K_p = 500$, το κέρδος του ελεγκτή βήματος.

3.1.2 Περιοχές λειτουργίας της α/γ και χαρακτηριστικές καμπύλες μεγεθών

Συνοψίζουμε τις περιοχές λειτουργίας όπως προκύπτουν από την καμπύλη λειτουργίας που επιλέχθηκε.

- Μερική λειτουργία φορτίου με σταθερή ταχύτητα αναφοράς στο χαμηλό όριο:

Σε αυτή την περιοχή λειτουργίας, η οποία αντιστοιχεί σε ταχύτητες ανέμου λίγο πάνω της ταχύτητας έναυσης, η ταχύτητα περιστροφής βάση της λειτουργίας μέγιστης παραγωγής ισχύος δεν ξεπερνά το κατώτερο όριο περιστροφής που τίθεται από το εύρος ταχυτήτων που επιτρέπει το μέγεθος του μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα:

$$\omega_r \leq \omega_{r,min}$$

Επομένως, θέτουμε ως ταχύτητα αναφοράς το κάτω όριο της ταχύτητας περιστροφής, και η βέλτιστη παραγωγή ισχύος θα επιτευχθεί με μηδενική γωνία βήματος και τον αποδοτικότερο δυνατό λόγο ακροπτερυγίων:

$$\omega_{r,ref} = \omega_{r,min}$$

$$\lambda(V_w) = \frac{\omega_{r,min} R}{V_w}$$

$$\theta = 0^\circ$$

- Μερική λειτουργία φορτίου με μεταβλητή ταχύτητα αναφοράς:

Στην περιοχή αυτή, η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα κυμαίνεται μεταξύ της κατώτερης τιμής και της ονομαστικής:

$$\omega_{r,min} \leq \omega_r \leq \omega_{r,N}$$

Εδώ, μεγιστοποιείται ο αεροδυναμικός συντελεστής ώστε να λάβουμε τη μέγιστη δυνατή παραγόμενη ισχύ για κάθε ταχύτητα ανέμου.

$$\omega_{r,ref}(V_w) = \frac{\lambda_{opt} V_w}{R}$$

$$P_{wt,opt}(V_w) = \frac{\rho}{2} \cdot A_{wt} \cdot C_{p,opt} \cdot \left(\frac{R \cdot \omega_{r,ref}(V_w)}{\lambda_{opt}} \right)^3$$

- Μερική λειτουργία φορτίου με σταθερή ταχύτητα αναφοράς στο υψηλό όριο:

Η περιοχή αυτή αφορά λειτουργία στο άνω όριο του εύρους στροφών του δρομέα και για παραγόμενη ισχύ μικρότερη της ονομαστικής:

$$\omega_{r,ref} = \omega_{r,N}$$

$$P_{wt} < P_{wt,N}$$

Εδώ ο βέλτιστος αεροδυναμικός συντελεστής επιτυγχάνεται, για λειτουργία στην ονομαστική ταχύτητα περιστροφής, με μηδενική γωνία βήματος.

$$\omega_{r,ref} = \omega_{r,N}$$

$$\lambda(V_w) = \frac{\omega_{r,N}R}{V_w}$$

$$\theta = 0^\circ$$

- Λειτουργία πλήρους φορτίου:

Σε αυτή την περιοχή λειτουργίας, οι ταχύτητες ανέμου είναι μεγαλύτερες της ονομαστικής. Το σήμα αναφοράς της ισχύος ορίζεται στην ονομαστική ισχύ της γεννήτριας και ο δρομέας περιστρέφεται με την ονομαστική ταχύτητα:

$$P_{wt,ref} = P_{wt,N}$$

$$\omega_{r,ref} = \omega_{r,N}$$

Η παραγωγή της ισχύος επιτυγχάνεται με μείωση του αεροδυναμικού συντελεστή. Γνωρίζοντας την απαιτούμενη μείωση του συντελεστή και το λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου, υπολογίζουμε την απαιτούμενη γωνία βήματος:

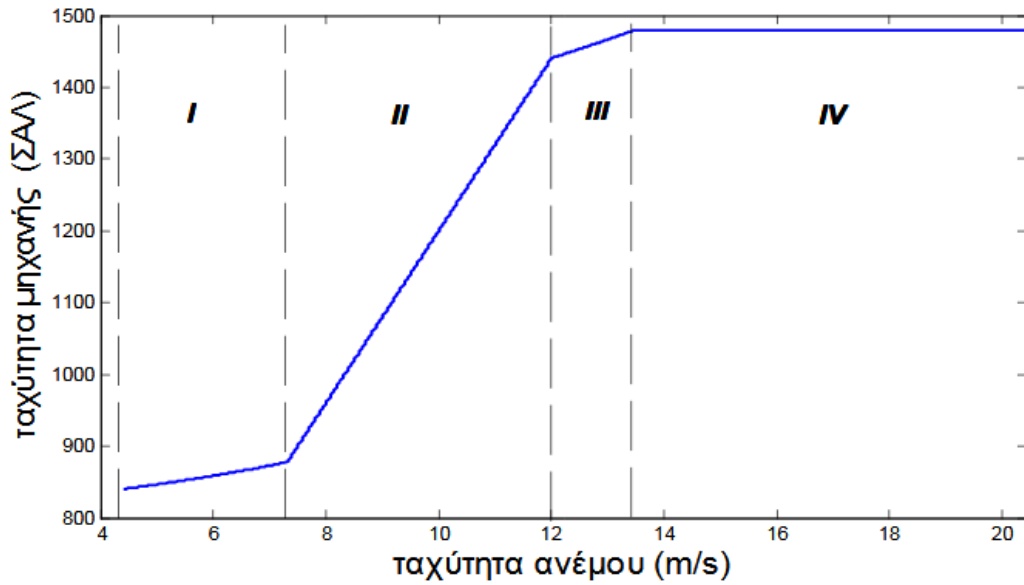
$$C_{p,ref}(\lambda) = \frac{2 P_{wt,ref} \lambda^3(V_w)}{\rho A_{wt} [R \omega_{r,N}]^3}$$

$$\lambda(V_w) = \frac{\omega_{r,N}R}{V_w}$$

$$C_p(\theta_{ref}, \lambda) = C_{p,ref}$$

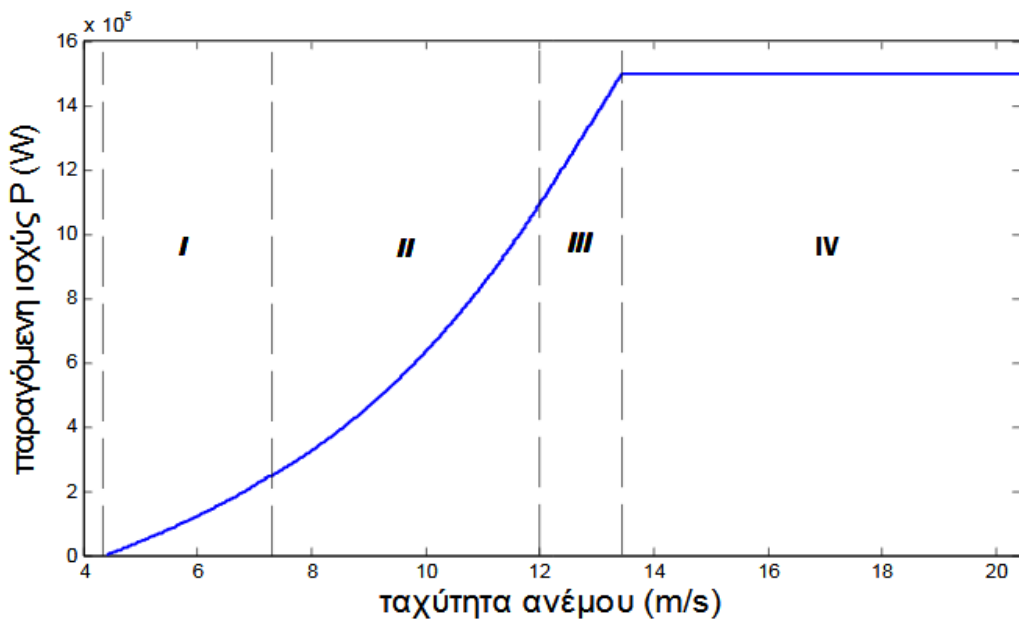
Ακολουθούν οι χαρακτηριστικές καμπύλες μεγεθών της α/γ ανά την ταχύτητα ανέμου.

Χαρακτηριστική ταχύτητας μηχανής:



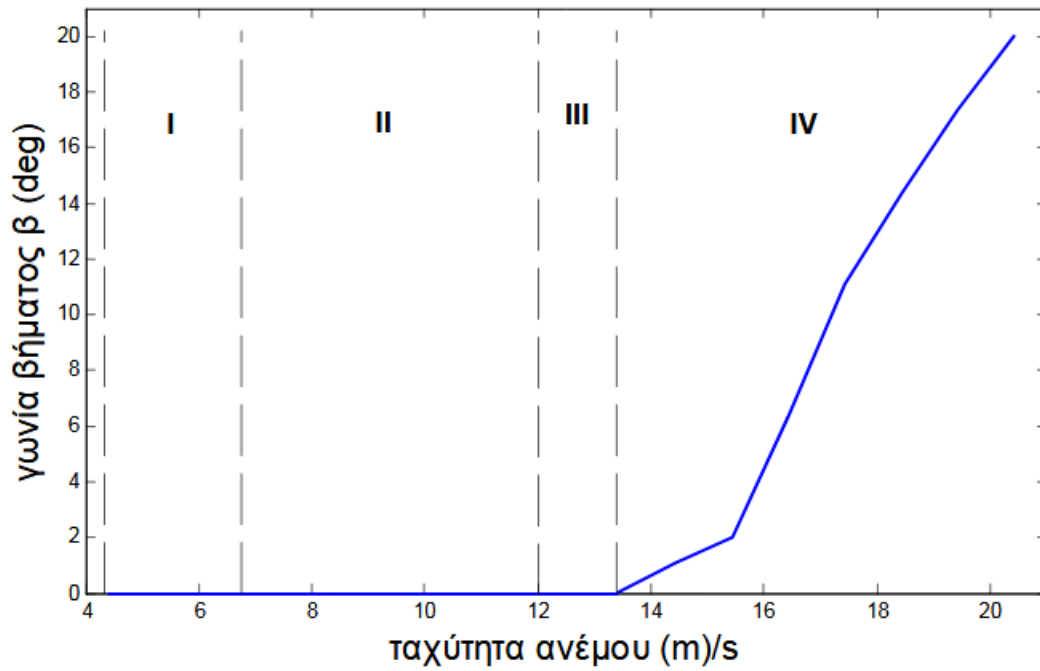
Εικόνα 3.5 – Χαρακτηριστική καμπύλη ταχύτητας μηχανής ανά ταχύτητα ανέμου

Χαρακτηριστική παραγόμενη ισχύος:



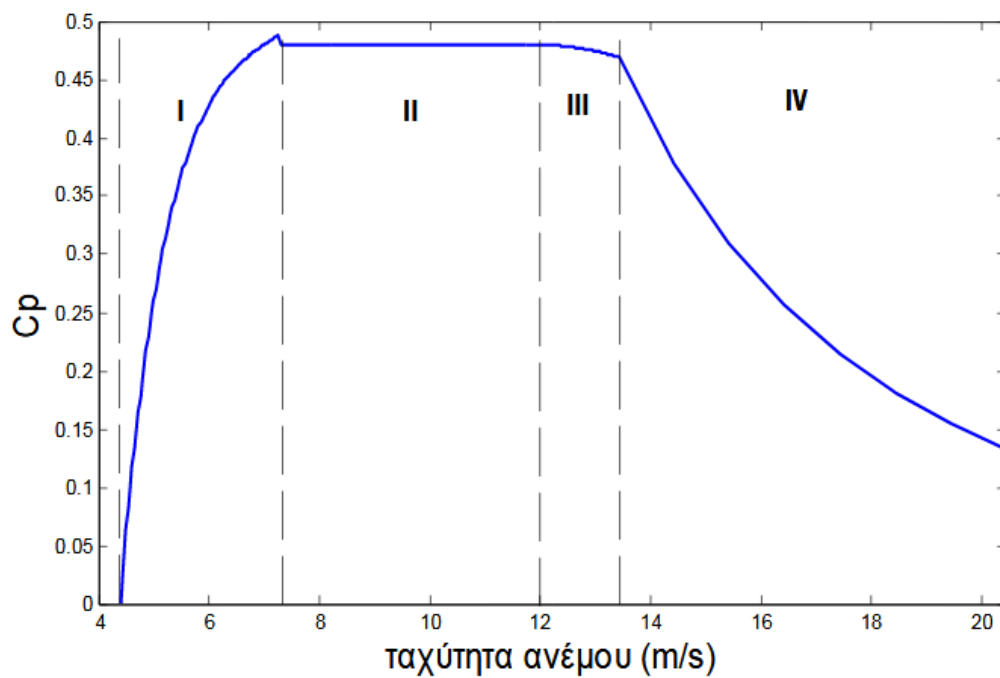
Εικόνα 3.6 – Χαρακτηριστική καμπύλη παραγόμενης ισχύος ανά ταχύτητα ανέμου

Χαρακτηριστική γωνίας βήματος:



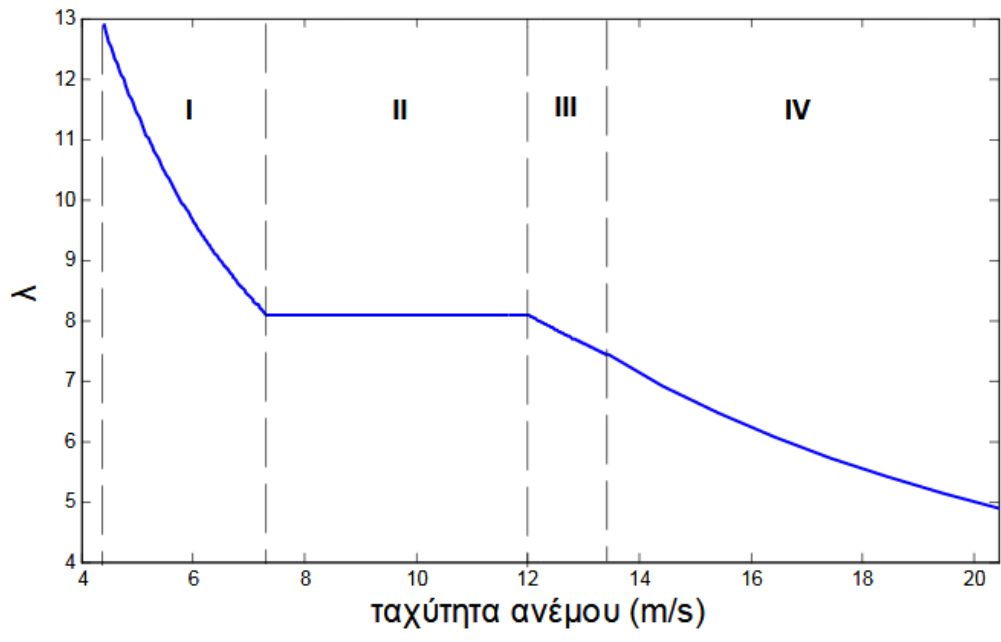
Εικόνα 3.7 – Χαρακτηριστική καμπύλη γωνίας βήματος ανά ταχύτητα ανέμου

Χαρακτηριστική αεροδυναμικού συντελεστή:



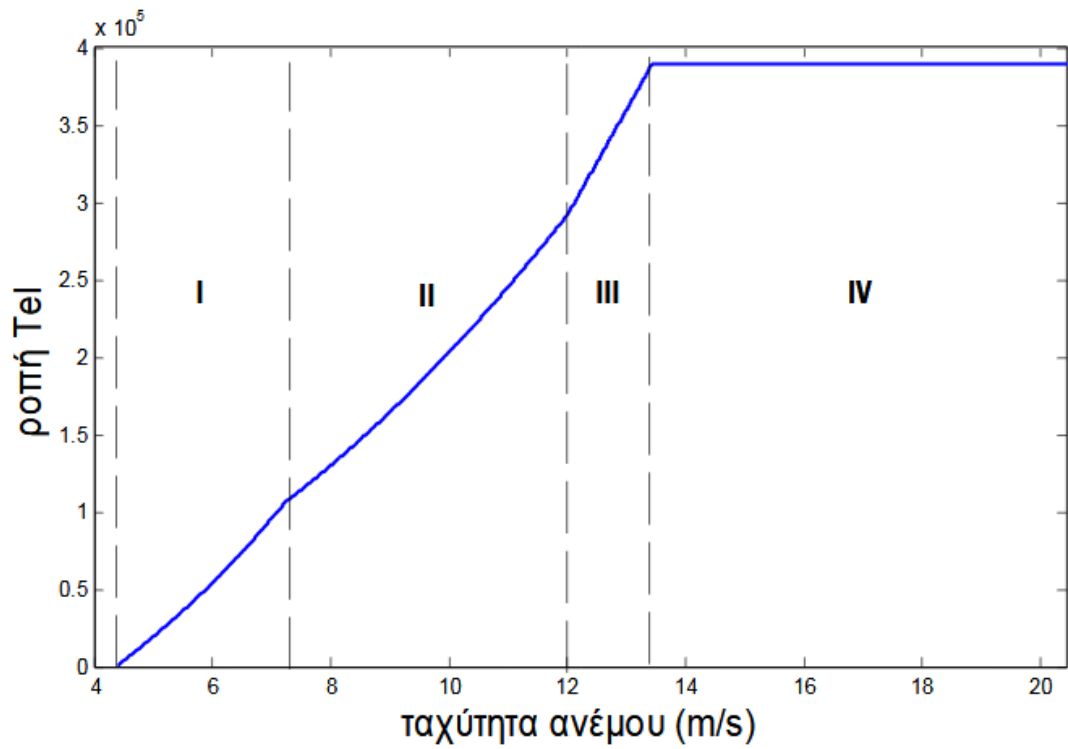
Εικόνα 3.8 – Χαρακτηριστική καμπύλη αεροδυναμικού συντελεστή ανά ταχύτητα ανέμου

Χαρακτηριστική λόγου ακροπτερυγίου:



Εικόνα 3.9 – Χαρακτηριστική καμπύλη λόγου ακροπτερυγίου ανά ταχύτητα ανέμου

Χαρακτηριστική ροπής:



Εικόνα 3.10 – Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής ανά ταχύτητα ανέμου

3.2 Έλεγχος μετατροπέων

3.2.1 Έλεγχος μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα

Ο μετατροπέας από την πλευρά του δρομέα, ελέγχει την ενεργό και άεργο ισχύ που παράγει η γεννήτρια. Ο έλεγχος της ισχύος επιτυγχάνεται έμμεσα, μέσω της ρύθμισης των ρευμάτων στα κυκλώματα του δρομέα, προσαρμόζοντας την τάση στην έξοδο του μετατροπέα.

Η ανάλυση των μεγεθών της διάταξης σε ένα σύστημα αναφοράς δύο αξόνων προσανατολισμένο προς τη ροή του στάτη επιτρέπει τον ανεξάρτητο έλεγχο της ενεργού και άεργου ισχύος. Το ρεύμα του δρομέα διαιρείται σε δύο συνιστώσες, μία παράλληλη και μία κάθετη στη ροή του στάτη. Ο βρόγχος ελέγχου είναι διπλός: ο εσωτερικός, ταχύτερος βρόγχος ρυθμίζει τις συνιστώσες του ρεύματος του δρομέα, συγκρίνοντας τις επιθυμητές τιμές με τις μετρούμενες. Ενώ ο εξωτερικός βρόγχος ρυθμίζει το επίπεδο της ενεργού και άεργου ισχύος συγκρίνοντας με τη μετρούμενη ισχύ.

Παρουσιάζουμε ξανά από το κεφάλαιο 2 τις εξισώσεις για το κύκλωμα του στάτη σε σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς αξόνων d-q :

$$V_{qs} = r_s \cdot i_{qs} + \omega_{qd0} \cdot \lambda_{ds} + p \cdot \lambda_{qs} \quad (2.41)$$

$$V_{ds} = r_s \cdot i_{ds} + \omega_{qd0} \cdot \lambda_{qs} + p \cdot \lambda_{ds} \quad (2.42)$$

$$\lambda_{qs} = (L_{ls} + L_M) \cdot i_{qs} + L_M \cdot i_{qr} \quad (2.47)$$

$$\lambda_{ds} = (L_{ls} + L_M) \cdot i_{ds} + L_M \cdot i_{dr} \quad (2.48)$$

Ο διανυσματικός έλεγχος θα πραγματοποιηθεί προσανατολίζοντας τον άξονα d του πλαισίου αναφοράς με τη μαγνητική ροή του στάτη. Θεωρώντας την τάση V_{qds} στο στάτη σταθερή ως προς τα χαρακτηριστικά της (πλάτος, συχνότητα, φάση), λόγω του ότι παρέχεται από το δίκτυο, λαμβάνουμε ότι η μαγνητική ροή λ_{qds} είναι σταθερή. Και εφόσον ο προσανατολισμός της είναι ταυτόσημος με τον άξονα d έχουμε:

$$\lambda_{qs} = 0$$

$$\frac{d}{dt}\lambda_{qs} = 0$$

Οπότε μπορούμε να προχωρήσουμε στην απλοποίηση:

$$\lambda_{qds} = \lambda_{qs}$$

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω θα έχουμε για τις εξισώσεις του στάτη:

$$V_{qs} = r_s \cdot i_{qs} + \omega_{qd0} \cdot \lambda_{ds} \quad (3.3)$$

$$V_{ds} = r_s \cdot i_{ds} + p \cdot \lambda_{ds} \quad (3.4)$$

Και θεωρώντας αμελητέες τις αντιστάσεις στα τυλίγματα του στάτη ($r_s \rightarrow 0$), δεδομένου ότι η μαγνητική ροή διατηρείται σταθερή καταλήγουμε:

$$V_{qs} = \omega_{qd0} \cdot \lambda_{ds} \quad (3.5)$$

$$V_{ds} = 0 \quad (3.6)$$

Ας εξετάσουμε τώρα την ισχύ στο στάτη. Έχουμε τις εξισώσεις:

$$P_s = \frac{3}{2}(V_{ds} \cdot i_{ds} + V_{qs} \cdot i_{qs}) \quad (3.7)$$

$$Q_s = \frac{3}{2}(V_{ds} \cdot i_{qs} + V_{qs} \cdot i_{ds}) \quad (3.8)$$

Από τον προσανατολισμό του πλαισίου αναφοράς έχουμε $V_d = 0$. Άρα:

$$P_s = \frac{3}{2}(V_{qs} \cdot i_{qs}) = \frac{3}{2} \cdot \omega_{qd0} \cdot \lambda_{ds} \cdot i_{qs} \quad (3.9)$$

$$Q_s = \frac{3}{2}(V_{qs} \cdot i_{ds}) = \frac{3}{2} \cdot \omega_{qd0} \cdot \lambda_{ds} \cdot i_{ds} \quad (3.10)$$

Και λαμβάνοντας υπόψη της εξισώσεις ροής:

$$i_{qr} = \frac{1}{L_M} (\lambda_{qs} - L_s \cdot i_{qs}) \rightarrow i_{qr} = \frac{1}{L_M} (-L_s \cdot i_{qs}) \quad (3.11)$$

$$i_{dr} = \frac{1}{L_M} (\lambda_{ds} - L_s \cdot i_{ds}) \quad (3.12)$$

Αντικαθιστούμε τις συνιστώσες ρεύματος του στάτη στις σχέσεις της ισχύος:

$$P_s = \frac{3}{2} \cdot \omega_{qd0} \cdot \lambda_{ds} \cdot \frac{L_M}{L_s} \cdot i_{qr} \quad (3.13)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} \cdot \omega_{qd0} \cdot \lambda_{ds} \cdot \frac{1}{L_s} (\lambda_{ds} - L_M \cdot i_{dr}) \quad (3.14)$$

Παρατηρούμε ότι οι παραπάνω εξισώσεις είναι σχέσεις της μορφής $P_s(i_{qr})$ και $Q_s(i_{dr})$, γεγονός που επιτρέπει τον ανεξάρτητο έλεγχο της παραγωγής ενεργού και αέργου ισχύος ρυθμίζοντας τις συνιστώσες q και d του ρεύματος του δρομέα αντίστοιχα.

