



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΕ ΠΛΗΡΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΓΙΑ ΜΕΛΕΤΕΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σωτήριος Ι. Νάνου

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2009



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΕ ΠΛΗΡΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΓΙΑ ΜΕΛΕΤΕΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σωτήριος Ι. Νάνου

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 7^η Ιουλίου 2009

.....

Κ. Βουρνάς

Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Σ. Παπαθανασίου

Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Γ. Κορρές

Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2009

.....
Σωτήριος Ι. Νάνου

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

Copyright © Σωτήριος Ι. Νάνου 2009
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

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός μοντέλου ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα και έλεγχο βήματος των πτερυγίων, κατάλληλο για μελέτες ευστάθειας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Αρχικά αναλύονται τα επιμέρους υποσυστήματα που απαρτίζουν μια ανεμογεννήτρια με πλήρη μετατροπέα και περιγράφονται οι συνηθέστερες τεχνικές ελέγχου τους. Μέσω της ανάλυσης αυτής διερευνώνται ποιοι είναι οι παράγοντες που καθορίζουν την απόκριση της διάταξης στην χρονική κλίμακα που αντιστοιχεί σε μελέτες ευστάθειας. Συμπερασματικά, η διάταξη που καθορίζει την απόκριση της ανεμογεννήτριας στην προαναφερθείσα χρονική κλίμακα είναι ο μετατροπέας πλευράς δικτύου. Ο μετατροπέας αυτός μοντελοποιείται ως μια ελεγχόμενη πηγή ρεύματος με μια μικρή χρονική καθυστέρηση η οποία αναπαριστά την αντίστοιχη καθυστέρηση στους βρόχους ελέγχου του. Η dc τάση του πυκνωτή θεωρείται σταθερή στην εξεταζόμενη χρονική κλίμακα. Συνεπώς η ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας είναι ίση με την εγχεόμενη ενεργό ισχύ στο δίκτυο. Επίσης αναλύεται η στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος, μέσω της οποίας διαμορφώνεται η ενεργός ισχύς αναφοράς. Όσον αφορά την άεργο ισχύ αναφοράς, αυτή μπορεί να διαμορφωθεί είτε με έλεγχο τάσης είτε με λειτουργία συντελεστή ισχύος. Επιπρόσθετα, μοντελοποιείται ο ρυθμιστής της γωνίας βήματος των πτερυγίων, ο οποίος διαμορφώνει τη γωνία βήματος με τέτοιο τρόπο ώστε η ταχύτητα περιστροφής της Α/Γ να διατηρείται κατά το δυνατόν στην μέγιστη τιμή της για υψηλές ταχύτητες ανέμου. Τέλος, αναλύεται η στρατηγική ελέγχου του μετατροπέα πλευράς δικτύου κατά την διάρκεια βυθίσεων της τάσης του δικτύου. Συγκεκριμένα, η στρατηγική αυτή προσδιορίζει την τιμή του αέργου ρεύματος που πρέπει να εγχυθεί στο δίκτυο ανάλογα με τα επίπεδα της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης. Η ρύθμιση αυτή υλοποιήθηκε σύμφωνα με τους σύγχρονους κώδικες που αφορούν την σύνδεση αιολικών πάρκων μεγάλης ισχύος.

Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του μοντέλου που αναπτύχθηκε. Συνολικά παρουσιάζονται δύο διαφορετικές τοπολογίες δικτύου στις οποίες συνδέεται το αιολικό πάρκο (που απαρτίζεται από Α/Γ με πλήρη μετατροπέα). Αξιολογείται η επίδρασή του στην απόκριση του συστήματος ανάλογα με το αν λειτουργεί με έλεγχο της τάσης ή με λειτουργία συντελεστή ισχύος. Επίσης, αξιολογείται η συμβολή του πάρκου στην μεταβατική ευστάθεια του συστήματος, με παραμέτρους την αρχική ενεργό ισχύ