Η ρύθμιση των ρευμάτων i_{qr} και i_{dr} του δρομέα επιτυγχάνεται από τον έλεγχο της τάσης στα άκρα των τυλιγμάτων του δρομέα, δηλ στην είσοδο του μετατροπέα. Έχουμε για το κύκλωμα του δρομέα από το κεφάλαιο 2:

$$V_{qr} = r_r \cdot i_{qr} + (\omega_{qd0} - \omega_r) \cdot \lambda_{dr} + p \cdot \lambda_{qr} \quad (2.44)$$

$$V_{dr} = r_r \cdot i_{dr} + (\omega_{qd0} - \omega_r) \cdot \lambda_{qr} + p \cdot \lambda_{dr} \quad (2.45)$$

$$\lambda_{qr} = L_M \cdot i_{qs} + (L_{lr} + L_M) \cdot i_{qr} \quad (2.50)$$

$$\lambda_{dr} = L_M \cdot i_{ds} + (L_{lr} + L_M) \cdot i_{dr} \quad (2.51)$$

Όπου τα μεγέθη του δρομέα είναι ανηγμένα στο στάτη, αλλά έχουμε παραλείψει τη σχετική σήμανση (').

Από τις σχέσεις των ροών του στάτη, που είδαμε και παραπάνω:

$$i_{qr} = \frac{1}{L_M} (\lambda_{qs} - L_s \cdot i_{qs}) \rightarrow i_{qr} = \frac{1}{L_M} (-L_s \cdot i_{qs}) \quad (3.15)$$

$$i_{dr} = \frac{1}{L_M} (\lambda_{ds} - L_s \cdot i_{ds}) \quad (3.16)$$

Αντικαθιστούμε τα ρεύματα του στάτη στις εξισώσεις ροών του δρομέα, και λαμβάνουμε:

$$\lambda_{qr} = \sigma \cdot L_r \cdot i_{qr} \quad (3.17)$$

$$\lambda_{dr} = \sigma \cdot L_r \cdot i_{dr} + \frac{L_M}{L_s} \lambda_{ds} \quad (3.18)$$

Όπου σ έχουμε θέσει το μέγεθος:

$$\sigma = 1 - \frac{L_M^2}{L_s \cdot L_r}$$

Με βάση τα παραπάνω και λαμβάνοντας υπόψη ότι η ροή στο στάτη είναι σταθερή, καταλήγουμε:

$$V_{qr} = r_r \cdot i_{qr} + \sigma \cdot L_r \cdot p \cdot i_{qr} + \omega_{slip} \left(\sigma \cdot L_r \cdot i_{dr} + \frac{L_M}{L_s} \lambda_{ds} \right) \quad (3.19)$$

$$V_{dr} = r_r \cdot i_{dr} - \omega_{slip} \cdot \sigma \cdot L_r \cdot i_{qr} + \sigma \cdot L_r \cdot p \cdot i_{dr} \quad (3.20)$$

Άρα οι εξισώσεις που πρέπει να υλοποιηθούν στο σύστημα ελέγχου για τον υπολογισμό του σήματος αναφοράς του μετατροπέα θα είναι οι εξής:

$$V_{qr}^* = V'_{qr} + \omega_{slip} \left(\sigma \cdot L_r \cdot i_{dr} + \frac{L_M}{L_s} \lambda_{ds} \right) \quad (3.21)$$

$$V_{dr}^* = V'_{dr} - \omega_{slip} \cdot \sigma \cdot L_r \cdot i_{qr} \quad (3.22)$$

Όπου με αστερίσκο σημειώνονται τα σήματα αναφοράς και με τόνο οι έξοδοι του βρόγχου ανατροφοδότησης.

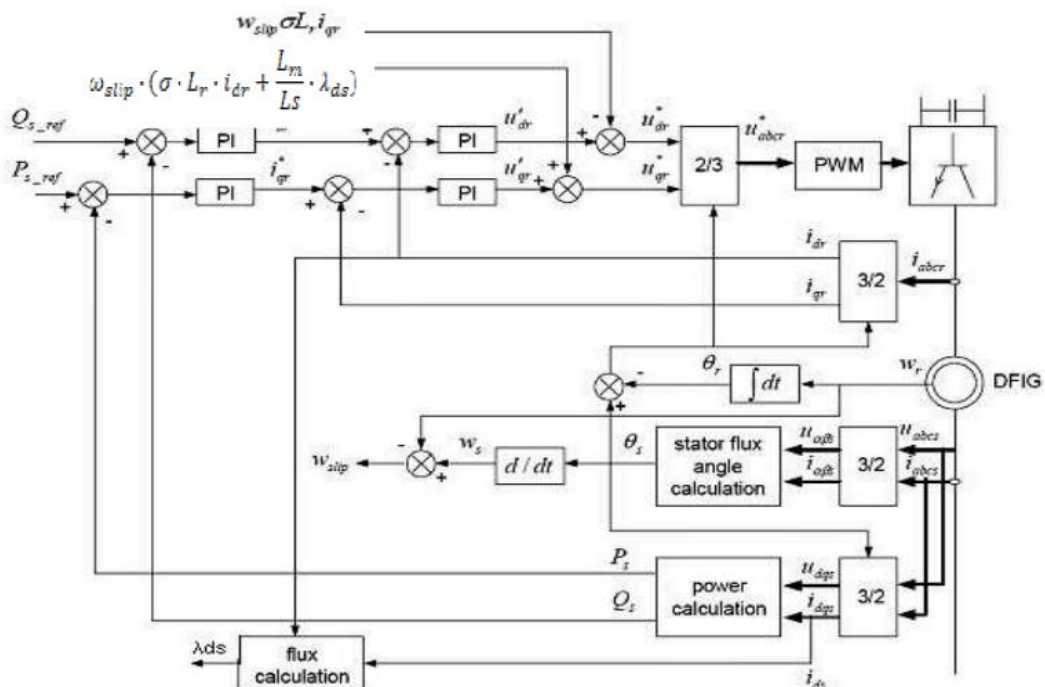
Η γωνία της ροής του στάτη (άρα και του πλαισίου αναφοράς) που χρησιμοποιείται στο σύστημα ελέγχου υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$\lambda_{\alpha s} = \int (V_{\alpha s} - r_s i_{\alpha s}) dt \quad (3.23)$$

$$\lambda_{\beta s} = \int (V_{\beta s} - r_s i_{\beta s}) dt \quad (3.24)$$

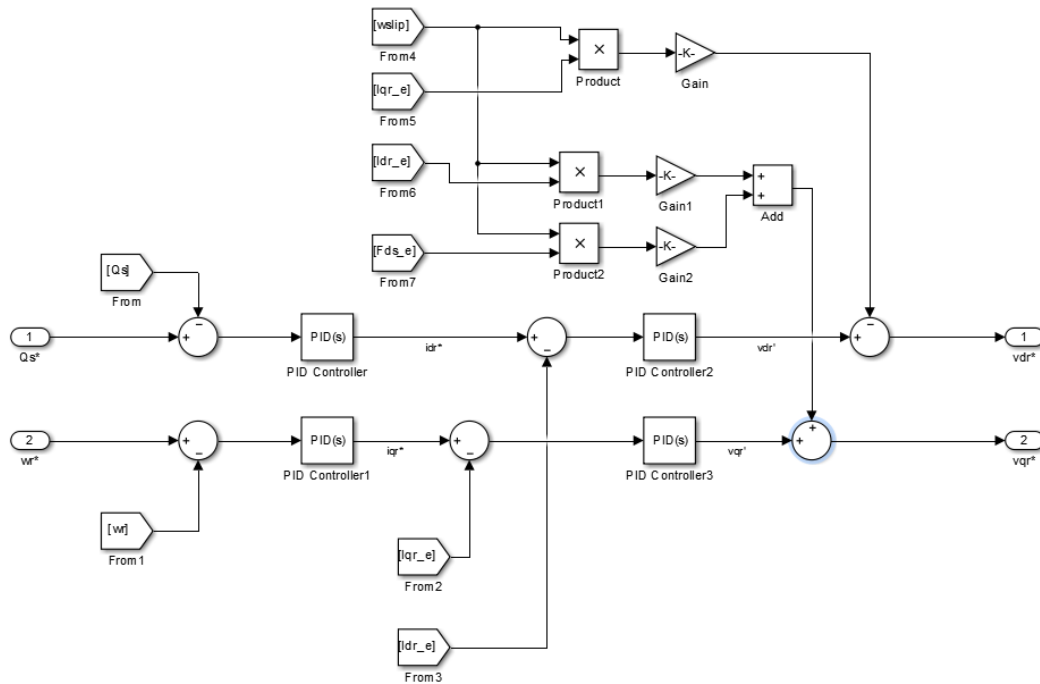
$$\theta_s = \tan^{-1} \frac{\lambda_{\alpha s}}{\lambda_{\beta s}} \quad (3.25)$$

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται το συνολικό διάγραμμα του ελέγχου του μετατροπέα από την πλευρά του δρομέα. Το ρεύμα αναφοράς i_{dr} λαμβάνεται από τη ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα ή από τη ροπή αναφορά της γεννήτριας.



Εικόνα 3.11 – Σχηματικό διάγραμμα ελέγχου του μετατροπέα πλευράς δρομέα

Ακολουθεί το σύστημα ελέγχου, όπως υλοποιήθηκε στο Simulink.



Εικόνα 3.12 – Υλοποίηση ελέγχου μετατροπέα πλευράς του δρομέα στο Matlab Simulink

3.2.2 Έλεγχος μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου

Ο μετατροπέας από την πλευρά του δικτύου χρησιμοποιείται για τη διατήρηση του επιπέδου της τάσης στο σημείο της dc διασύνδεσης μεταξύ των μετατροπέων. Κρατώντας την τάση σταθερή στη dc διασύνδεση, διασφαλίζεται λειτουργία του μετατροπέα σε κατάσταση όπου ανταλλάσσεται με το δίκτυο μόνο ενεργός ισχύς, ανεξάρτητα από την φορά της ισχύος (είτε προς το κύκλωμα του δρομέα είτε προς το δίκτυο). Εφόσον ο GSC δεν ανταλλάσσει άεργο ισχύ με το δίκτυο, η παραγωγή ή κατανάλωση αέργου ισχύος από τη διάταξη της ανεμογεννήτριας συντελείται μέσω του κυκλώματος του στάτη.

Για την υλοποίηση του ελέγχου χρησιμοποιείται διανυσματικός έλεγχος σε σύστημα αναφοράς dq0 προσανατολισμένο με την τάση του στάτη, ώστε να ανεξαρτητοποιηθεί ο έλεγχος της ενεργού και αέργου ισχύος. Ως αποτέλεσμα, η συνιστώσα ρεύματος του d άξονα θα ρυθμίζει το επίπεδο της τάσης στην dc σύνδεση και η συνιστώσα ρεύματος του q άξονα θα ρυθμίζει την άεργο ισχύ.

Όπως είδαμε στο κεφάλαιο 2, στη σύνδεση του μετατροπέα με το δίκτυο χρησιμοποιείται φίλτρο για την αποκοπή των ανώτερων αρμονικών του

μετατροπέα. Επαναλαμβάνουμε για καλύτερη εποπτεία τις εξισώσεις των τάσεων στη σύνδεση δικτύου-μετατροπέα:

$$V_a = R_f \cdot I_{ag} + L_f \cdot \frac{dI_{ag}}{dt} + V_{ag} \quad (2.56)$$

$$V_b = R_f \cdot I_{bg} + L_f \cdot \frac{dI_{bg}}{dt} + V_{bg} \quad (2.57)$$

$$V_c = R_f \cdot I_{cg} + L_f \cdot \frac{dI_{cg}}{dt} + V_{cg} \quad (2.58)$$

Όπου:

- L_f είναι η αυτεπαγωγή του φίλτρου
- R_f είναι η αντίσταση του φίλτρου
- V_{ag}, V_{bg}, V_{cg} είναι οι τάσεις των φάσεων a,b,c του δικτύου
- I_{ag}, I_{bg}, I_{cg} είναι τα ρεύματα εξόδου του μετατροπέα
- V_a, V_b, V_c είναι οι τάσεις εξόδου του μετατροπέα

Μετασχηματίζουμε τις εξισώσεις σε περιστρεφόμενο με τη σύγχρονη ταχύτητα πλαίσιο αναφοράς:

$$V_d = R_f \cdot I_{dg} + L_f \cdot \frac{dI_{dg}}{dt} - \omega_e L_f i_{dq} + V_{dg} \quad (3.26)$$

$$V_q = R_f \cdot I_{qg} + L_f \cdot \frac{dI_{qg}}{dt} - \omega_e L_f i_{dq} + V_{qg} \quad (3.27)$$

Αν θεωρήσουμε αμελητέες τις απώλειες και εξετάσουμε την ισχύ στις δύο πλευρές του μετατροπέα λαμβάνουμε:

$$P_g = V_{dc} \cdot i_{dc} = \frac{3}{2} (V_{dg} \cdot i_{dg} + V_{qg} \cdot i_{qg}) \quad (3.28)$$

Καθώς όμως ο άξονας d του στρεφόμενου πλαισίου αναφοράς είναι προσανατολισμένος προς την τάση του δικτύου, και εφόσον το πλάτος της τάσης τροφοδοσίας είναι σταθερό, θα έχουμε:

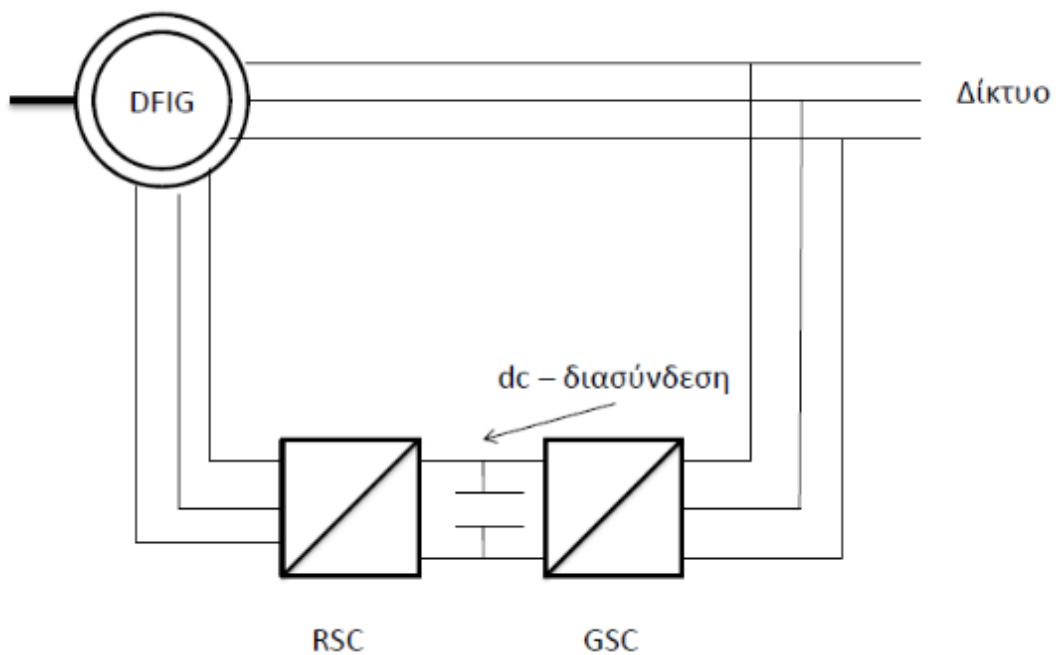
$$V_{dq} = 0$$

Οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$P_g = V_{dc} \cdot i_{dc} = \frac{3}{2} (V_{dg} \cdot i_{dg}) \quad (3.29)$$

Εξετάζοντας τώρα το σημείο dc σύνδεσης, θα έχουμε για την ενέργεια που αποθηκεύεται στον πυκνωτή μεταξύ των μετατροπέων:

$$W_{dc} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_{dc}^2 \quad (3.30)$$



Εικόνα 3.13 – Σημείο dc σύνδεσης μεταξύ των μετατροπέων

Η μεταβολή της ενέργειας του πυκνωτή εξαρτάται από την ισχύ που ανταλλάσσεται με κάθε μετατροπέα, καθώς θεωρούμε τις απώλειες των μετατροπέων αμελητέες. Οπότε έχουμε:

$$\frac{dW_{dc}}{dt} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \frac{d}{dt} V_{dc}^2 = -P_g - P_r \quad (3.31)$$

Επομένως διατηρώντας μέσω του ελέγχου σταθερή την τάση του dc σημείου σύνδεσης μεταξύ των μετατροπών θα ισχύει:

$$P_g = -P_r \rightarrow \frac{3}{2} \cdot V_{dg} \cdot i_{dg} = -P_r \quad (3.32)$$

Από τη θεωρία του μετατροπέα και συμβολίζοντας με m_1 το δείκτη διαμόρφωσης του εύρους παλμών, λαμβάνουμε:

$$V_{dg} = \frac{m_1}{2\sqrt{2}} V_{dc} \quad (3.33)$$

Από όπου προκύπτει για τα αντίστοιχα ρεύματα:

$$i_{dc} = \frac{3m_1}{4\sqrt{2}} i_{dg} \quad (3.34)$$

Από την εξίσωση των ρευμάτων στον πυκνωτή μεταξύ των μετατροπών έχουμε:

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = i_{dc} - i'_{dc} \rightarrow C \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{3m_1}{4\sqrt{2}} i_{dg} - i'_{dc} \quad (3.35)$$

Από την τελευταία σχέση παρατηρούμε ότι είναι δυνατό να ελέγξουμε το επίπεδο της τάσης της dc σύνδεσης των μετατροπών, ρυθμίζοντας το ρεύμα i_{dg} του μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου.

Για την περίπτωση της αέργου ισχύος έχουμε:

$$Q_g = \frac{3}{2}(V_{dg} \cdot i_{qg} + V_{qg} \cdot i_{dg}) \quad (3.36)$$

Και λόγω του προσανατολισμού του πλαισίου αναφοράς ($V_{qg} = 0$):

$$Q_g = \frac{3}{2}(V_{dg} \cdot i_{qg}) \quad (3.37)$$

Από όπου είναι εμφανές ότι η αέργος ισχύς μπορεί να ελεγχθεί μέσω του ρεύματος i_{qg} .

Η γωνιακή θέση της τάσης του δικτύου υπολογίζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\theta_e = \int \omega_e dt$$

$$\theta_e = \tan^{-1} \frac{V_\beta}{V_\alpha}$$

Όπου με V_α και V_β συμβολίζονται η συνιστώσες της τάσης του στατικού πλαισίου αναφοράς.

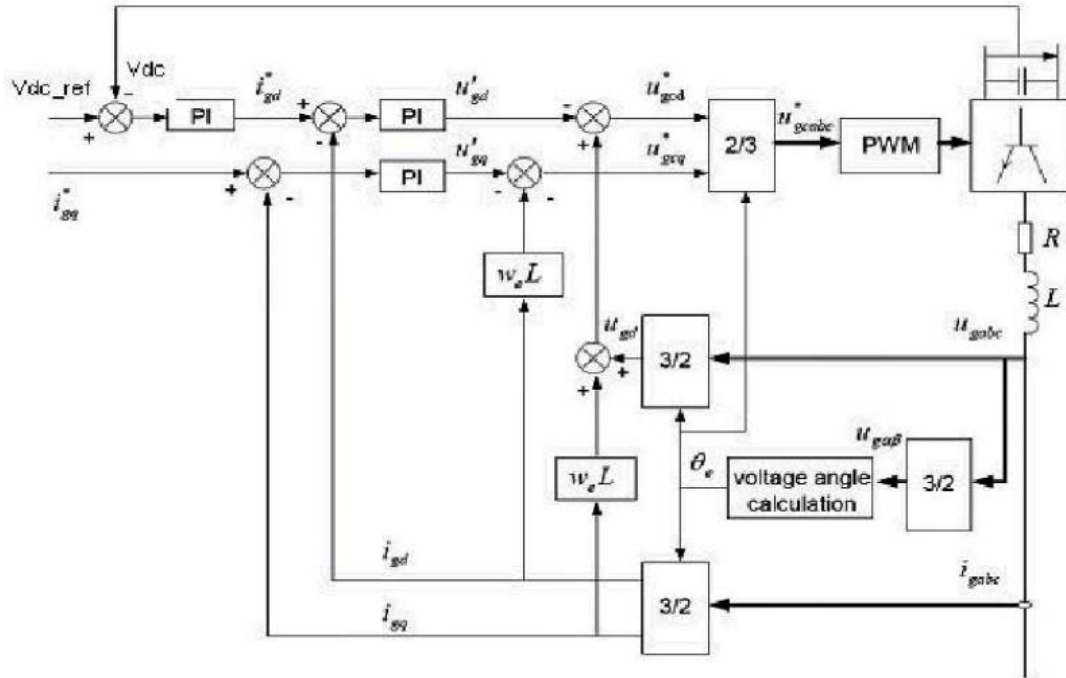
Συνοψίζοντας, διαπιστώσαμε ότι το επίπεδο τάσης στο σημείο dc σύνδεσης και η αέργος ισχύς του μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου, μπορούν να ελεγχθούν από τις συνιστώσες ρεύματος i_{dg} και i_{qg} αντίστοιχα. Τα ρεύματα αυτά μπορούν να ρυθμιστούν έμμεσα από τις αντίστοιχες τάσεις στο κύκλωμα. Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψη τις εξισώσεις των τάσεων στα άκρα του μετατροπέα σχηματίζουμε τις παρακάτω σχέσεις για τον έλεγχο:

$$V_d^* = -V'_{dg} - \omega_e \cdot L_f \cdot i_{qg} + V_{dg} \quad (3.38)$$

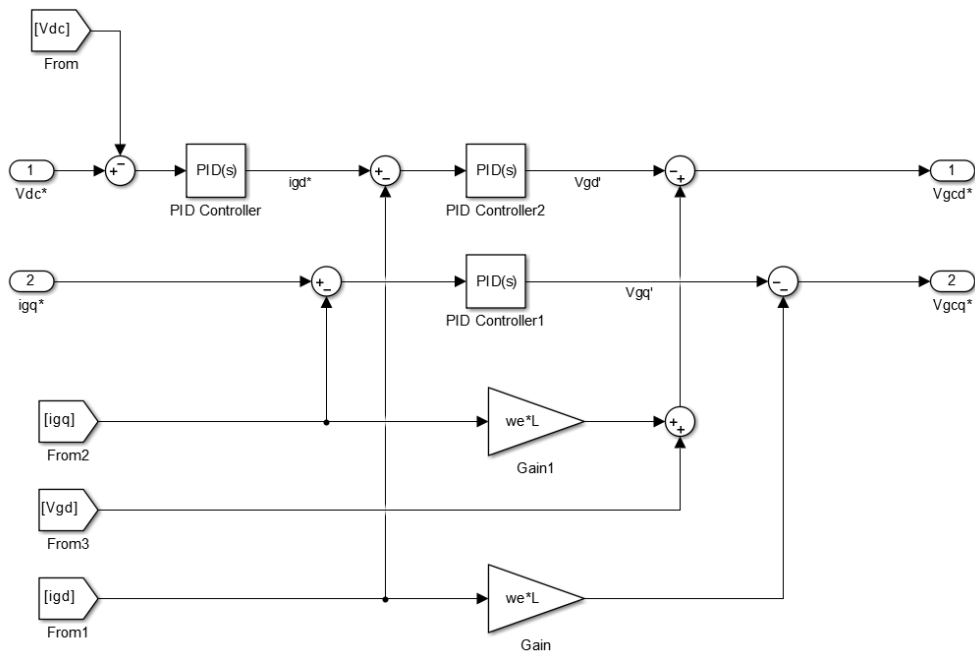
$$V_q^* = -V'_{qg} - \omega_e \cdot L_f \cdot i_{dg} \quad (3.39)$$

Όπου με τόνους συμβολίζονται οι έξοδοι των βρόγχων ανατροφοδότησης των ρευμάτων και με αστερίσκους τα σήματα αναφοράς.

Παρακάτω βλέπουμε το διάγραμμα του ελέγχου και την υλοποίησή του στο Simulink.



Εικόνα 3.14 – Σχηματικό διάγραμμα ελέγχου του μετατροπέα της πλευράς δικτύου



Εικόνα 3.15 – Υλοποίηση ελέγχου μετατροπέα πλευράς δικτύου στο Matlab Simulink

Κεφάλαιο 4 Μέθοδοι Ελέγχου σε μεταβατική λειτουργία

Τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κορυφώνεται. Ειδικά η περίπτωση της αιολικής ενέργειας θεωρείται από τις πιο σημαντικές ανανεώσιμες πηγές και εξετάζοντας τους ρυθμούς ανάπτυξης της διαπιστώνει κανείς ότι είναι πολλά υποσχόμενη, δεδομένου ότι είναι πλέον σε θέση να ανταγωνιστεί άλλες συμβατικές μορφές παραγωγής.

Όσο η εγκατεστημένη ισχύς αιολικών συστημάτων παραγωγής αυξάνεται, το ίδιο συμβαίνει και με την ανάγκη τα αιολικά πάρκα να συμμετέχουν ενεργά στη διαχείριση του δικτύου μεταφοράς. Ως αποτέλεσμα, κρίνεται απαραίτητο η συμπεριφορά των αιολικών συστημάτων να πλησιάζει όλο και περισσότερο τη συμπεριφορά των συμβατικών πηγών παραγωγής ενέργειας.

Για το λόγο αυτό ένας αυξανόμενος αριθμός διαχειριστών δικτύων έχουν εφαρμόσει τεχνικές προδιαγραφές τις οποίες η αιολική παραγωγή πρέπει να πληροί για να συνδεθεί στο δίκτυο.

Οι προδιαγραφές των κανονισμών του δικτύου μπορούν να επιμεριστούν σε δύο κατηγορίες: τις στατικές και τις δυναμικές. Οι στατικές προδιαγραφές αφορούν την κατάσταση μόνιμης λειτουργίας και τη ροή ισχύος στο σημείο σύνδεσης του αιολικού συστήματος με το δίκτυο μεταφοράς. Οι δυναμικές προδιαγραφές αφορούν την επιθυμητή συμπεριφορά των ανεμογεννητριών σε μεταβατικές καταστάσεις λειτουργίας, όπως κατά τη διάρκεια σφαλμάτων ή αναταραχών στο δίκτυο.

Γενικά οι εν λόγω περιορισμοί των κανονισμών του δικτύου καλύπτουν ένα εύρος περιοχών, όπως το εύρος τάσεων λειτουργίας, τη ρύθμιση του συντελεστή ισχύος, το εύρος της συχνότητας λειτουργίας, τη δυνατότητα υποστήριξης του δικτύου, και τη δυνατότητα παραμονής σε λειτουργία κατά τη διάρκεια σφαλμάτων του δικτύου.

Η δυνατότητα παραμονής σε λειτουργία κατά τη διάρκεια πτώσης τάσης του δικτύου θεωρείται από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στο σχεδιασμό και την κατασκευή ανεμογεννητριών. Οι σύγχρονες απαιτήσεις των διαχειριστών δικτύου επιβάλλουν την παραμονή των ανεμογεννητριών σε λειτουργία κατά τη διάρκεια βυθίσεων της τάσης του δικτύου.

Η ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης είναι μία από της πιο δημοφιλείς επιλογές για ανεμογεννήτριες μεγάλου μεγέθους, συνδεδεμένες στο δίκτυο. Όπως έχουμε δει και στα προηγούμενα κεφάλαια, εάν συγκριθεί με τις περιπτώσεις ανεμογεννητριών με μετατροπείς πλήρους φορτίου, προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως το μικρό κόστος των φίλτρων και των ηλεκτρονικών ισχύος λόγω του μειωμένου μεγέθους του μετατροπέα.

Όμως, οι ανεμογεννήτριες επαγωγής διπλής τροφοδότησης είναι ευάλωτες σε διαταραχές του δικτύου και ειδικά σε βυθίσεις της τάσης.

4.1 Απαιτήσεις διαχειριστών δικτύου

Οι τεχνικές προδιαγραφές του δικτύου τυπικά αναφέρονται σε μεγάλα αιολικά πάρκα συνδεδεμένα στο δίκτυο μεταφοράς, παρά σε μικρούς σταθμούς παραγωγής που συνδέονται στο δίκτυο διανομής. Οι σύγχρονοι κανονισμοί απαιτούν τα αιολικά πάρκα να συμμετέχουν στη ρύθμιση τάσης και συχνότητας του δικτύου, όπως οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής, και δίνεται έμφαση στη συμπεριφορά των αιολικών πάρκων σε περιπτώσεις ανώμαλης λειτουργίας του δικτύου, όπως στις περιπτώσεις βυθίσεως τάσης.

Οι πιο συχνές απαιτήσεις περιλαμβάνουν τη δυνατότητα παραμονής σε λειτουργία κατά τη διάρκεια σφαλμάτων, δυνατότητα λειτουργίας σε εκτεταμένο εύρος συχνοτήτων και τάσεων, ρύθμιση της ενεργού ισχύος, ρύθμιση της συχνότητας, καθώς και έλεγχο της αέργου ισχύος, του συντελεστή ισχύος και ρύθμιση του επιπέδου της τάσης.

- Ενεργός Ισχύς

Τα αιολικά πάρκα πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να ρυθμίσουν την παραγωγή ενεργού ισχύος ώστε να διασφαλίζουν μία σταθερή συχνότητα στο δίκτυο και να αποτρέπουν την υπερφόρτωση των γραμμών μεταφοράς. Για το λόγο αυτό επιβάλλονται στις ανεμογεννήτριες όρια του ρυθμού μεταβολής της παραγόμενης ενεργού ισχύος.

- Άεργος Ισχύς

Τα αιολικά πάρκα πρέπει να έχουν τη δυνατότητα ρύθμισης της αέργου ισχύος ώστε να διατηρούν την άεργο ισχύ και το συντελεστή ισχύος στο αποδεκτό εύρος τιμών (συνήθως 0.9 επαγωγικός έως 0.98 χωρητικός).

- Εύρος συχνοτήτων λειτουργίας

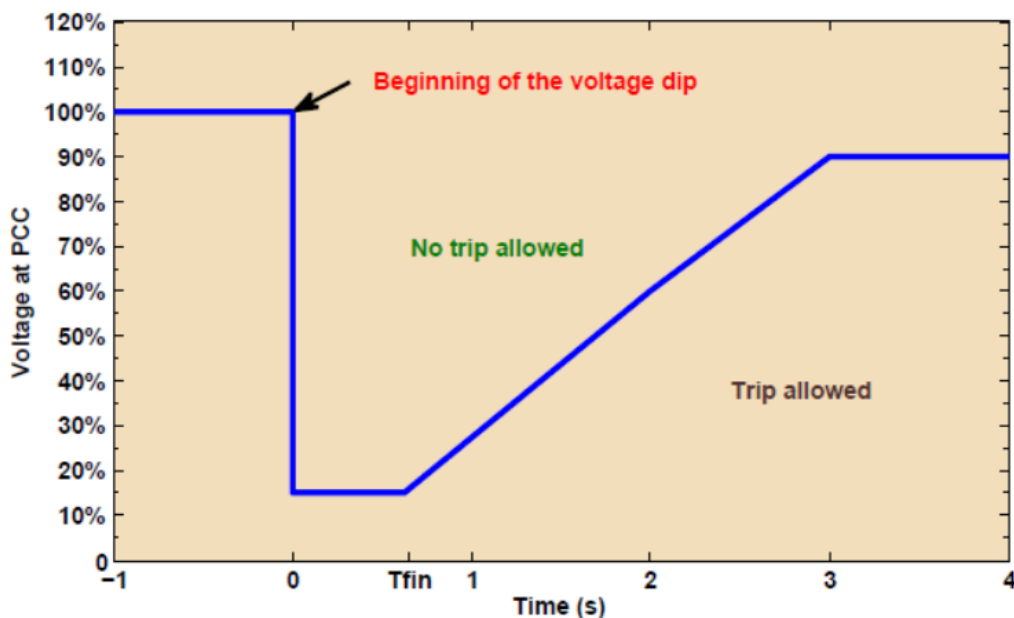
Τα αιολικά πάρκα απαιτείται να λειτουργούν ομαλά εντός του τυπικού εύρους αποδεκτών συχνοτήτων του δικτύου (συνήθως 49.5 Hz έως 50.5 Hz)

- Παραμονή σε λειτουργία κατά τη διάρκεια σφάλματος

Σε περίπτωση βύθισης της τάσεως, οι ανεμογεννήτριες απαιτείται να παραμείνουν συνδεδεμένες στο δίκτυο για μία καθορισμένη χρονική διάρκεια προτού τους επιτραπεί να αποσυνδεθούν. Η απαίτηση αυτή υπάρχει ώστε να διασφαλιστεί ότι δε θα υπάρξει απώλεια παραγωγής για σφάλματα που εκκαθαρίζονται αυτόματα από το δίκτυο. Διαφορετικά, η γρήγορη αποσύνδεση ανεμογεννητριών σε περίπτωση βύθισης τάσης θα μπορούσε να επηρεάσει αρνητικά το δίκτυο, ειδικά σε περιπτώσεις μεγάλων αιολικών πάρκων.

Συνεπώς, οι κανονισμοί του δικτύου απαιτούν από τα μεγάλα αιολικά πάρκα να αντέχουν σε βυθίσεις τάσης μέχρι ένα ποσοστό της ονομαστικής και για συγκεκριμένη χρονική διάρκεια. Τέτοιοι περιορισμοί είναι γνωστοί ως κανονισμοί παραμονής σε λειτουργία υπό πτώση τάσης (low voltage ride through - LVRT). Χαρακτηρίζονται από ένα διάγραμμα επιπέδου τάσης ανά χρόνο, επισημαίνοντας τις ελάχιστες απαιτούμενες προδιαγραφές των αιολικών πάρκων σε περιπτώσεις βύθισης τάσης.

Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται η μορφή του διαγράμματος των περιορισμών παραμονής σε λειτουργία υπό πτώση τάσης.

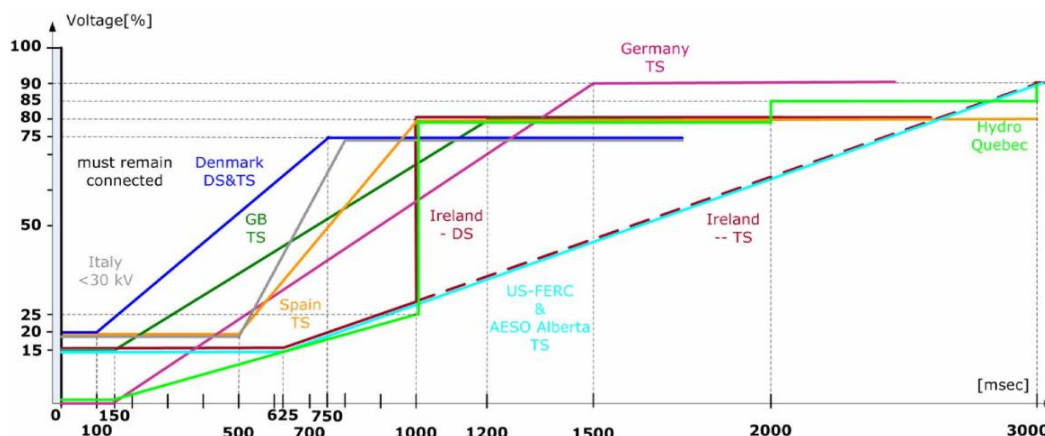


Εικόνα 4.1 – Ενδεικτικό διάγραμμα καμπύλης LVRT.

Παρατηρούμε ότι σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα μία ανεμογεννήτρια επιτρέπεται να αποσυνδεθεί μετά από σφάλμα στο δίκτυο,

μόνο εφόσον η πτώση τάσης είναι τέτοια που η κατάσταση λειτουργίας βρίσκεται σε σημείο κάτω από τη σχετική καμπύλη.

Ακολουθεί διάγραμμα με τους αντίστοιχους περιορισμούς όπως αυτοί ισχύουν σε δίκτυα ανεπτυγμένων χωρών.



Εικόνα 4.2 – Καμπύλες LVRT ανεπτυγμένων χωρών

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, οι γεννήτριες επαγωγής διπλής τροφοδότησης είναι ευαίσθητες σε διαταραχές τους δικτύου. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό έχει να κάνει με την απευθείας σύνδεση του στάτη της γεννήτριας στο δίκτυο.

Κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στο δίκτυο, μία ή περισσότερες εκ των φασικών τάσεων μπορεί να εμφανίσουν μεγάλη βύθιση στο σημείο σύνδεσης. Ως αποτέλεσμα, δημιουργούνται μεγάλα μεταβατικά ρεύματα στο κύκλωμα του στάτη, προκαλώντας ροή μεγάλων ρευμάτων στους μετατροπείς λόγω της μαγνητικής σύνδεσης των τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα. Καθώς οι μετατροπείς της διάταξης έχουν επιλεγεί ώστε να ανταποκρίνονται στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας για το επιθυμητό εύρος ταχυτήτων περιστροφής της γεννήτριας, είναι πολύ πιθανό να μην μπορούν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις του ελέγχου που αφορούν τη ρύθμιση των ρευμάτων του δρομέα σε μεταβατικές καταστάσεις. Πράγματι, όταν η τάση ή το ρεύμα στο κύκλωμα του δρομέα οδηγήσουν το μετατροπέα στο όριο ισχύος του, ο έλεγχος της γεννήτριας θα χαθεί έναντι στο ενδεχόμενο να καταστραφεί ο μετατροπέας λόγω υπερθέρμανσης. Ακόμα και αν η γεννήτρια υποβληθεί σε μικρή ασυμμετρία τάσεων στο στάτη, με το μετατροπέα να λειτουργεί εντός των ορίων του, τα ρεύματα στο στάτη μπορεί να είναι σημαντικά ασύμμετρα προκαλώντας παλμούς ροπής που οδηγούν σε υψηλά επίπεδα θορύβου και - σε ακραίες περιπτώσεις - σε καταστροφή του δρομέα, του κιβωτίου ταχυτήτων και των πτερυγίων.

Επομένως, γίνεται αντιληπτό ότι πρέπει να ληφθούν μέτρα για την προστασία των γεννητριών επαγωγής διπλής τροφοδότησης στις περιπτώσεις σφαλμάτων του δικτύου.

Παρουσιάζονται παρακάτω, και εξετάζονται, τρεις ενεργές μέθοδοι ελέγχου για την παραμονή των γεννητριών σε λειτουργία κατά την πτώση τάσης στο σημείο σύνδεσής τους, λόγω σφάλματος στο δίκτυο.

4.2 Χρήση κυκλώματος προστασίας και απομαγνήτιση δρομέα

4.2.1 Περιγραφή εξεταζόμενης μεθόδου

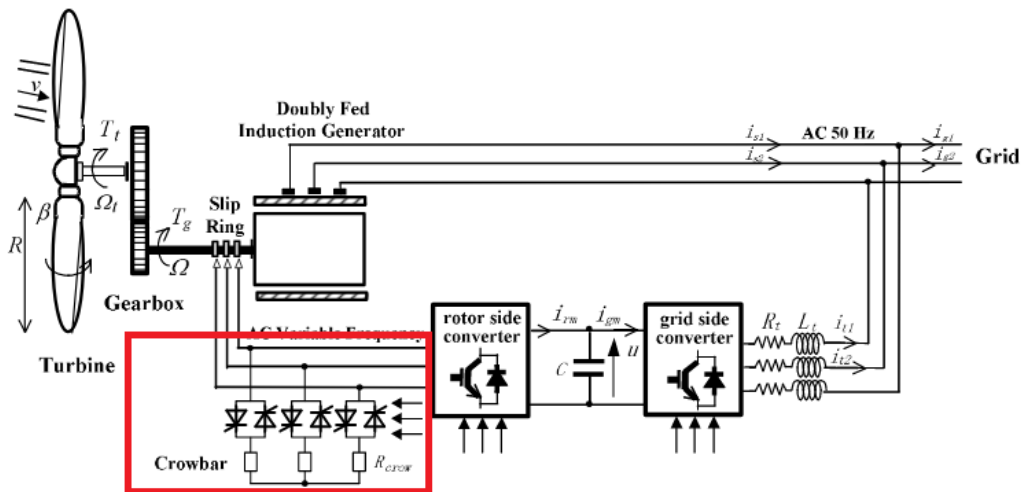
Όπως έχουμε αναφέρει, κατά τη διάρκεια πτώσης τάσης στο σημείο σύνδεσης της γεννήτριας με το δίκτυο, παρατηρείται αύξηση των ρευμάτων του στάτη, και λόγω της μαγνητικής σύνδεσής του με το δρομέα, το ίδιο συμβαίνει και με τα ρεύματα του δρομέα και των μετατροπέων. Ως αποτέλεσμα, η βύθιση τάσης στο δίκτυο προκαλεί υψηλά ρεύματα στο δρομέα και υψηλή τάση στο σημείο dc σύνδεσης. Εάν η βύθιση της τάσης του δικτύου είναι μεγάλη, ο μετατροπέας από την πλευρά του δρομέα δεν μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις του ελέγχου. Εκτός από την απώλεια του ελέγχου, υπάρχει κίνδυνος καταστροφής των μετατροπέων.

Μία συνήθης μέθοδος για την προστασία των μετατροπέων είναι η σύνδεση κυκλώματος αντιστάσεων στο δρομέα, οι οποίες περιορίζουν το υψηλό ρεύμα στα τυλίγματα του δρομέα και προσφέρουν μία οδό διαφυγής για υψηλά μεταβατικά ρεύματα. Το κύκλωμα αυτό των αντιστάσεων για την προστασία από υψηλά ρεύματα καλείται crowbar στη διεθνή βιβλιογραφία.

Ενώ η χρήση crowbar προστατεύει τα κυκλώματα της διάταξης κατά το σφάλμα του δικτύου και επιτρέπει στη γεννήτρια να παραμείνει συνδεδεμένη, στο διάστημα ενεργοποίησης του συστήματος προστασίας χάνεται ο έλεγχος της γεννήτριας και επιπλέον η γεννήτρια απορροφά άεργο ισχύ από το δίκτυο.

Θα εξετάσουμε παρακάτω μία βελτιωμένη μέθοδο ελέγχου για το σύστημα προστασίας crowbar που αποσκοπεί στην αντιμετώπιση των αρνητικών της στοιχείων.

Θα χρησιμοποιηθεί ένας βρόγχος υστέρησης για την ενεργοποίηση των αντιστάσεων στο δρομέα. Το crowbar θα ενεργοποιείται μόλις το ρεύμα του δρομέα υπερβεί ένα κατώφλι, και θα αποσυνδέεται μόλις τα ρεύματα του δρομέα επιστρέψουν σε ασφαλή επίπεδα. Παράλληλα θα εφαρμοστεί μέθοδος απομαγνήτισης της μηχανής κατά το σφάλμα του δικτύου.



Εικόνα 4.3 – Διάγραμμα κυκλώματος crowbar στη διάταξη ΓΕΔΤ

Το εξεταζόμενο κύκλωμα προστασίας αποτελείται από αμφίδρομους τριφασικούς διακόπτες και αντιστάσεις. Οι διακόπτες θεωρούνται ιδανικοί και για τη λειτουργία τους ορίζεται μία συνάρτηση S_{crow} η οποία λαμβάνει τις παρακάτω τιμές:

$$S_{crow} = \begin{cases} 1, & \text{όταν οι διακόπτες είναι κλειστοί} \\ 0, & \text{όταν οι διακόπτες είναι ανοικτοί} \end{cases} \quad (4.1)$$

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω συνάρτηση, το κύκλωμα προστασίας μπορεί να περιγραφεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$V_{crow} = S_{crow} \cdot r_{crow} \cdot i_{crow} \quad (4.2)$$

Η συμπεριφορά ενός κυκλώματος με τη μορφή που περιγράφεται επηρεάζεται σημαντικά από την τιμή των αντιστάσεων που θα επιλεγούν. Η επιλογή μικρών αντιστάσεων οδηγεί σε υψηλότερη ηλεκτρική ροπή και ρεύματα δρομέα, καθώς και σε χαμηλές τάσεις στο δρομέα. Αντίθετα, η επιλογή μεγάλων αντιστάσεων οδηγεί σε χαμηλότερη ηλεκτρική ροπή και ρεύματα δρομέα, και καθώς και σε υψηλότερες τάσεις δρομέα. Συνεπώς, οι αντιστάσεις που θα χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να είναι αρκετά μικρές ώστε να αποφευχθούν υψηλές τάσεις στα άκρα του μετατροπέα, αλλά ταυτόχρονα θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλες ώστε να περιορίζουν τα ρεύματα στο δρομέα. Στην περίπτωσή μας, επιλέγονται αντιστάσεις για το κύκλωμα

crowbar μεγέθους τριάντα φορές της τιμής των αντιστάσεων των τυλιγμάτων του δρομέα.

$$r_{crow} = 30 \cdot r_r \quad (4.3)$$

Εφόσον ο στάτης είναι απευθείας συνδεδεμένος με το δίκτυο και ο μετατροπέας από την πλευρά του δικτύου συνδέεται μέσω φίλτρων, έχουμε για τη σύνδεση με το δίκτυο:

$$V_s = V_{grid} \quad (4.4)$$

$$i_{grid} = i_s + i_{gsc} \quad (4.5)$$

Καθώς με τη σύνδεση του crowbar, ο μετατροπέας από την πλευρά του δρομέα θα αποσυνδεθεί από το κύκλωμα του δρομέα, για το κύκλωμα του δρομέα κατά τη λειτουργία του κυκλώματος προστασίας ισχύει:

$$V_r = V_{crow} \quad (4.6)$$

$$i_{crow} = i_r \quad (4.7)$$

Διαφορετικά, κατά την κανονική λειτουργία η τάση και το ρεύμα του δρομέα καθορίζονται από το μετατροπέα:

$$V_r = V_{gsc} \quad (4.8)$$

$$i_{gsc} = i_r \quad (4.9)$$

4.2.2 Εξεταζόμενο σύστημα ελέγχου

Το μοντέλο του ελέγχου που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο επεκτείνεται ως εξής:

Γίνεται προσθήκη ενός ανιχνευτή βύθισης τάσης, σκοπός του οποίου είναι να ανιχνεύει μεταβολές στην τάση του δικτύου πέρα από τα φυσιολογικά επίπεδα, ώστε να επιλέγεται από τη μέθοδο ελέγχου της γεννήτριας η κανονική λειτουργία ή η λειτουργία σφάλματος δικτύου.

Όσο η τάση διατηρείται σε φυσιολογικά επίπεδα ο έλεγχος λειτουργεί όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2, οδηγεί τη μηχανή στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας και κρατά το συντελεστή ισχύος στην επιθυμητή τιμή.

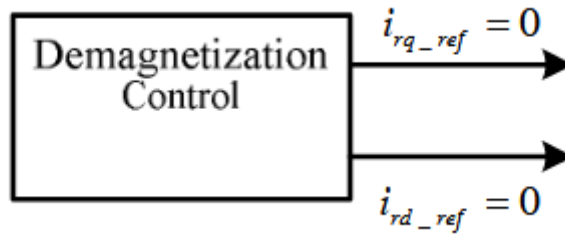
Στην περίπτωση σφάλματος στο δίκτυο εφαρμόζεται μία μέθοδος απομαγνήτισης της μηχανής ώστε να μειωθούν τα υψηλά ρεύματα στα τυλίγματα του δρομέα. Επιπλέον, ενεργοποιείται ο βρόγχος υστέρησης που ελέγχει το κύκλωμα crowbar. Ενώ ο έλεγχος του μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου παραμένει ως έχει.

Η απομαγνήτιση επιλέγεται για τον περιορισμό των ρευμάτων του δρομέα, καθώς το μέγεθος του μετατροπέα σε μία μηχανή διπλής τροφοδότησης δεν επαρκεί ώστε να αντιμετωπιστεί η αυξημένη μαγνητική ροή η οποία προκαλείται λόγω της συνεχούς συνιστώσας της μαγνητικής ροής που δημιουργεί η πτώση τάσης στο δίκτυο.

Όπως γνωρίζουμε, στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς προσανατολισμένο ως προς τη ροή του στάτη έχουμε:

$$\lambda_{ds} = \frac{L_s}{r_s} V_{ds} + L_M i_{dr} \quad (4.10)$$

Επομένως, αν η d-συνιστώσα του ρεύματος του δρομέα μειωθεί θα πετύχουμε απομαγνήτιση και οι μεταβολές των ρευμάτων θα περιοριστούν. Για την υλοποίηση της απομαγνήτισης θέτουμε στο σύστημα ελέγχου τα σήματα αναφοράς των ρευμάτων i_{dr} και i_{qr} ίσα με το μηδέν. Η απομαγνήτιση πυροδοτείται μόλις ανιχνευθεί βύθιση τάσης στο δίκτυο, και διατηρείται μέχρι και λίγα milliseconds μετά την εκκαθάριση του σφάλματος από το δίκτυο ώστε να αποφευχθούν έντονα μεταβατικά φαινόμενα.

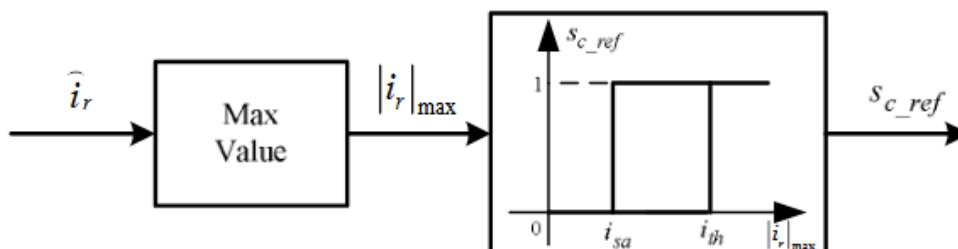


Εικόνα 4.4 – Μηδενισμός σημάτων αναφοράς ρευμάτων του δρομέα

Η ενεργοποίηση του κυκλώματος crowbar εκτελείται εάν ανιχνευτεί υπέρταση στο σημείο dc σύνδεσης ή υψηλό ρεύμα στα τυλίγματα του δρομέα.

Με την ενεργοποίηση του κυκλώματος προστασίας ο μετατροπέας από την πλευρά του δρομέα αποσυνδέεται από το κύκλωμα του δρομέα. Ως αποτέλεσμα, η δυνατότητα ελέγχου της γεννήτριας χάνεται κατά την περίοδο του σφάλματος, το οποίο είναι και το βασικό μειονέκτημα της χρήσης του κυκλώματος προστασίας. Επιπλέον, στο διάστημα αυτό και μέχρι να ανακτηθεί ο έλεγχος από το μετατροπέα, η γεννήτρια λειτουργεί ως ασύγχρονη μηχανή κλωβού, απορροφώντας άεργο ισχύ από το δίκτυο και δυσχεραίνοντας περισσότερο την κατάσταση του δικτύου. Για το λόγο αυτό είναι προτιμότερο να καθυστερήσουμε την ενεργοποίηση του κυκλώματος προστασίας.

Με σκοπό να περιορίσουμε το διάστημα λειτουργίας του κυκλώματος crowbar υιοθετείται ένας βρόγχος υστέρησης για την ενεργοποίησή του, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.5. Η μέγιστη απόλυτη τιμή του ρεύματος του δρομέα συγκρίνεται με ένα κατώφλι ύψους i_{thr} και μία μικρότερη τιμή ασφαλείας i_{saf} . Εάν το ρεύμα του δρομέα είναι ξεπερνά το κατώφλι, ενεργοποιείται το κύκλωμα crowbar για την προστασία της διάταξης. Έπειτα όταν το ρεύμα του δρομέα μειωθεί κάτω από την τιμή ασφαλείας, το κύκλωμα προστασίας απενεργοποιείται και επαναφέρεται η σύνδεση και ο έλεγχος του μετατροπέα από την πλευρά του δρομέα.

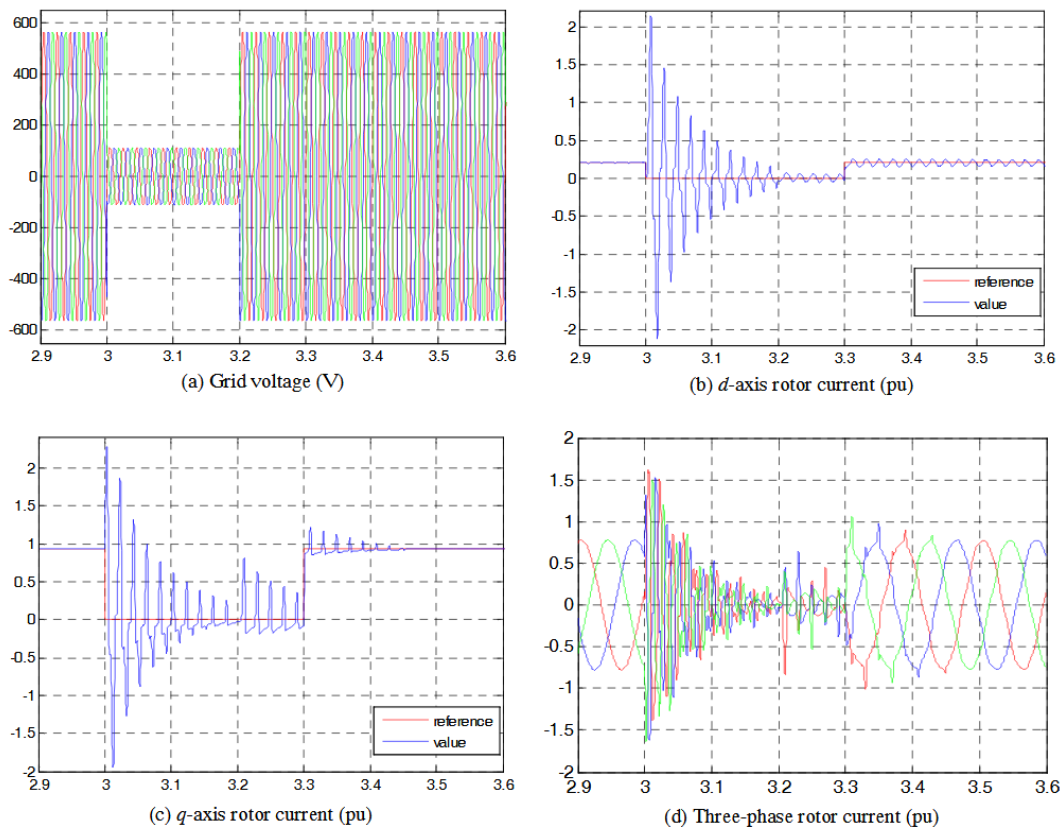


Εικόνα 4.5 – Διάγραμμα βρόγχου υστέρησης

4.2.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Για να εξεταστεί η επίδραση της αναγραφόμενης μεθόδου ελέγχου σε περιπτώσεις σημαντικής βύθισης τάσης του δικτύου πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις της λειτουργίας στο πρόγραμμα Matlab Simulink.

Η εικόνα 4.6 δείχνει τη διαδικασία απομαγνήτισης υπό την πτώση τάσης του δικτύου. Η τάση πέφτει στο 20% της ονομαστικής τιμής για ένα χρονικό διάστημα 200ms, όπως φαίνεται στο α μέρος της εικόνας. Όταν η τάση του δικτύου επανέρχεται στην ονομαστική τιμή, η απομαγνήτιση βοηθά στη μείωση των μεταβατικών ρευμάτων.

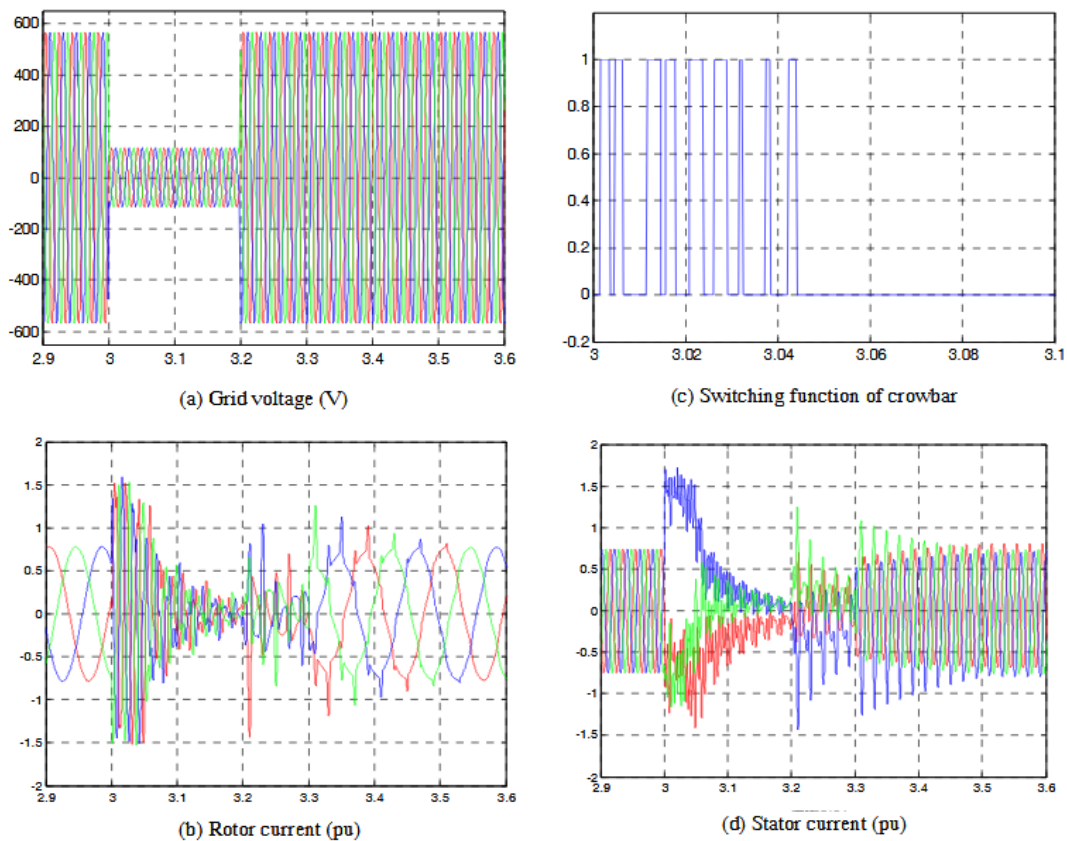


Εικόνα 4.6 – Απομαγνήτιση ΓΕΔΤ κατά τη βύθιση τάσης

Παρότι η μέθοδος της απομαγνήτισης μειώνει το ρεύμα του δρομέα σε μικρό χρονικό διάστημα, η μέγιστη τιμή του ρεύματος του δρομέα παραμένει μεγαλύτερη του 150% της ονομαστικής τιμής, δηλαδή ξεπερνά το κατώφλι ενεργοποίησης του κυκλώματος προστασίας. Οπότε για την προστασία της διάταξης πρέπει να ενεργοποιηθεί το κύκλωμα crowbar ώστε να διαφύγουν τα υψηλά ρεύματα του δρομέα.

Η εικόνα 4.7 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την παραμονή σε λειτουργία της ΓΕΔΤ κατά την πτώση τάσης του δικτύου, ενώ εφαρμόζεται η μέθοδος ελέγχου που εξετάζεται.

Προκαλείται πτώση τάσης του δικτύου στο 20% της ονομαστικής για 200ms. Μόλις η τάση στο σημείο σύνδεσης της γεννήτριας πέσει, ενεργοποιείται η μέθοδος απομαγνήτισης, αλλά τα ρεύματα του δρομέα παραμένουν μεγαλύτερα του κατωφλίου ενεργοποίησης του κυκλώματος crowbar λόγω της περιορισμένης δυνατότητας του μετατροπέα. Χάρης στο κύκλωμα προστασίας η τιμή του ρεύματος δρομέα μειώνεται γρήγορα κάτω από το όριο ασφαλείας. Από το γ μέρος (c) της εικόνας 4.7 διαπιστώνεται ότι το κύκλωμα crowbar ενεργοποιείται μόλις για μερικά millisecond, το οποίο σημαίνει ότι η μηχανή διατηρείται υπό έλεγχο για το μεγαλύτερο μέρος του διαστήματος βύθισης της τάσης. Συνεπώς, θα απορροφηθεί λιγότερη άεργος ισχύς κατά την απομαγνήτιση.

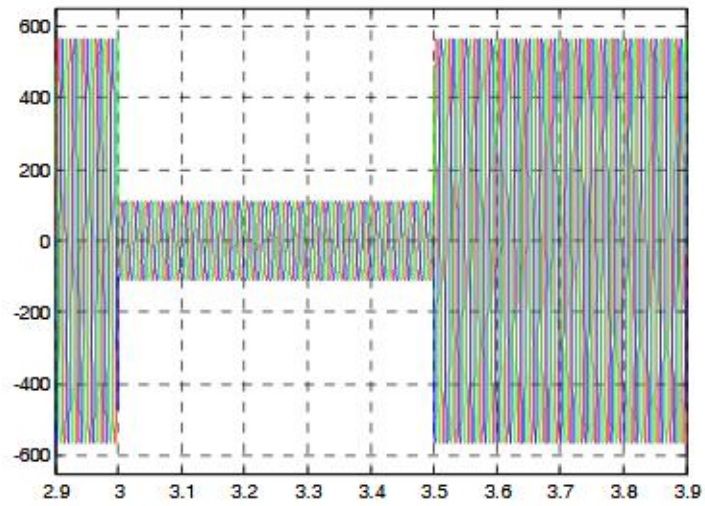


Εικόνα 4.7 – Αποτελέσματα προσομοίωσης σε βύθιση τάσης 80% για 0.2 sec

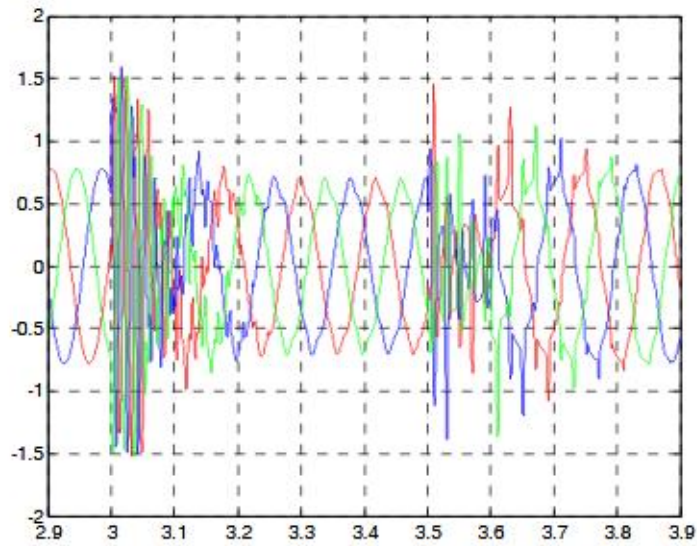
Επιπροσθέτως, λόγω της απομαγνήτισης, το κύκλωμα προστασίας δεν ενεργοποιείται μετά την εκκαθάριση του σφάλματος από το δίκτυο, οπότε ο μετατροπέας από την πλευρά του δρομέα θα ελέγξει τη γεννήτρια

επαναφέροντάς τη στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας ταχύτερα. Παρατηρούμε ότι περίπου 0.2s μετά την επαναφορά της τάσης του δικτύου, η γεννήτρια παράγει ξανά μέγιστη ενεργό ισχύ από τον άνεμο.

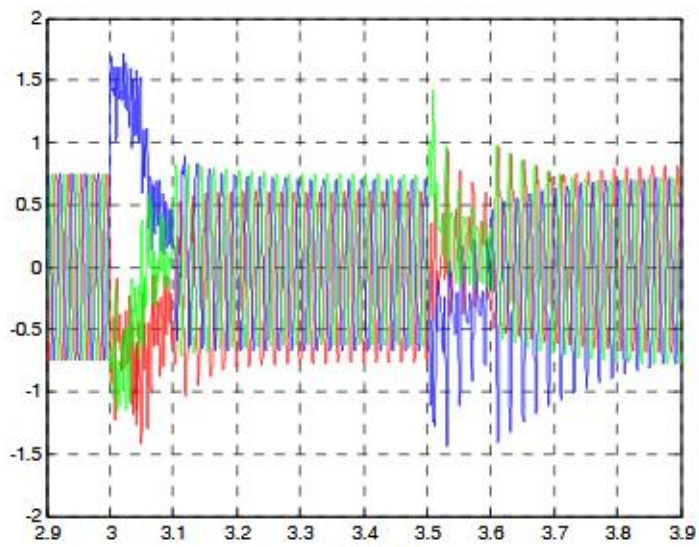
Εάν η βύθιση τάσης διαρκέσει για μεγαλύτερο διάστημα, η γεννήτρια απαιτείται να παρέχει στο δίκτυο άεργο ισχύ, ώστε να βοηθήσει στην επαναφορά της τάσης του δικτύου. Από την εικόνα 4.8 φαίνεται ότι τη εξεταζόμενη μέθοδος ελέγχου ικανοποιεί τη απαίτηση προσφοράς αέργου ισχύος στο δίκτυο κατά τη διάρκεια βύθισης τάσης στο 20% της ονομαστικής τιμής για χρονική διάρκεια 500ms.



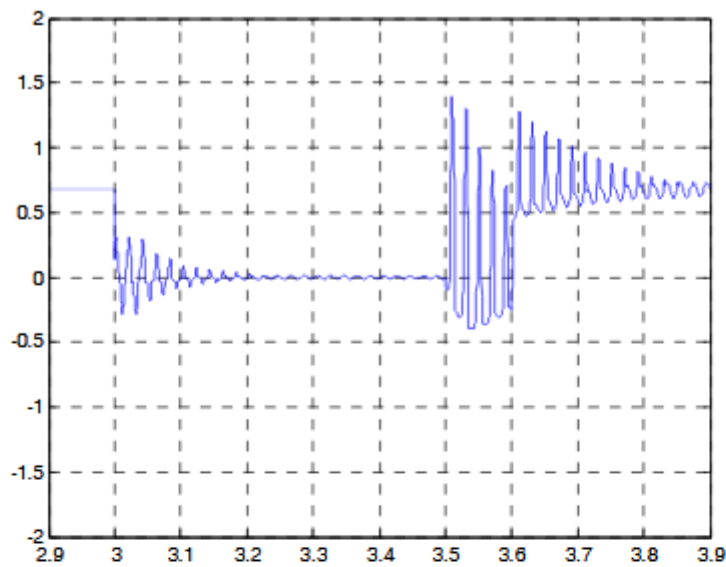
(a) Grid voltage (V)



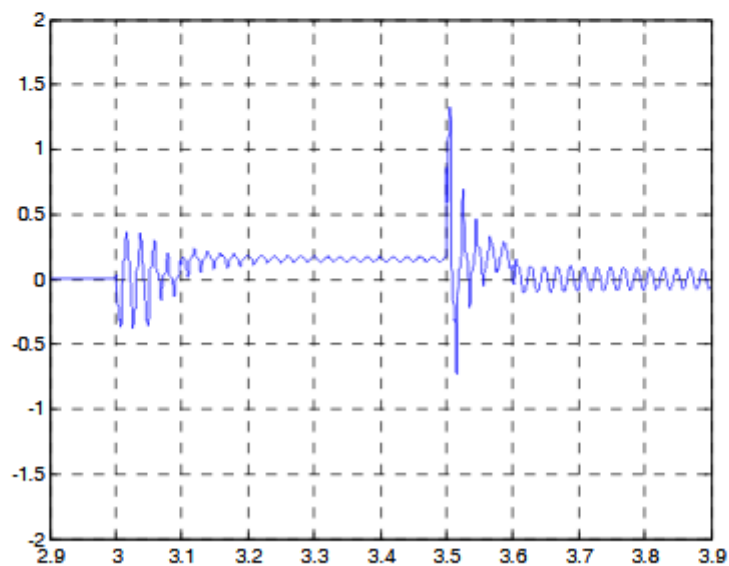
(b) Rotor current (pu)



(c) Stator current (pu)



(d) Active power (pu)



(e) Reactive power (pu)

Εικόνα 4.8 – Αποτελέσματα προσομοίωσης σε βύθιση τάσης 80% για 0.5 sec

Παρατηρούμε ότι μόλις το ρεύμα του δρομέα επιστρέψει σε ασφαλείς τιμές, το σήμα αναφοράς για την άεργο ισχύ αλλάζει σε 0.2 ανά μονάδα. Παρότι η παραγόμενη άεργος ισχύς δεν είναι αντίστοιχη εκείνης που παράγεται στην κατάσταση μόνιμης λειτουργίας λόγω της μειωμένης τάσης του δικτύου, επισημαίνεται ότι κατά το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα του σφάλματος η γεννήτρια τροφοδοτεί το δίκτυο με άεργο ισχύ ενισχύοντας την τάση του δικτύου και βοηθώντας στην επαναφορά της.

4.3 Μετατροπή της υπερβάλλουσας ενέργειας σε κινητική

4.2.1 Περιγραφή εξεταζόμενης μεθόδου

Μία διαφορετική προσέγγιση του ελέγχου μίας ασύγχρονης μηχανής διπλής τροφοδότησης, για την παραμονή της στο δίκτυο κατά τη βύθιση τάσεως, είναι η χρήση της δυνατότητας αύξησης της ταχύτητας του δρομέα κατά τη διάρκεια του σφάλματος στο δίκτυο.

Όπως έχουμε αναφέρει, τα δύο βασικά προβλήματα, που προκαλεί στη διάταξη της γεννήτριας μία βύθιση τάσεως του δικτύου, είναι τα υψηλά ρεύματα στο στάτη και το δρομέα, καθώς και η αύξηση της τάσης στην dc διασύνδεση των μετατροπέων. Και τα δύο αυτά προβλήματα μπορούν να αποδοθούν στην αδυναμία μετάδοσης της παραγόμενης ενέργειας στο δίκτυο, λόγω της χαμηλής τάσης.

Η κεντρική ιδέα της μεθόδου ελέγχου που θα εξεταστεί είναι η αύξηση, μέσω ελέγχου του μετατροπέα, της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα. Με τον τρόπο αυτό, η ενέργεια που απορροφάται από τον άνεμο και λόγω της χαμηλής τάσης δεν μπορεί να μεταφερθεί στο δίκτυο, θα μετατραπεί σε κινητική ενέργεια του δρομέα, αντί να διοχετευτεί στο περιβάλλον μέσω αντιστάσεων. Με αυτό τον τρόπο αναμένεται να αντιμετωπιστούν τα μεγάλα ρεύματα στο στάτη και το δρομέα. Για τη ρύθμιση της τάσης στο σημείο dc σύνδεσης θα τροποποιηθεί ο έλεγχος της κανονικής λειτουργίας του μετατροπέα της πλευράς του δικτύου, ώστε να λαμβάνει υπόψη τις μεταβολές του ρεύματος του μετατροπέα της πλευράς του δρομέα που θα προκύψουν κατά την πτώση τάσης του δικτύου.

Πλεονέκτημα της μεθόδου που περιγράφεται είναι ότι δεν απαιτεί χρήση πρόσθετων κυκλωμάτων στη διάταξη, όπως σύνδεση αντιστάσεων στο δρομέα ή επιπλέον προστασίες/φίλτρα για τα ρεύματα και την τάση, σε σχέση με τις απαιτήσεις λειτουργίας στη μόνιμη κατάσταση. Επιπλέον, η πρόσθετη ενέργεια που αποθηκεύεται στο δρομέα μπορεί μετά την εκκαθάριση του σφάλματος στο δίκτυο να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια.

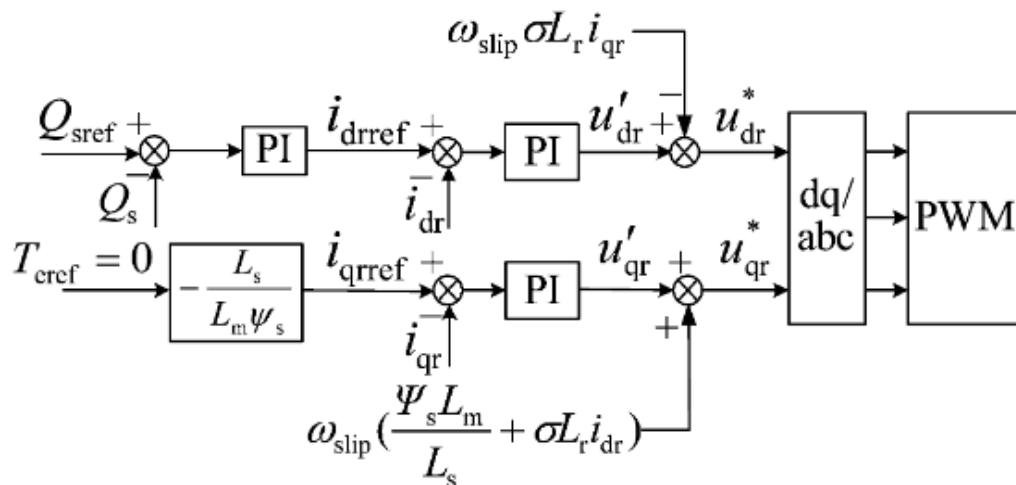
4.2.2 Εξεταζόμενο σύστημα ελέγχου

Κατά τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας ο έλεγχος διατηρείται όπως έχει περιγραφεί στο κεφάλαιο 3. Για τον μετατροπέα από την πλευρά του δρομέα

χρησιμοποιείται διανυσματικός έλεγχος σε σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς προσανατολισμένο με τη ροή του στάτη.

Όταν στο δίκτυο παρατηρείται πτώση τάσης λόγω σφάλματος, η απορροφώμενη ενέργεια από τον άνεμο – στιγμιαία – δεν ισούται με την ενέργεια που παρέχεται στο δίκτυο, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται στα κυκλώματα της μηχανής υψηλά μεταβατικά ρεύματα. Συνεπώς, εξετάζοντας το σύστημα από την οπτική της ενέργειας, ο περιορισμός των υψηλών μεταβατικών ρευμάτων στο στάτη και το δρομέα μπορεί να επιτευχθεί μειώνοντας τη στιγμιαία ανισοροπία μεταξύ της παραγόμενης και της μεταδιδόμενης στο δίκτυο ενέργειας.

Όταν, λόγω σφάλματος στο δίκτυο, είτε η τιμή του ρεύματος στάτη, του ρεύματος δρομέα ή της τάσης στη dc σύνδεση υπερβούν τα φυσιολογικά όρια, είτε η τάση στο δίκτυο μειωθεί, πυροδοτείται το εξεταζόμενο σχήμα ελέγχου. Ο ελεγκτής του μετατροπέα της πλευράς του δρομέα θα αυξήσει την ταχύτητα του δρομέα μειώνοντας τη ροπή της μηχανής στο μηδέν, με σκοπό να μετατρέψει την απορροφώμενη από τον άνεμο ενέργεια σε κινητική ενέργεια της μηχανής. Η ενέργεια αυτή θα μετατραπεί σε ηλεκτρική και θα απελευθερωθεί στο δίκτυο μετά την εκκαθάριση του σφάλματος. Παρακάτω βλέπουμε το διάγραμμα ελέγχου του μετατροπέα της πλευράς του δρομέα.



Εικόνα 4.9 – Σχηματικό διάγραμμα ελέγχου μετατροπέα RSC κατά τη διάρκεια σφάλματος δικτύου

Το εξεταζόμενο σχήμα ελέγχου δε θα προκαλέσει υπερβολικές μηχανικές πιέσεις στο σύστημα της γεννήτριας. Όταν η γεννήτρια λειτουργεί στην ονομαστική ταχύτητα ή κοντά σε αυτή, η επιτάχυνση, που θα προκύψει λόγω του ελέγχου, ενδεχομένως να οδηγήσει τη γεννήτρια σε ταχύτητες μεγαλύτερες της ονομαστικής. Ως αποτέλεσμα, οι φυγόκεντρες δυνάμεις στο δρομέα και τα πτερύγια θα αυξηθούν. Όμως, το μηχανικό σύστημα της

γεννήτριας θα προστατευτεί από τον έλεγχο της γωνίας βήματος των πτερυγίων, το οποίο θα ενεργοποιηθεί αμέσως μόλις η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα υπερβεί την ονομαστική της τιμή. Άλλωστε, το χρονικό διάστημα της υπερτάχυνσης της μηχανής θα είναι μικρό, λόγω της μικρής διάρκειας των σφαλμάτων και της μικρής πιθανότητας εμφάνισής τους στο δίκτυο.

Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, όπως έχουμε αναλύσει, για τον μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου χρησιμοποιείται διανυσματικός έλεγχος σε σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς προσανατολισμένο με την τάση του δικτύου.

Υπενθυμίζεται ότι η δυναμική συμπεριφορά του σημείου σύνδεσης των μετατροπέων περιγράφεται από τη σχέση:

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = i_{dc} - i'_{dc} \quad (4.11)$$

Όπου i_{dc} και i'_{dc} είναι τα ρεύματα των μετατροπέων από την πλευρά του δικτύου και του δρομέα αντίστοιχα. Θεωρώντας ιδανικούς μετατροπείς λαμβάνουμε:

$$i_{dc} = \frac{3m_1}{4\sqrt{2}} i_{dg} \quad (4.12)$$

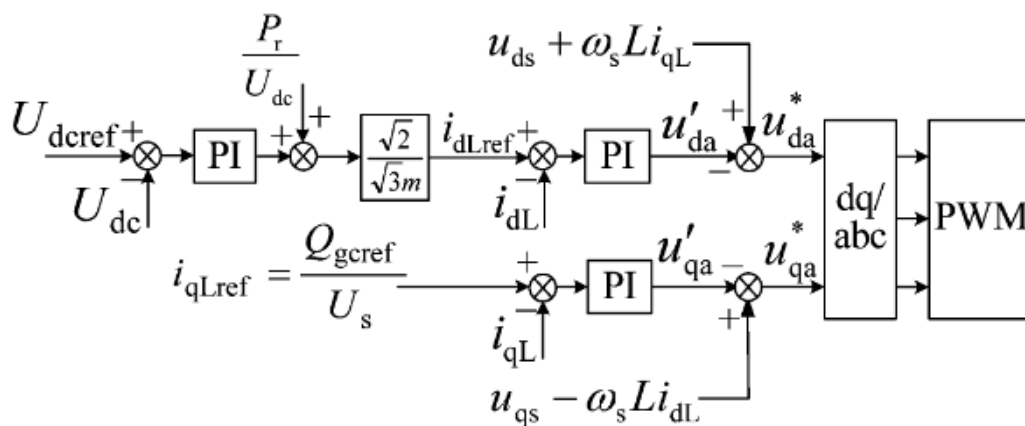
$$i'_{dc} = \frac{P_r}{V_{dc}} \quad (4.13)$$

Όπου P_r είναι η τιμή της ενεργού ισχύς του κυκλώματος του δρομέα.

Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, τα ρεύματα i_{dc} και i'_{dc} είναι ίσα, οπότε η τάση στο σημείο dc σύνδεσης διατηρείται σταθερή. Κατά τη βύθιση τάσης στο δίκτυο, το ρεύμα i_{dc} ενδεχομένως να μην είναι ίσο με το i'_{dc} λόγω της στιγμιαίας ανισορροπίας μεταξύ της ισχύος που μεταδίδεται μέσω του μετατροπέα από την πλευρά του δρομέα και του μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου. Συνεπώς η τάση του σημείου σύνδεσης κατά τη διάρκεια της

βύθισης τάσεως στο δίκτυο πιθανώς να κυμανθεί. Για να αποτραπεί αυτό, όταν είτε η τιμή του ρεύματος στάτη, του ρεύματος δρομέα ή της τάσης στη dc σύνδεση υπερβούν τα φυσιολογικά όρια, είτε η τάση στο δίκτυο μειωθεί, η ποσότητα $\frac{P_r}{V_{dc}}$ που αντικατοπτρίζει την αναμενόμενη τιμή του ρεύματος i'_{dc} , εισάγεται ως διαταραχή στο βρόγχο ελέγχου του μετατροπέα της πλευράς του δικτύου, για να εξισορροπήσει τη στιγμιαία μεταβολή της ισχύος του δρομέα. Με τον τρόπο αυτό, η τάση του σημείου dc σύνδεσης μπορεί να εξομαλυνθεί κατά τη διάρκεια της πτώσης τάσης στο δίκτυο.

Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα ελέγχου για το μετατροπέα της πλευράς του δικτύου.

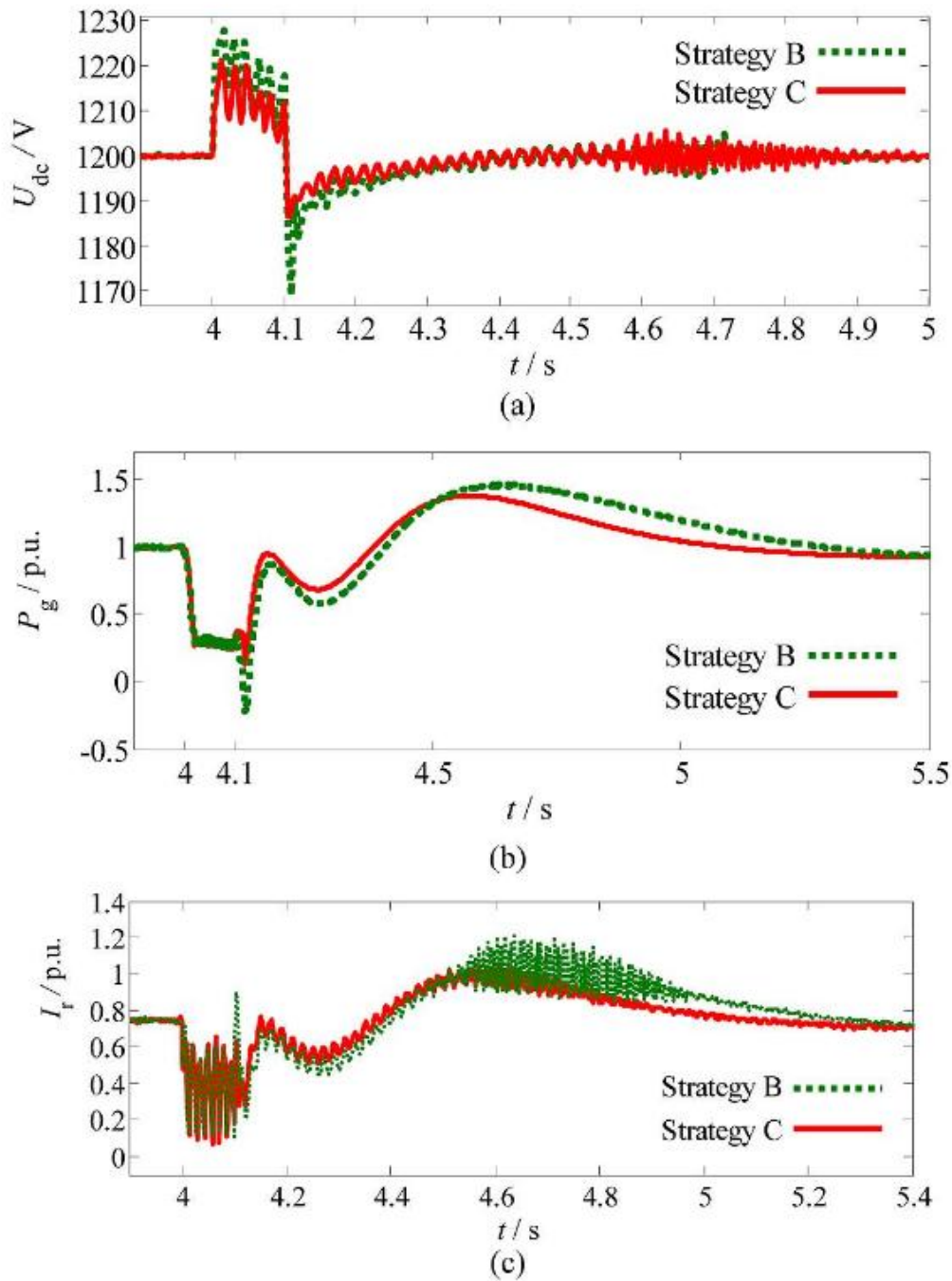


Εικόνα 4.10 – Σχηματικό διάγραμμα ελέγχου μετατροπέα GSC κατά τη διάρκεια σφάλματος δικτύου

4.2.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Για να εξεταστεί η επίδραση της αναγραφόμενης μεθόδου ελέγχου σε περιπτώσεις σημαντικής βύθισης τάσης του δικτύου, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις της λειτουργίας στο πρόγραμμα Matlab Simulink. Έγιναν προσομοιώσεις για την περίπτωση που χρησιμοποιείται το πλήρες σχήμα του ελέγχου (περίπτωση Γ), καθώς και για την περίπτωση που χρησιμοποιείται η εξεταζόμενη μέθοδος μόνο για τον έλεγχο από την πλευρά του δρομέα, ενώ για το μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου διατηρείται ο έλεγχος της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας (περίπτωση Β). Τέλος γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα διάταξης που φέρει κύκλωμα προστασίας crowbar μορφή του οποίου εξετάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο (περίπτωση Α).

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται αποτελέσματα των περιπτώσεων Β και Γ, όπου εφαρμόζεται το εξεταζόμενο σχήμα ελέγχου, για ταχύτητα ανέμου 13 m/s.



Εικόνα 4.11 – Αποτελέσματα προσομοίωσης για περιπτώσεις Β (strategy B) και Γ (strategy C) του ελέγχου σε ταχύτητα ανέμου 13 m/s για βύθιση τάσης διάρκειας 0.1 sec. (a) τάση dc σημείου σύνδεσης. (b) παραγόμενη ενεργός ισχύς. (c) Ένταση ρεύματος δρομέα.

Στο χρονικό σημείο $t=4s$ παρατηρείται τριφασικό βραχυκύκλωμα στο δίκτυο με αποτέλεσμα την πτώση τάσης στο σημείο σύνδεσης της διάταξης στο 20% της ονομαστικής.

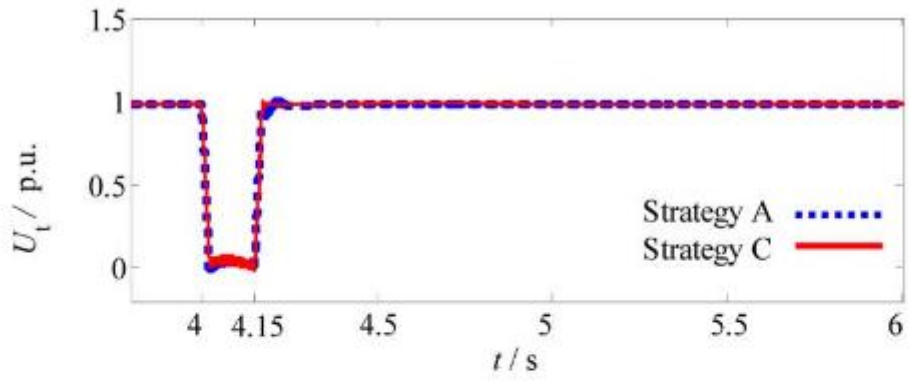
Η παραπάνω εικόνα δείχνει ότι στην περίπτωση Β του σχήματος ελέγχου, όπου δε χρησιμοποιείται η εξεταζόμενη μέθοδος ελέγχου για το μετατροπέα της πλευράς του δικτύου, η τάση στο σημείο διασύνδεσης των μετατροπέων δεν ομαλοποιείται επαρκώς. Καθώς ο έλεγχος του ρεύματος του δρομέα επηρεάζεται από τη διακύμανση της τάσης της dc σύνδεσης, οι μεταβατικές τιμές της ενεργού ισχύος και του ρεύματος του δρομέα της περίπτωση Β είναι χειρότερες από εκείνες της περίπτωσης Γ, όπου εφαρμόζεται το πλήρες σχήμα του εξεταζόμενου ελέγχου. Στην περίπτωση Γ, η διακύμανση της τάσης της dc σύνδεσης έχει ομαλοποιηθεί σημαντικά, και η λειτουργία της διάταξης υπό την πτώση τάσης του δικτύου εμφανίζεται βελτιωμένη. Αυτό συμβαίνει, διότι όταν η ταχύτητα ανέμου είναι στα 13 m/s, ταχύτητα μεγαλύτερη της ονομαστικής, η γεννήτρια θα λειτουργεί στην ονομαστική ταχύτητα περιστροφής. Η υπερτάχυνση που θα προκληθεί από το εφαρμοζόμενο σύστημα ελέγχου θα εξουδετερωθεί από τον ελεγκτή βήματος της γωνίας των πτερυγίων, περιορίζοντας τη μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε κινητική. Επομένως, ακόμα και στην περίπτωση όπου επεμβαίνει ο ελεγκτής βήματος, ο έλεγχος του μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου δρα αποτελεσματικά ως προς την εξομάλυνση της τάσης της dc σύνδεσης των μετατροπέων. Διαπιστώνεται, λοιπόν, ότι το πλήρες σχήμα του ελέγχου είναι αποτελεσματικότερο.

4.2.3.1 Συμπεριφορά σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου

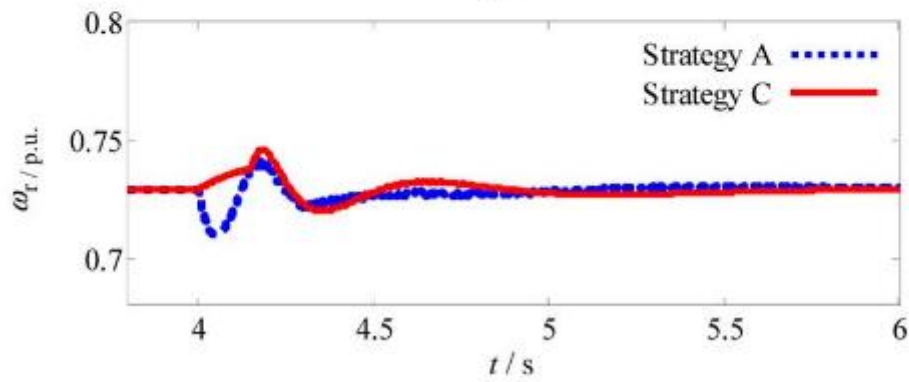
Στην παρακάτω ανάλυση, για να πληρωθούν τα κριτήρια των περιορισμών των διαχειριστών δικτύων για παραμονή των ανεμογεννητριών σε λειτουργία κατά τις περιπτώσεις σφάλματος του δικτύου, θα εξεταστεί η λειτουργία της διάταξης σε δύο τυπικά τριφασικά βραχυκυκλώματα του δικτύου τη χρονική στιγμή $t=4s$, κατά τα οποία η τάση του σημείου σύνδεσης θα πέσει στο 0% της ονομαστικής για 150ms και στο 15% της ονομαστικής για 625ms αντίστοιχα.

Στα αποτελέσματα θα γίνει σύγκριση του εξεταζόμενου σχήματος ελέγχου (περίπτωση Γ) με σχήμα ελέγχου που περιλαμβάνει κύκλωμα crowbar (περίπτωση Α).

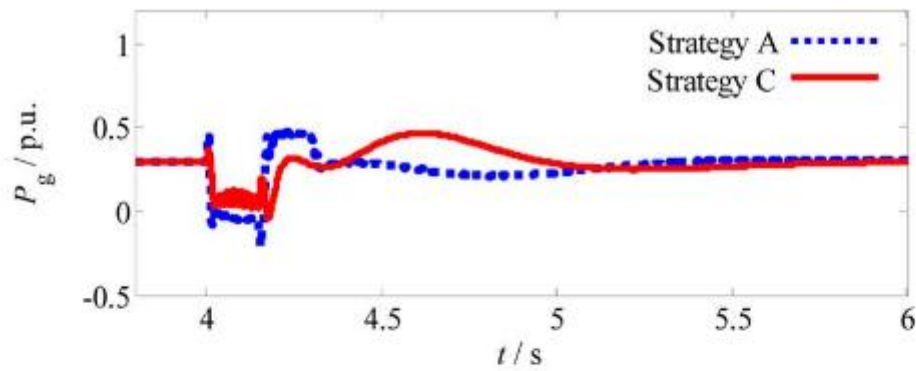
Στην επόμενη εικόνα βλέπουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για πτώση τάσης στο σημείο σύνδεσης στο 0% της ονομαστικής για 150 ms, και για ταχύτητα ανέμου 8 m/s.



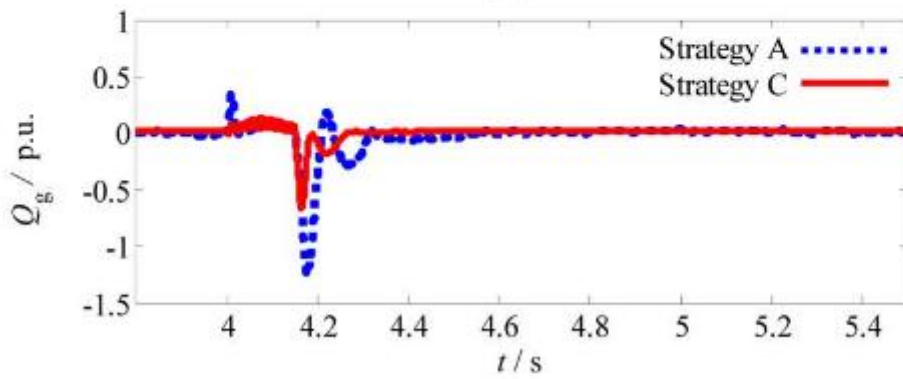
(a)



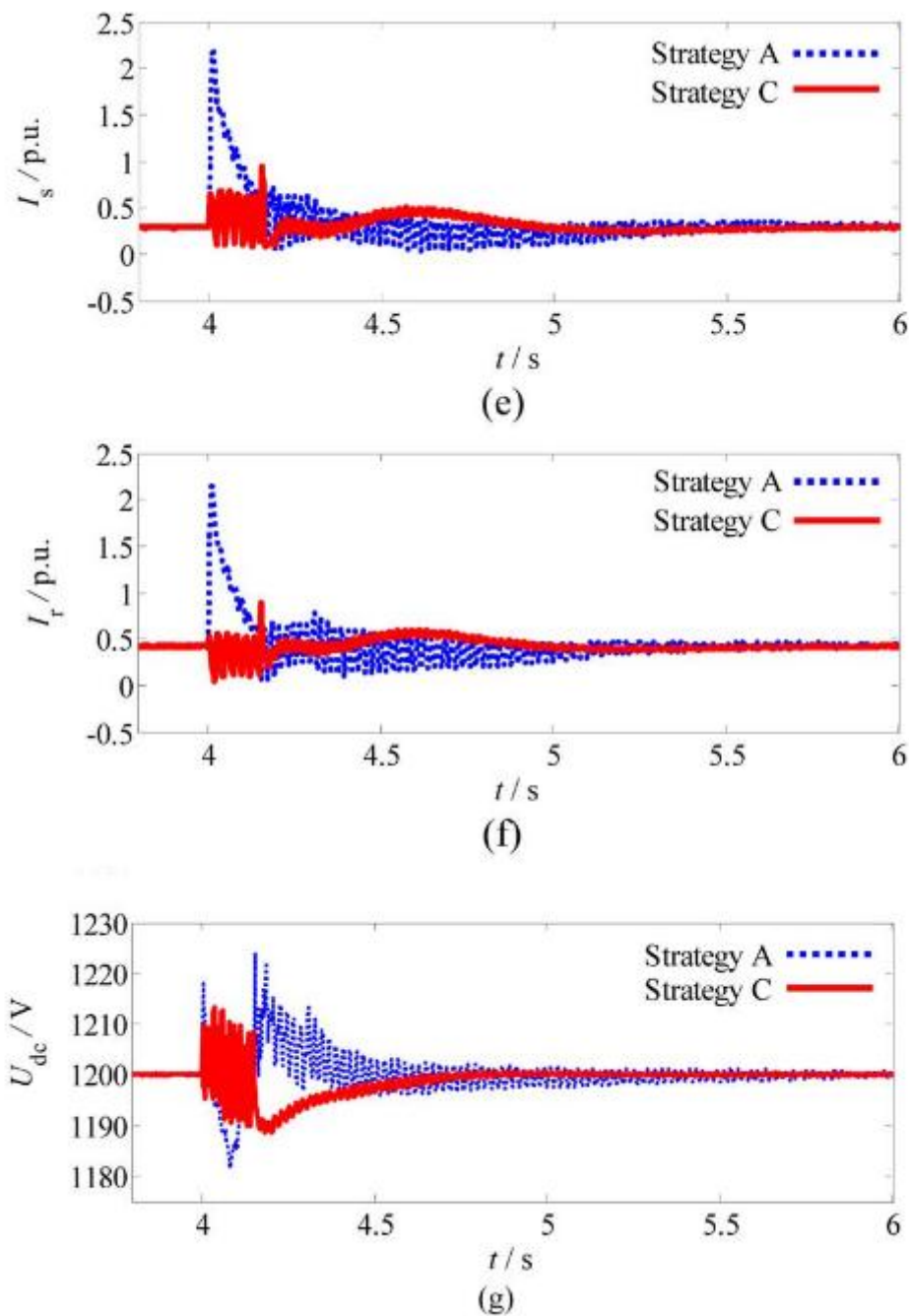
(b)



(c)



(d)



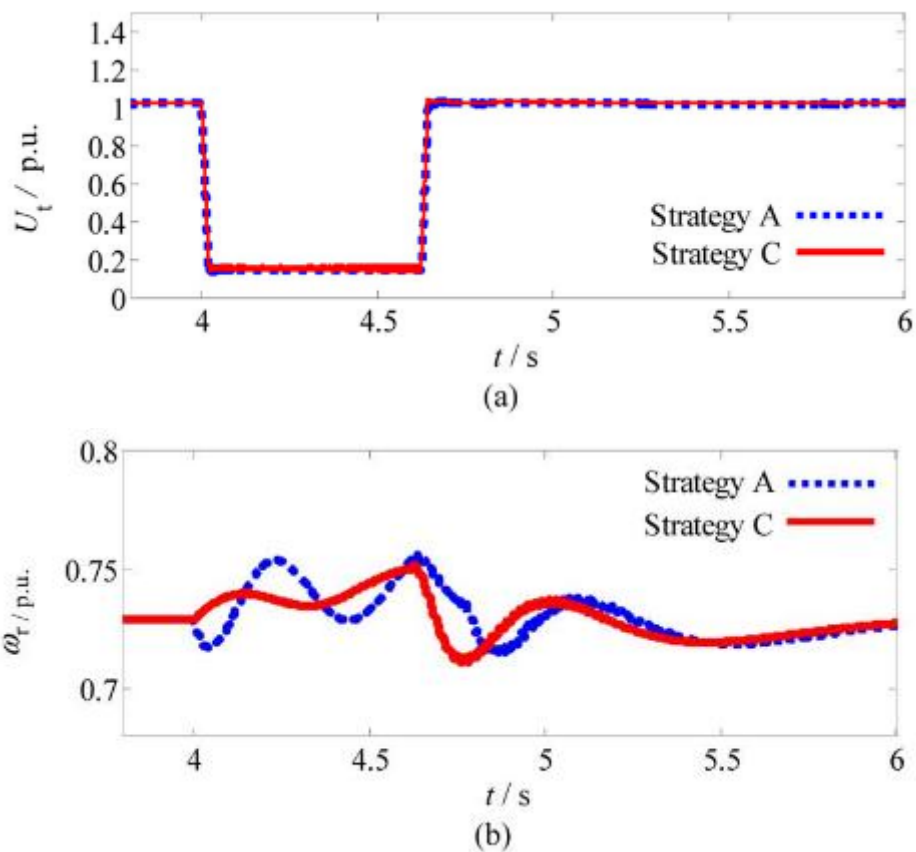
Εικόνα 4.12 – Αποτελέσματα προσομοίωσης για ταχύτητα ανέμου 8 m/s για περιπτώσεις ελέγχου Α και Γ (strategies A και C) σε βύθιση τάσης 100% για 150 ms. (a) Τάση στο σημείο σύνδεσης τη γεννήτριας. (b) Ταχύτητα δρομέα. (c) Παραγόμενη ενεργός ισχύς. (d) Παραγόμενη άεργος ισχύς. (e) Ένταση ρεύματος στάτη (f) Ένταση ρεύματος δρομέα (g) Τάση dc σημείου σύνδεσης

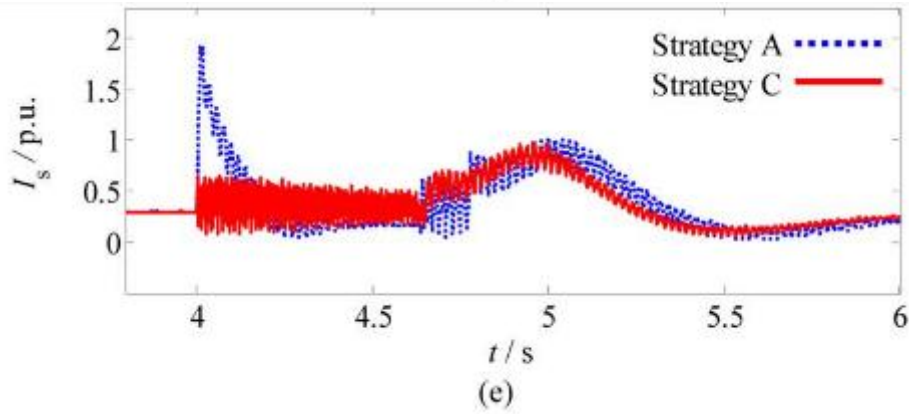
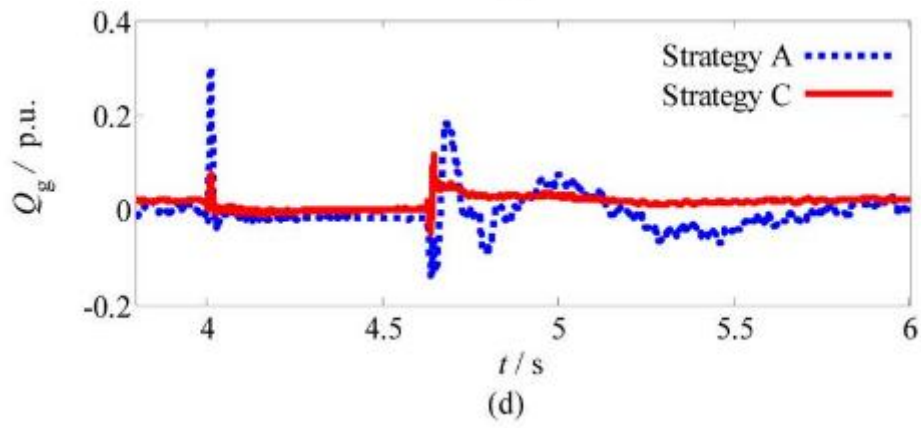
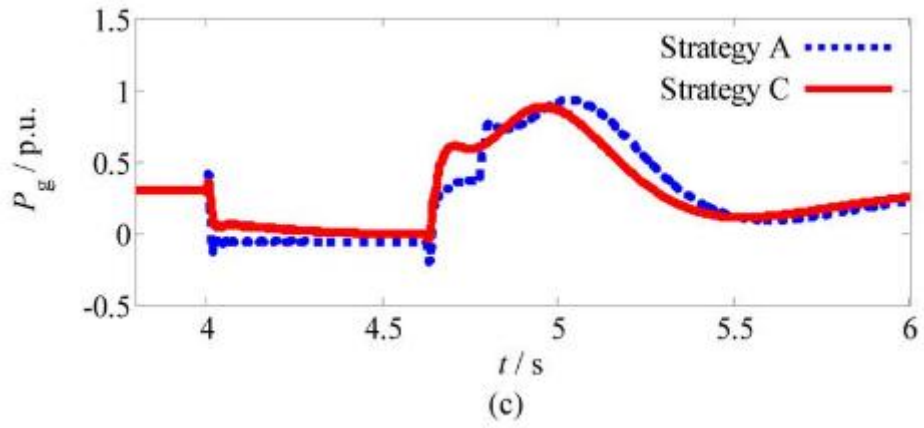
Κατά τη διάρκεια του σφάλματος, η επιτάχυνση του δρομέα είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση του εξεταζόμενου ελέγχου σε σχέση με την περίπτωση Α. Η ενεργή επιτάχυνση του δρομέα, για την περίπτωση Γ, μετατρέπει την επιπλέον ενέργεια της μηχανής σε κινητική, μειώνοντας

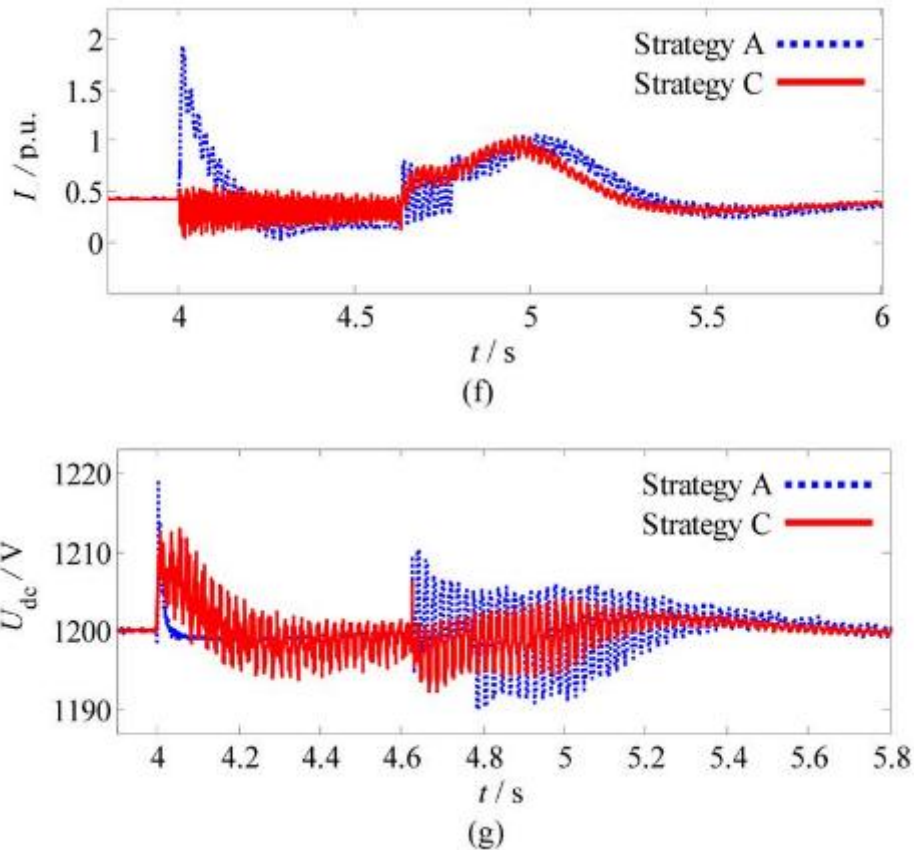
σημαντικά τα μεταβατικά φαινόμενα στην ενεργό, την άεργο ισχύ και στα ρεύματα του στάτη και του δρομέα της μηχανής, καθώς και στην τάση του σημείου dc σύνδεσης.

Για παράδειγμα, το ρεύμα δρομέα στην περίπτωση A ανεβαίνει στην τιμή 2.2 ανά μονάδα τη στιγμή του σφάλματος, ενώ για την περίπτωση Γ η τιμή δεν ξεπερνά το 0.96 ανά μονάδα. Επίσης, παρατηρείται ότι μετά την εκκαθάριση του σφάλματος, η ταχύτητα του δρομέα μειώνεται στην τιμή αναφοράς και οι διακυμάνσεις των μεγεθών της γεννήτριας εξομαλύνονται επιτυχώς στην περίπτωση Γ του ελέγχου.

Στην εικόνα 4.13 βλέπουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για πτώση τάσης στο σημείο σύνδεσης στο 15% της ονομαστικής για 625 ms, και για ταχύτητα ανέμου πάλι στα 8 m/s.





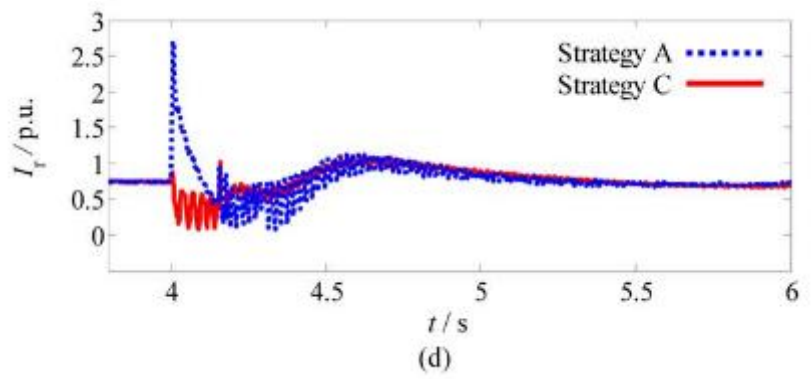
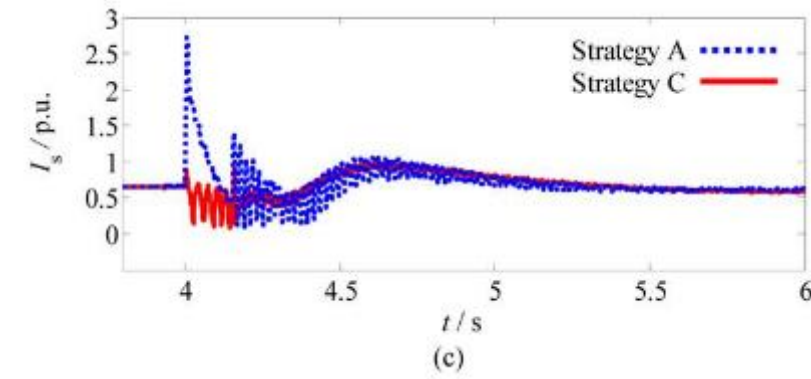
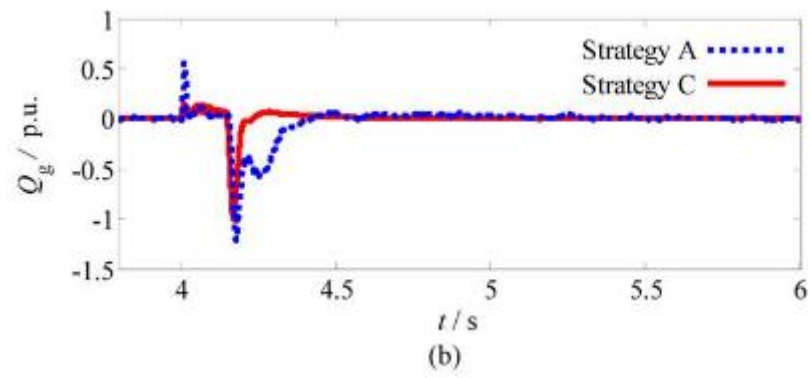
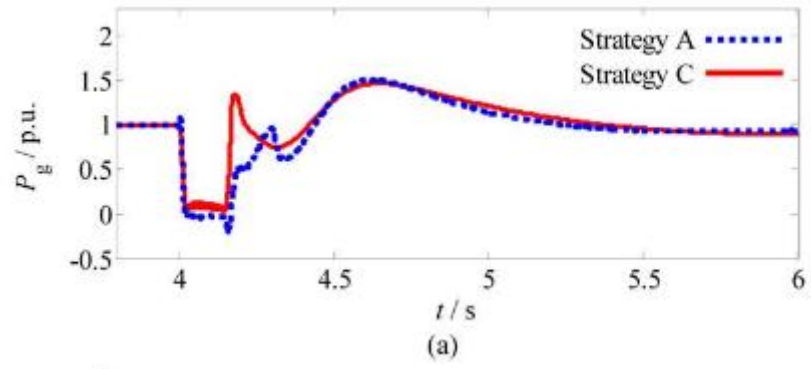


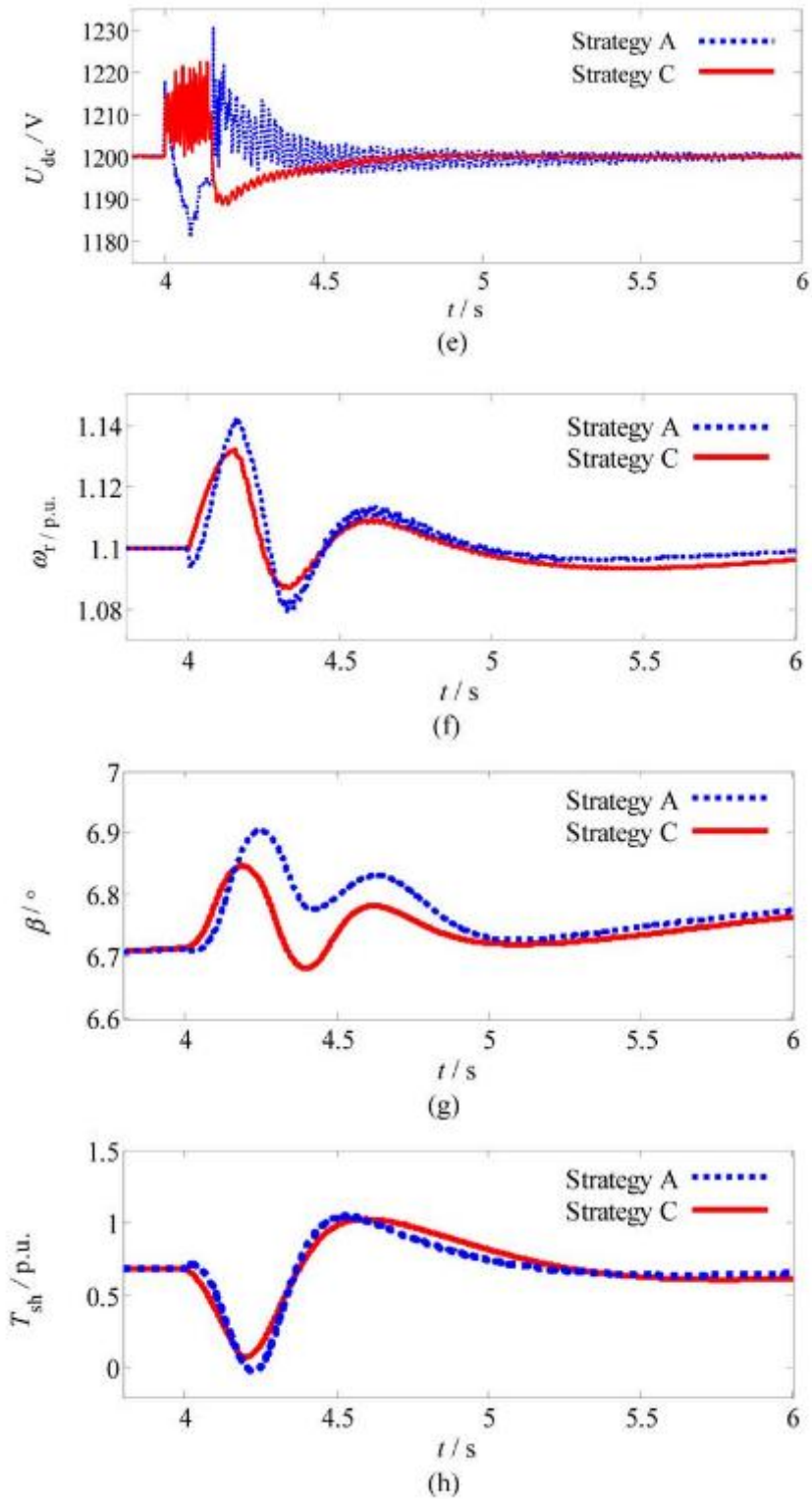
Εικόνα 4.13 – Αποτελέσματα προσομοίωσης για ταχύτητα ανέμου 8 m/s για περιπτώσεις ελέγχου Α και Γ (strategies Α και C) σε βύθιση τάσης 85% για 625 ms. (α) Τάση στο σημείο σύνδεσης τη γεννήτριας. (β) Ταχύτητα δρομέα. (γ) Παραγόμενη ενεργός ισχύς. (δ) Παραγόμενη άεργος ισχύς. (ε) Ένταση ρεύματος στάτη (f) Ένταση ρεύματος δρομέα (g) Τάση dc σημείου σύνδεσης

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η ανεμογεννήτρια μπορεί, υπό το σχήμα του εξεταζόμενου ελέγχου, να παραμείνει συνδεδεμένη στο δίκτυο και σε περιπτώσεις σφαλμάτων μεγαλύτερης διάρκειας, χωρίς να απαιτείται η χρήση κυκλώματος προστασίας crowbar.

4.2.3.2 Συμπεριφορά σε υψηλές ταχύτητες ανέμου

Στην εικόνα 4.14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για πτώση τάσης στο σημείο σύνδεσης στο 0% της ονομαστικής για 150 ms, και για ταχύτητα ανέμου στα 13 m/s.

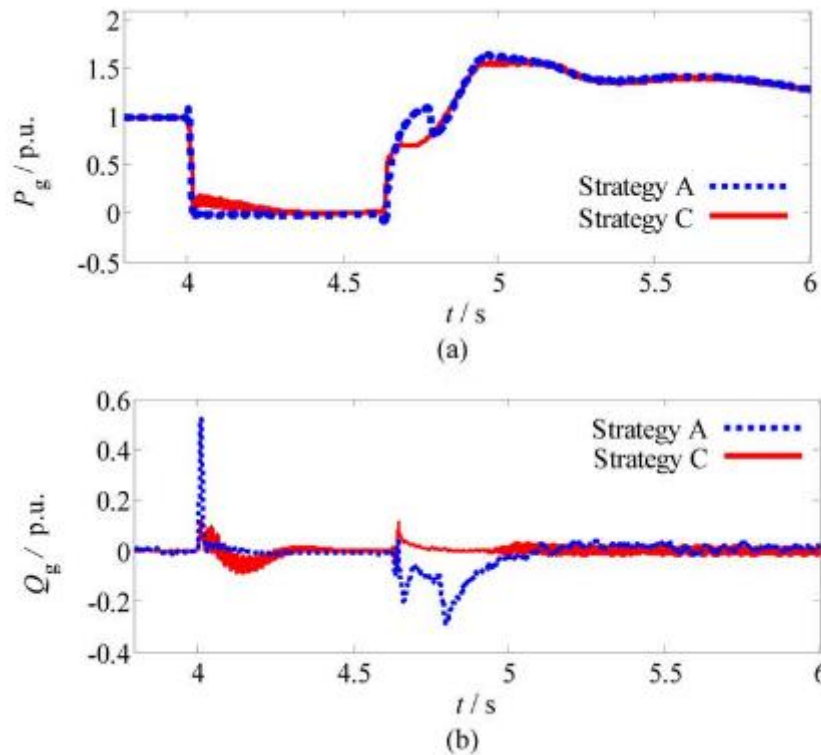


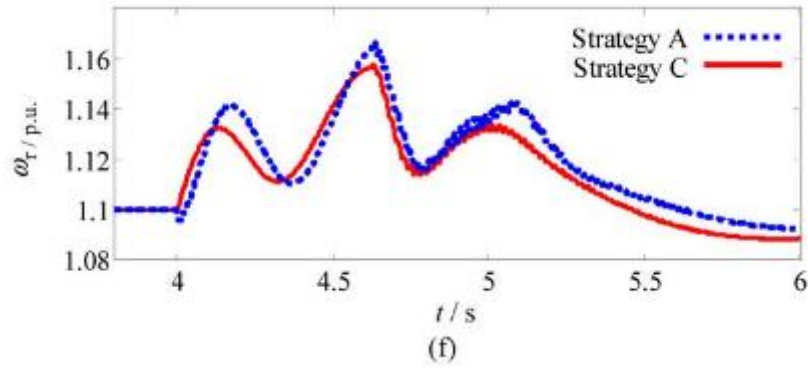
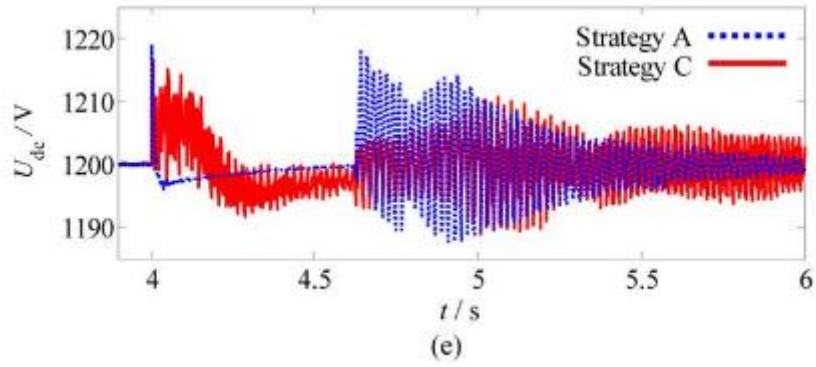
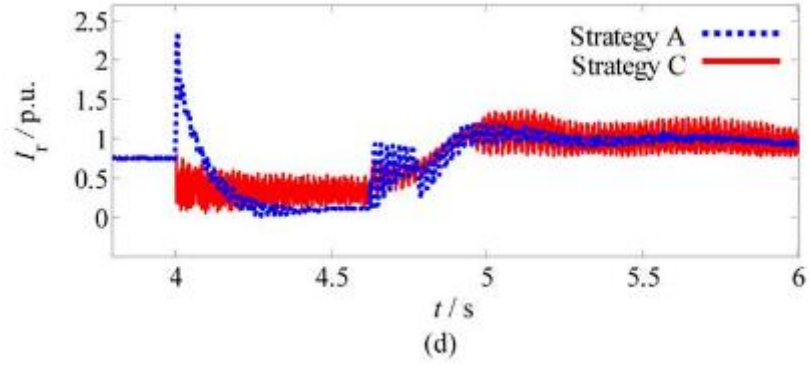
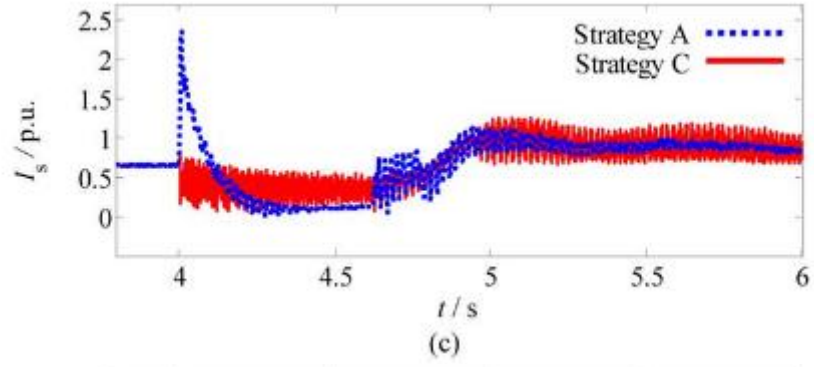


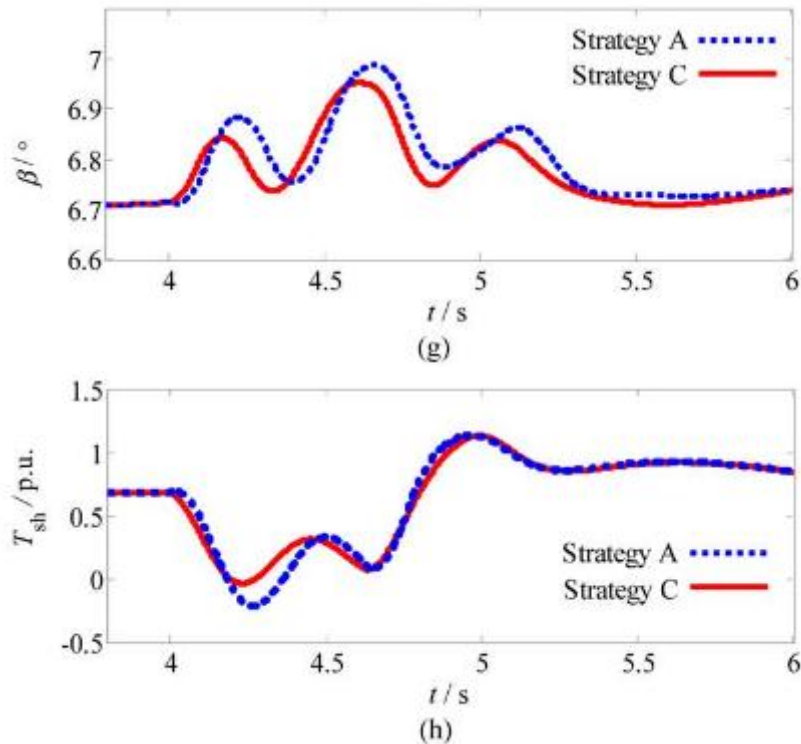
Εικόνα 4.14 - Αποτελέσματα προσομοίωσης για ταχύτητα ανέμου 13 m/s για περιπτώσεις ελέγχου Α και Γ (strategies Α και C) σε βύθιση τάσης 100% για 150 ms. (α) Παραγόμενη ενεργός ισχύς. (β) Παραγόμενη άεργος ισχύς. (γ) Ένταση ρεύματος στάτη. (δ) Ένταση ρεύματος δρομέα. (ε) Τάση dc σημείου σύνδεσης. (f) Ταχύτητα δρομέα. (g) Γωνία βήματος πτερυγίων. (h) Ροπή.

Όταν η γεννήτρια λειτουργεί με ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερη της ονομαστικής ταχύτητας ανέμου, η μηχανή διατηρεί την ονομαστική ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Ενδεχόμενη υπερτάχυνση του δρομέα θα εξουδετερωθεί από τον ελεγκτή βήματος των πτερυγίων. Συνεπώς, παρατηρούμε ότι οι διαφορές στην τάση της dc σύνδεσης, στην ταχύτητα του δρομέα και στη ροπή του άξονα περιστροφής κατά τη διάρκεια του σφάλματος, είναι μικρές μεταξύ των περιπτώσεων Α και Γ του ελέγχου, σε σχέση με τη λειτουργία σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου. Παρόλα αυτά, η μεταβατική συμπεριφορά της ενεργού και αέργου ισχύος, καθώς και των ρευμάτων στάτη και δρομέα, πάλι εμφανίζεται καλύτερη στην περίπτωση Γ του ελέγχου. Συγκεκριμένα, το εξεταζόμενο σχήμα ελέγχου επιτυγχάνει τον περιορισμό των ρευμάτων της μηχανής και επιτρέπει τη διατήρηση του ελέγχου της κατά τη διάρκεια του σφάλματος, συμβάλλοντας στην επαναφορά του δικτύου.

Στην εικόνα 4.15 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για πτώση τάσης στο σημείο σύνδεσης στο 15% της ονομαστικής για 625 ms, και για ταχύτητα ανέμου στα 13 m/s.







Εικόνα 4.15 - Αποτελέσματα προσομοίωσης για ταχύτητα ανέμου 13 m/s για περιπτώσεις ελέγχου Α και Γ (strategies Α και C) σε βύθιση τάσης 85% για 625 ms. (a) Παραγόμενη ενεργός ισχύς. (b) Παραγόμενη άεργος ισχύς. (c) Ένταση ρεύματος στάτη. (d) Ένταση ρεύματος δρομέα. (e) Τάση dc σημείου σύνδεσης. (f) Ταχύτητα δρομέα. (g) Γωνία βήματος πτερυγίων. (h) Ροπή.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η ανεμογεννήτρια μπορεί, για υψηλές ταχύτητες ανέμου, υπό το σχήμα του εξεταζόμενου ελέγχου, να παραμείνει συνδεδεμένη στο δίκτυο και σε περιπτώσεις σφαλμάτων μεγαλύτερης διάρκειας, χωρίς να απαιτείται η χρήση κυκλώματος προστασίας crowbar.

Σημειώνεται ότι στις εικόνες 4.14 και 4.15, η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα υπερβαίνει την ονομαστική τιμή.

Παρόλα αυτά, η μέγιστη υπερτάχυνση της μηχανής περιορίζεται στο 2.72% και η περίοδος της υπερτάχυνσης είναι 230ms για την περίπτωση σφάλματος με πτώση τάσης στο 0% της ονομαστικής. Ενώ για την περίπτωση σφάλματος με πτώση τάσης στο 15% της ονομαστικής, η μέγιστη υπερτάχυνση περιορίζεται στο 6.06%, με διάρκεια τα 1.5 s. Οι προκαλούμενες μηχανικές πιέσεις έχουν μικρή επίδραση στο μηχανικό σχεδιασμό της γεννήτριας.

Καταλήγουμε ότι το εξεταζόμενο σχήμα ελέγχου περιορίζει αποτελεσματικά τα μεταβατικά φαινόμενα στο κύκλωμα του δρομέα και στο σημείο σύνδεσης των μετατροπέων, με μικρές επιπτώσεις στο μηχανικό

σχεδιασμό της γεννήτριας. Παράλληλα, δεν απαιτεί για την εφαρμογή του προσθήκη επιπλέον κυκλωμάτων στη διάταξη της ασύγχρονης γεννήτριας διπλής τροφοδότησης. Τέλος, ο έλεγχος της μηχανής διατηρείται καθόλη τη διάρκεια του σφάλματος στο δίκτυο, δίνοντας τη δυνατότητα η γεννήτρια να συμβάλει στην αποκατάσταση του δικτύου.

4.4 Τροφοδότηση σήματος μεταβατικών ρευμάτων σε μετατροπέα

4.4.1 Περιγραφή εξεταζόμενης μεθόδου

Εξετάζεται και μία τρίτη τεχνική ελέγχου για την παραμονή μίας ΓΕΔΤ σε λειτουργία κατά την πτώση τάσης στο δίκτυο. Όπως έχουμε περιγράψει, η πτώση τάσης στο σημείο σύνδεσης της γεννήτριας λόγω σφάλματος του δικτύου, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία υψηλών μεταβατικών ρευμάτων στο στάτη, και συνεπώς στο δρομέα της μηχανής. Η μέθοδος ελέγχου που θα εξεταστεί βασίζεται στην ιδέα τροφοδότησης του σήματος των μεταβατικών μεγεθών (feed-forward transient current control – FFTCC) στον ελεγκτή του μετατροπέα της πλευράς του δρομέα. Βάσει του δυναμικού μοντέλου της διάταξης, εντοπίζονται οι μεταβατικοί όροι της τάσης του στάτη και τροφοδοτούνται στον ελεγκτή ρεύματος του μετατροπέα της πλευράς του δρομέα. Αυτοί οι μεταβατικοί όροι συμβάλουν στην αντιμετώπιση των μεταβατικών φαινομένων στο στάτη στο βαθμό που επιτρέπει το μέγεθος του μετατροπέα. Επιτυγχάνεται προσανατολισμός της τάσης του δρομέα με τη μεταβατική τάση στο στάτη, με αποτέλεσμα το μεταβατικό ρεύμα στο δρομέα να ελαχιστοποιείται κατά τη βύθιση της τάσης στο δίκτυο.

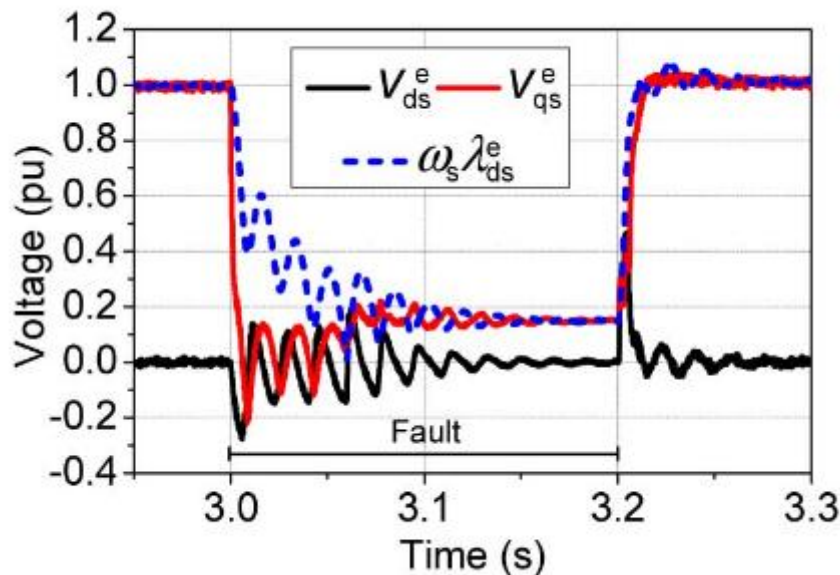
4.4.2 Εξεταζόμενο σύστημα ελέγχου

Όπως είδαμε στα προηγούμενα κεφάλαια, για τον έλεγχο της διάταξης, χρησιμοποιείται μέθοδος διανυσματικού ελέγχου των μετατροπέων σε περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς. Για τον έλεγχο του μετατροπέα από την πλευρά του δρομέα, συνήθως επιλέγεται σύστημα αναφοράς προσανατολισμένο με τη ροή του στάτη. Δεδομένου αυτού του προσανατολισμού, και θεωρώντας την αντίσταση των κυκλωμάτων του στάτη αμελητέα, διατυπώθηκαν για τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας οι παρακάτω εξισώσεις για την τάση στο στάτη:

$$V_{qs} = \omega_{qdo} \cdot \lambda_{ds} \quad (4.14)$$

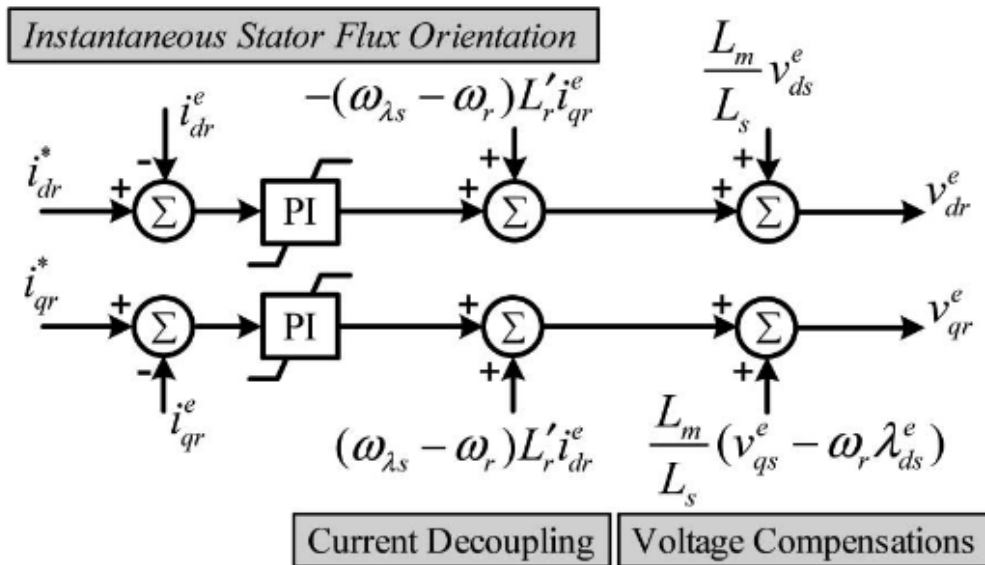
$$V_{ds} = 0 \quad (4.15)$$

Για να βελτιωθεί η συμπεριφοράς του σχήματος ελέγχου στη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας, οι απλοποιήσεις που έγιναν στις εξισώσεις της τάσης του στάτη βάσει του προσανατολισμού του πεδίου αναφοράς, δεν πρέπει να ληφθούν υπόψη. Όπως διαπιστώνεται στην εικόνα 4.16, όπου εμφανίζονται τυπικές τιμές των μεγεθών V_{ds} , V_{qs} και $\omega_s \lambda_{ds}$ κατά τη διάρκεια τριφασικού βραχυκυκλώματος στο δίκτυο, με την τάση του στάτη να πέφτει στο 15% της ονομαστικής, η χρονική σταθερά μείωσης της ροής στο στάτη είναι σημαντικά μεγαλύτερη από εκείνη μείωσης της τάσης του στάτη. Γίνεται εμφανές ότι οι ανωτέρω εξισώσεις για την τάση στο στάτη δεν ισχύουν κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Οι μεγάλες διακυμάνσεις στην τάση του στάτη κατά την περίοδο του σφάλματος, οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στον προσανατολισμό του συστήματος αναφοράς ως προς τη ροή του στάτη, καθώς σε αυτό το μεταβατικό χρονικό διάστημα η ταχύτητα περιστροφής της ροής του στάτη είναι διαφορετική από εκείνη της τάσης του στάτη.



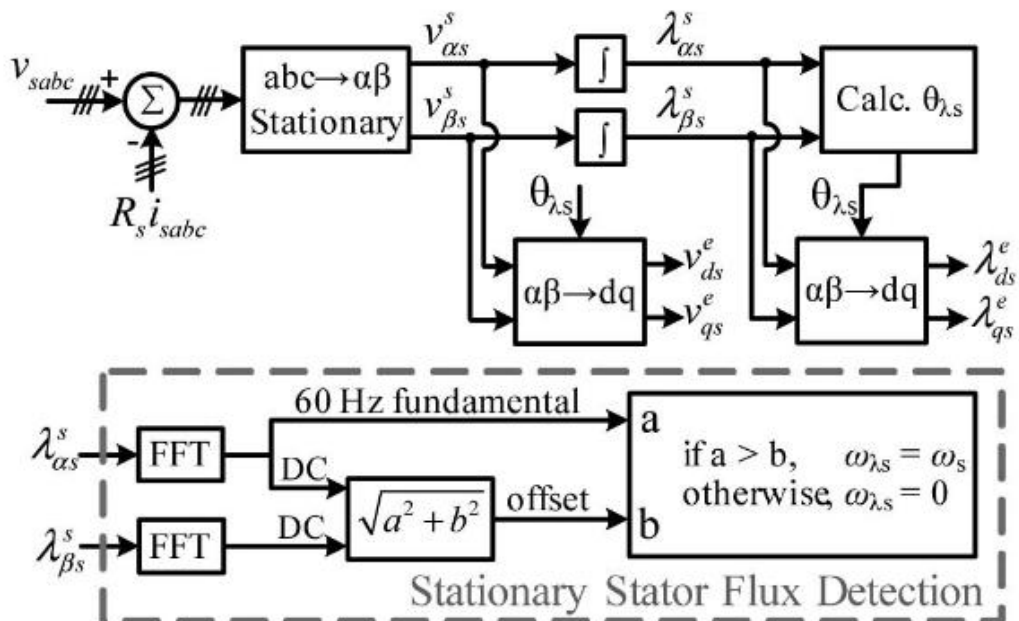
Εικόνα 4.16 – Τυπικές κυματομορφές ροής και τάσης στο στάτη της μηχανής κατά τη διάρκεια σοβαρού τριφασικού βραχυκυκλώματος στο δίκτυο

Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε το εξεταζόμενο σχήμα ελέγχου για να ξεπεραστεί η προηγούμενη αστοχία.



Εικόνα 4.17 – Σχηματικό διάγραμμα εξεταζόμενου ελέγχου (FFTCC)

Η ροή του στάτη υπολογίζεται ολοκληρώνοντας την τάση του στάτη στο σταθερό σύστημα αναφοράς αβ. Το διάγραμμα υπολογισμού της ροής φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Έπειτα, η γωνία για το μετασχηματισμό στο περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς dq λαμβάνεται υπολογίζοντας τη γωνία του διανύσματος της ροής του στάτη στο σταθερό πλαίσιο αναφοράς αβ.



Εικόνα 4.18 – Σχηματικό διάγραμμα προσανατολισμού διανύσματος ροής στάτη, συμπεριλαμβανομένου διαγράμματος μετασχηματισμού του διανύσματος ροής στάτη και διαγράμματος εντοπισμού του.

Τέλος, χρειάζεται να υπολογιστεί η ταχύτητα περιστροφής της ροής του στάτη γύρω από τον άξονα περιστροφής της μηχανής. Μία μεγάλη βύθιση τάσης θα προκαλέσει σημαντική dc συνιστώσα στη ροή του στάτη, δηλαδή μία μετάθεση του κέντρου περιστροφής του διανύσματος της ροής του στάτη. Όταν αυτή η μετάθεση είναι μεγαλύτερη από την ακτίνα περιστροφής η ροή του στάτη γίνεται σταθερή, και το πλαίσιο αναφοράς dq σταματά να περιστρέφεται ($\omega_{qd0} \approx 0$). Όταν προκύπτει αυτού του είδους μαγνητική ροή, η συχνότητα στο κύκλωμα του δρομέα γίνεται $-\omega_r$. Τότε χρειάζεται μία πρόσθετη μονάδα υπολογισμού της ροής του στάτη, όπως φαίνεται στο κάτω μέρος της εικόνας 4.18. Η μετάθεση του κέντρου περιστροφής του διανύσματος της ροής υπολογίζεται εξάγοντας τις dc συνιστώσες των μεγεθών $\lambda_{\alpha s}$ και $\lambda_{\beta s}$. Η ακτίνα περιστροφής της ροής είναι ίση με την κύρια συνιστώσα των 60Hz της ροής $\lambda_{\alpha s}$ ή $\lambda_{\beta s}$. Συγκρίνοντας τη συνιστώσα της μετάθεσης με την κύρια συνιστώσα, διαπιστώνεται αν παρατηρείται σταθερή ροή ή όχι.

Το βελτιωμένο σχήμα ελέγχου οδηγεί σε αποδοτικότερο έλεγχο κατά την περίπτωση σφαλμάτων στο δίκτυο, ενώ στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας ισοδυναμεί με το σύστημα ελέγχου που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 3.

Εδώ θα πρέπει να αναφερθούν κάποια πράγματα σχετικά με τις δυνατότητες του εξεταζόμενου σχήματος ελέγχου, βάσει των ονομαστικών μεγεθών του μετατροπέα της πλευράς του δρομέα.

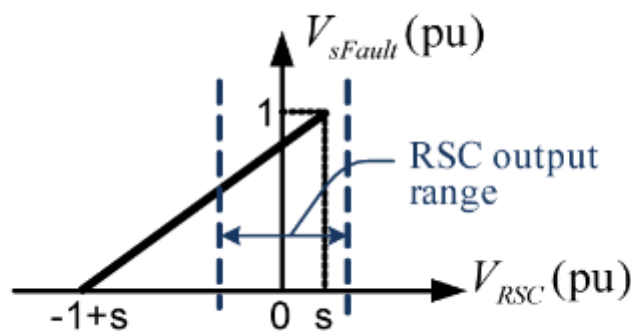
Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας η τάση στα άκρα του μετατροπέα από την πλευρά του δρομέα είναι περίπου sV_s . Αν αγνοηθεί το ρεύμα μαγνήτισης, τα ρεύματα στάτη και δρομέα της μηχανής έχουν την ίδια τιμή ανά μονάδα. Εφόσον η ολίσθηση της μηχανής περιορίζεται στο διάστημα τιμών $[-0.3, 0.3]$, τότε ο μετατροπέας της πλευράς του δρομέα θα πρέπει να μπορεί να παρέχει τάση τουλάχιστον στο 30% της ανά μονάδα τάσης του στάτη. Δηλαδή ο μετατροπέας θα πρέπει να έχει ονομαστικά χαρακτηριστικά στο 30% εκείνων της μηχανής.

Η ροή του στάτη, κατά την περίπτωση σφάλματος στο δίκτυο, δε μειώνεται απότομα αλλά βάσει μίας χρονικής σταθεράς. Η ροή πριν το σφάλμα είναι ίση με V_s/ω_s όπου με V_s συμβολίζεται η τάση πριν την εμφάνιση του σφάλματος. Αν μία ξαφνική βύθιση τάσης παρατηρηθεί στο δίκτυο, η απαιτούμενη τάση στα άκρα του μετατροπέα, για να αντιμετωπιστεί το μεταβατικό φαινόμενο, θα είναι τη στιγμή του σφάλματος:

$$V_{RSC} = V_{s+} - (1 - s)V_{s-} \quad (4.16)$$

Όπου οι τάσεις αναφέρονται στην πλευρά του δρομέα και με V_{s+} συμβολίζεται η τάση του στάτη αμέσως μετά την εμφάνιση του σφάλματος.

Υποθέτοντας τάση του στάτη πριν το σφάλμα ίση με 1 ανά μονάδα, η εικόνα 4.19 δείχνει την τιμή τάσης που απαιτείται από το μετατροπέα για την αντιμετώπιση του μεταβατικού φαινομένου συναρτήσει της τάσης του στάτη κατά το σφάλμα. Η δυσμενέστερη περίπτωση εμφανίζεται όταν η μηχανή λειτουργεί στη μέγιστη υπερσύγχρονη ταχύτητα, π.χ. για ολίσθηση $s=-0.3$. Στην περίπτωση αυτή, εάν η τάση του στάτη μειωθεί απότομα στο μηδέν, τότε ο μετατροπέας της πλευράς του δρομέα θα πρέπει να παρέχει στους ακροδέκτες του τάσης με τιμή 1.3 ανά μονάδα.



Εικόνα 4.19 – Απαιτούμενη τάση από τον μετατροπέα RSC αμέσως μετά τη βύθιση τάσης, προκειμένου να μηδενιστεί το μεταβατικό ρεύμα δρομέα.

Καθίσταται σαφές ότι η εξεταζόμενη μέθοδος ελέγχου εξαρτάται από το μέγεθος του μετατροπέα της πλευράς του δρομέα. Συμβολίζοντας με k το μέγιστη δυνατή τάση που μπορεί να παρέχει ο μετατροπέας, τότε για ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα το εξεταζόμενο σχήμα ελέγχου είναι δυνατό να εξαλείψει το μεταβατικό ρεύμα στο δρομέα για πτώση τάσης στο στάτη σύμφωνη με τον παρακάτω περιορισμό:

$$V_{s+} > 1 - s - k(\alpha. \mu.) \quad (4.17)$$

Στις περιπτώσεις που το μέγεθος του μετατροπέα δεν επιτρέπει την εξάλειψη του μεταβατικού ρεύματος στο δρομέα, επιτυγχάνεται απλώς η ελαχιστοποίησή του.

Για ασύμμετρες βυθίσεις τάσης, δε χρειάζεται ο υπολογισμός της συνιστώσας της αρνητικής ακολουθίας, αλλά αρκεί για την εξεταζόμενη μέθοδο ελέγχου να υπολογιστεί η στιγμιαία ταχύτητα περιστροφής του

διανύσματος της ροής του σάτη, και γι αυτό αντικαθίσταται το διάγραμμα υπολογισμού της ροής της εικόνας 4.18 με τον παρακάτω τύπο:

$$\omega_{\lambda_s} = \frac{(V_{\beta s} \lambda_{\alpha s} + V_{\alpha s} \lambda_{\beta s})}{(\lambda_{\alpha s}^2 + \lambda_{\beta s}^2)} \quad (4.18)$$

4.4.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης

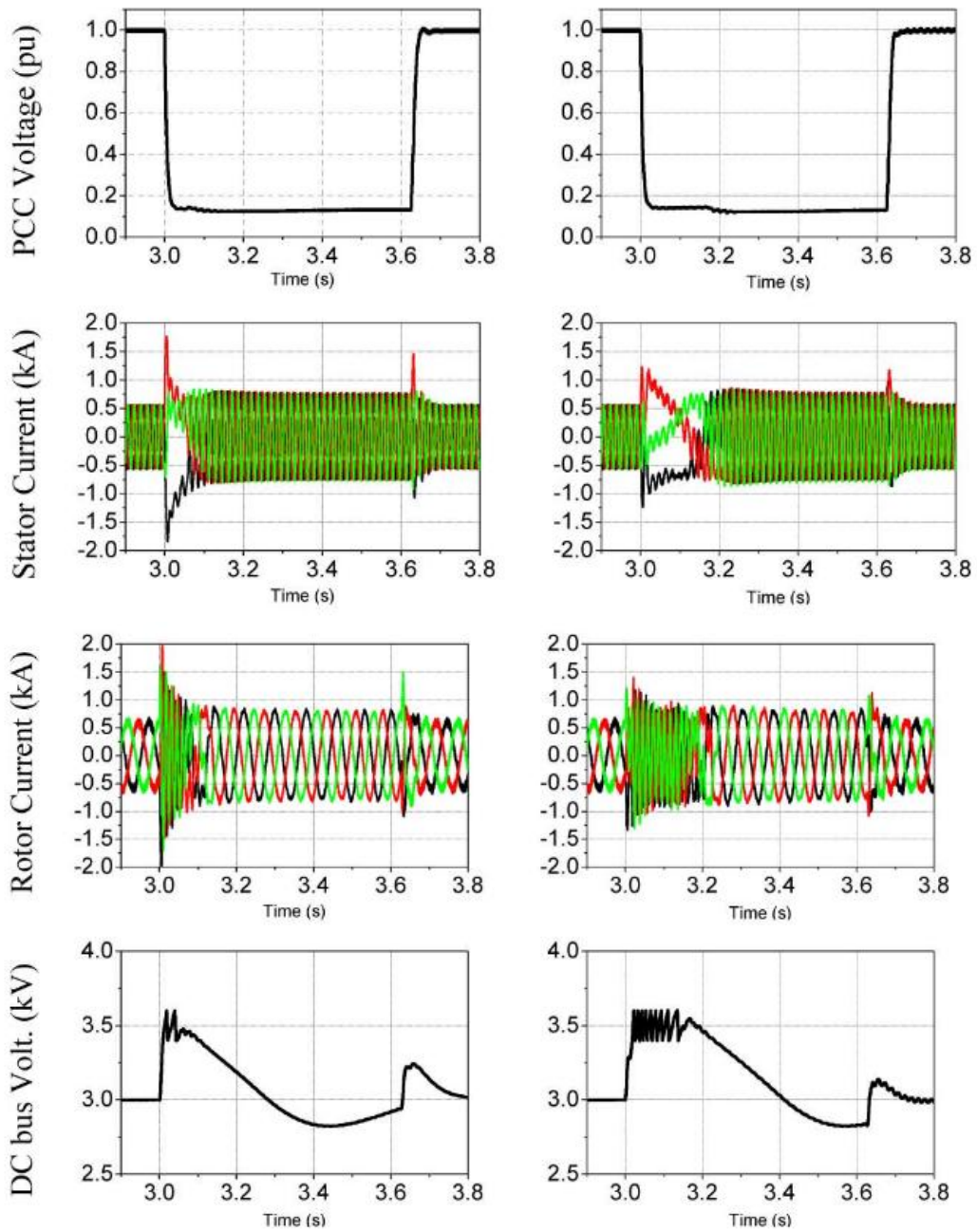
Για να εξεταστεί η επίδραση της αναγραφόμενης μεθόδου ελέγχου σε περιπτώσεις βύθισης τάσης του δικτύου, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις της λειτουργίας στο πρόγραμμα Matlab Simulink. Στην πρώτη περίπτωση που προσομοιώθηκε υποτέθηκε τριφασικό βραχυκύκλωμα στο δίκτυο με πτώση τάσης στο σημείο σύνδεσης στο 15% της ονομαστικής διάρκειας 625 ms. Στη δεύτερη περίπτωση υποτέθηκε τριφασικό βραχυκύκλωμα στο δίκτυο με πτώση τάσης στο σημείο σύνδεσης στο 55% της ονομαστικής για χρονικό διάστημα 200ms.

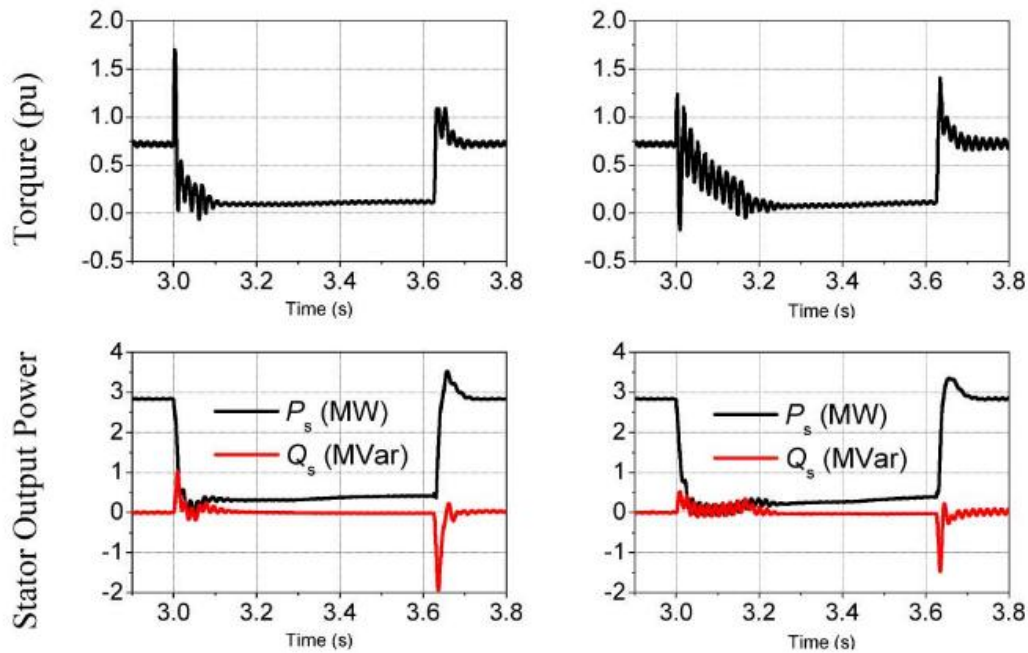
4.4.3.1 Περίπτωση 1

Η εικόνα 4.20 δείχνει την απόκριση της ΓΕΔΤ κατά τη διάρκεια σημαντικής βύθισης τάσης, διακρίνοντας δύο περιπτώσεις ελέγχου. Στην αριστερή στήλη παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του συστήματος που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3, και στη δεξιά τα αποτελέσματα εφόσον εφαρμοστεί το εξεταζόμενο σύστημα ελέγχου. Παρατηρείται ότι η περιγραφόμενη μέθοδος ελέγχου περιορίζει το ρεύμα του δρομέα κατά την εμφάνιση του σφάλματος σε 1,4 kA από 2 kA. Συνεπώς, αν το κατώφλι ενεργοποίησης του συστήματος προστασίας crowbar τεθεί δύο φορές πάνω από την ονομαστική τιμή των ρευμάτων της μηχανής, τότε δεν απαιτείται ενεργοποίησή του.

(a) Conventional FFCR

(b) Proposed FFTCC





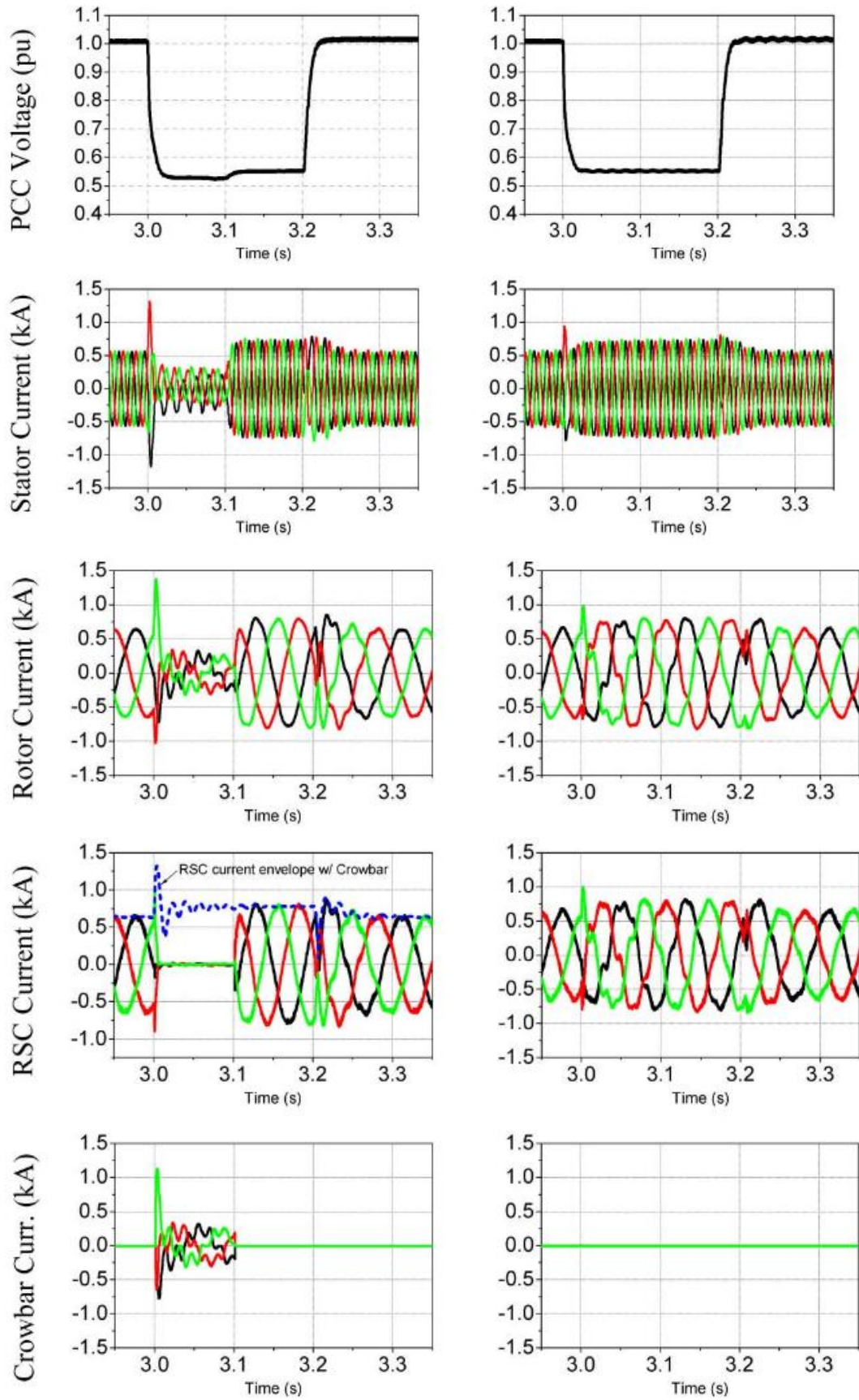
Εικόνα 4.20 – Αποτελέσματα προσομοίωσης υπό σοβαρό τριφασικό σφάλμα διάρκειας 625 ms. Στην αριστερή στήλη (a) αποτελέσματα απλού σχήματος ελέγχου. Στη δεξιά στήλη (b) τα αποτελέσματα με το εξεταζόμενο σχήμα ελέγχου.

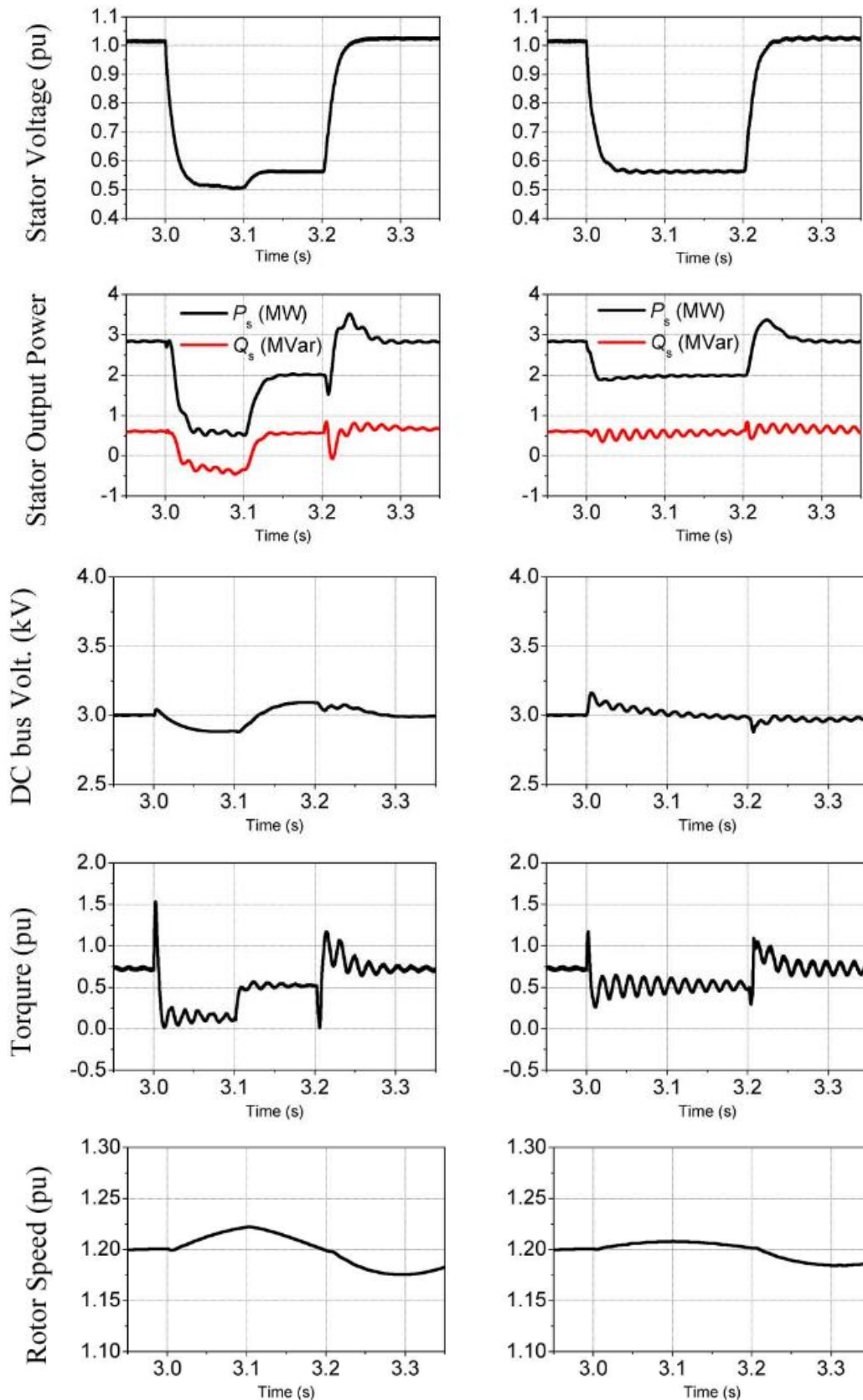
Επειδή το σφάλμα της περίπτωσης 1 αφορά σημαντική πτώση τάσης στο σημείο σύνδεσης, η μεταβατική ροή του στάτη θα αποτελείται από μία μεγάλη dc συνιστώσα, και κατ' επέκταση σημαντικές dc συνιστώσες στα ρεύματα του στάτη. Παρατηρήθηκε κατά την προσομοίωση ότι εφαρμόζοντας την εξεταζόμενη μέθοδο ελέγχου η μεταβατική περίοδος των ρευμάτων διαρκεί περισσότερο. Η μορφή των κυματομορφών των ρευμάτων φανερώνει ότι αυτό οφείλεται στο ότι η dc συνιστώσα της ροής του στάτη μειώνεται βραδύτερα υπό τη χρήση του εξεταζόμενου σχήματος ελέγχου.

4.4.3.2 Περίπτωση 2

Στην περίπτωση αυτή εξετάζεται ηπιότερη πτώση τάσης στο σημείο σύνδεσης, αλλά με τον μετατροπέα της πλευράς του δικτύου να ελέγχεται ώστε η γεννήτρια να προσφέρει στο δίκτυο 0.6 MVar κατά το σφάλμα με σκοπό να συμβάλει στην ανάκαμψη του δικτύου. Επιπλέον, συνδέεται στη διάταξη παθητικό σύστημα προστασίας crowbar.

Στην εικόνα 4.21 φαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για το εξεταζόμενο σύστημα ελέγχου και τον έλεγχο που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3.





Εικόνα 4.21 - Αποτελέσματα προσομοίωσης υπό τριφασικό σφάλμα διάρκειας 200 ms. Στην αριστερή στήλη αποτελέσματα απλού σχήματος ελέγχου. Στη δεξιά στήλη τα αποτελέσματα με το εξεταζόμενο σχήμα ελέγχου.

Παρατηρείται ότι με τη συμβατική μέθοδο ελέγχου το σύστημα crowbar ενεργοποιείται αμέσως, ο έλεγχος της μηχανής χάνεται, και η γεννήτρια απορροφά από το δίκτυο 0.4 MVAr. Η γεννήτρια παράγει ξανά άεργο ισχύ μόνο μετά την απενεργοποίηση του συστήματος προστασίας περίπου 100ms μετά την εμφάνιση του σφάλματος. Αντίθετα, με τη χρήση της εξεταζόμενης μεθόδου ελέγχου το μεταβατικό ρεύμα του δρομέα παραμένει κάτω από το κατώφλι ενεργοποίησης του συστήματος crowbar. Η γεννήτρια καταφέρνει να παρέχει στο δίκτυο ενεργό και άεργο ισχύ καθόλη τη διάρκεια του σφάλματος.

Καταλήγουμε ότι το εξεταζόμενο σχήμα ελέγχου περιορίζει αποτελεσματικά τα μεταβατικά φαινόμενα στο κύκλωμα του δρομέα και επιτρέπει τη λειτουργία της μηχανής υπό τους σύγχρονους περιορισμούς των διαχειριστών δικτύων. Ο έλεγχος της μηχανής δύναται να διατηρηθεί καθόλη τη διάρκεια του σφάλματος στο δίκτυο, δίνοντας τη δυνατότητα η γεννήτρια να συμβάλει στην αποκατάσταση του δικτύου, αλλά η δυνατότητα αυτή επηρεάζεται σημαντικά από το μέγεθος του μετατροπέα της πλευράς του δρομέα.

Συμπεράσματα

Τα τελευταία χρόνια, η αυξανόμενη χρήση αιολικών συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχει οδηγήσει στην απαίτηση τα μεγάλα αιολικά πάρκα να λειτουργούν υπό προδιαγραφές που εξασφαλίζουν τη συμβολή της αιολικής παραγωγής στη σταθερότητα και τη διαχείριση του δικτύου μεταφοράς ενέργειας, αντίστοιχα με τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής. Η αυξημένη ανοχή των ανεμογεννητριών στις αναταραχές του δικτύου, που απαιτείται για την τήρηση αυτών των προδιαγραφών, αποτελεί πρόκληση για τις ασύγχρονες γεννήτριες διπλής τροφοδότησης, καθώς στη διάταξη αυτή ο στάτης συνδέεται απευθείας με το δίκτυο.

Αφού αναλύθηκε η λειτουργία και ο έλεγχος μοντέλου ανεμογεννήτριας με ασύγχρονη μηχανή σε διάταξη διπλής τροφοδότησης, εξετάστηκαν, μέσω προσομοιώσεων, τρεις ενεργές μέθοδοι ελέγχου της μηχανής σε περιπτώσεις βύθισης της τάσης λόγω σφαλμάτων του δικτύου. Και με τις τρεις μεθόδους που εξετάστηκαν η μηχανή παρέμεινε επιτυχώς συνδεδεμένη στο δίκτυο κατά τη διάρκεια των σφαλμάτων.

Συγκεκριμένα, στην πρώτη μέθοδο, όπου έγινε χρήση κυκλώματος προστασίας crowbar και επιλέχθηκε απομαγνήτιση του δρομέα κατά τη διάρκεια του σφάλματος, παρατηρήθηκε μείωση των μεταβατικών φαινομένων. Η γεννήτρια κατάφερε να παραμείνει συνδεδεμένη στο δίκτυο, αλλά, για σοβαρές περιπτώσεις σφαλμάτων, η ενεργοποίηση του κυκλώματος προστασίας συνεπάγεται απώλεια ελέγχου της μηχανής και απορρόφηση αέργου από το αποδυναμωμένο δίκτυο.

Η δεύτερη μέθοδος επιδιώκει να αποθηκεύσει την πλεονάζουσα παραγόμενη ισχύ κατά το σφάλμα του δικτύου, σε κινητική ενέργεια του δρομέα, ώστε αυτή να αποδοθεί στο δίκτυο μετά την εκκαθάριση του σφάλματος. Οι προσομοιώσεις έδειξαν τη βιωσιμότητα της μεθόδου και την αποτελεσματική μείωση των μεταβατικών φαινομένων, με τα αποτελέσματα να είναι καλύτερα στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου, όπου υπάρχει μεγαλύτερη δυνατότητα αύξησης της ταχύτητας του δρομέα. Στα αρνητικά της μεθόδου θα πρέπει να καταγραφεί ότι υπάρχει μικρή επίδραση στις μηχανικές πιέσεις που δέχεται η ανεμογεννήτρια και αυτό θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στο μηχανικό σχεδιασμό της. Κατέστη δυνατό στα πλαίσια της μεθόδου, η γεννήτρια να βοηθήσει την αποκατάσταση του δικτύου με παροχή αέργου ισχύος κατά το σφάλμα.

Στην τρίτη μέθοδο επιχειρήθηκε ένας ακριβέστερος σχεδιασμός του ελέγχου της μηχανής βάσει των μεταβατικών φαινομένων που εμφανίζονται κατά το σφάλμα, και οι μεταβατικοί όροι των μεγεθών του στάτη τροφοδοτήθηκαν στο σήμα αναφοράς του ελεγκτή του μετατροπέα από την πλευρά του δρομέα. Διαπιστώθηκε ότι η μέθοδος μπορεί οδηγήσει στην ελαχιστοποίηση ή εξάλειψη των μεταβατικών φαινομένων. Όμως, η επιτυχία της μεθόδου εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος του μετατροπέα της πλευράς

του δρομέα. Στα πλαίσια της μεθόδου επιβεβαιώθηκε η δυνατότητα στήριξης του δικτύου κατά το σφάλμα με την παραγωγή αέργου ισχύος από τη γεννήτρια.

Βιβλιογραφία

- [1] Ιωαννίδου Μαρία-Παρασκευή, «ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΣΗΣ: Α. ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ», Εκδόσεις Ιωαννίδου Μ.-Π., 2013
- [2] Παπαθανασίου Σταύρος, «ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2014
- [3] Τεγόπουλος Ι. Α., «ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ, ΜΟΝΙΜΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ» μέρος β΄, Εκδόσεις Συμμετρία, 1991
- [4] Μανιάς Ν. Στέφανος, Καλετσάνος Αθανάσιος, «ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ», Εκδόσεις Συμμετών, 2003
- [5] Μανιάς Ν. Στέφανος, «ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ», Εκδόσεις Συμμετών, 2012
- [6] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley Jr, Stephen D. Umans, “ELECTRIC MACHINERY” sixth edition, McGraw – Hill, 2003
- [7] Bimal K. Bose, “MODERN POWER ELECTRONICS AND AC DRIVES”, Prentice Hall PTR, 2002
- [8] Chee-Mun Ong, “DYNAMIC SIMULATION OF ELECTRIC MACHINERY”, Prentice Hall PTR, 1998
- [9] Marwa Ezzat, Mohamed Benbouzid, S.M. Muyeen and Lenmart Harnefors, “Low-Voltage Ride-Through Techniques for DFIG-Based Wind Turbines: State-of-the-Art Review and Future Trends”, IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, 2013
- [10] Dawei Xiang, Li Ran, Member, IEEE, Peter J. Tavner, and Shunchang Yang, “Control of a Doubly Fed Induction Generator in a Wind Turbine During Grid Fault Ride-Through”, IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 21, NO. 3, SEPTEMBER 2006
- [11] G. Joós, Fellow, IEEE, “Wind Turbine Generator Low Voltage Ride through Requirements and Solutions”, IEEE 2008
- [12] Dongliang Xie, Zhao Xu, Senior Member, IEEE, Lihui Yang, Jacob Østergaard, Senior Member, IEEE, Yusheng Xue, Member, IEEE, and Kit Po Wong, Fellow, IEEE, “A Comprehensive LVRT Control Strategy for DFIG Wind Turbines With Enhanced Reactive Power Support”, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 28, NO. 3, AUGUST 2013
- [13] Ling Peng, Bruno Francois Yongdong Li, “Improved Crowbar Control Strategy of DFIG Based Wind Turbines for Grid Fault Ride-Through”, IEEE 2009

[14] Lihui Yang, Zhao Xu, Member, IEEE, Jacob Østergaard, Senior Member, IEEE, Zhao Yang Dong, Senior Member, IEEE, and Kit Po Wong, Fellow, IEEE, "Advanced Control Strategy of DFIG Wind Turbines for Power System Fault Ride Through", IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 27, NO. 2, MAY 2012

[15] Jiaqi Liang, Student Member, IEEE, Wei Qiao, Member, IEEE, and Ronald G. Harley, Fellow, IEEE, "Feed-Forward Transient Current Control for Low-Voltage Ride-Through Enhancement of DFIG Wind Turbines", IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 25, NO. 3, SEPTEMBER 2010

[16] "Renewable energy," Wikipedia, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Renewable_energy

[17] S. J. Chapman, "Pulse Width Modulation Inverters," in Electric Machinery Fundamentals

[18] "Wind Turbine Grid Connection and Interaction," Deutsches Windenergie-Institut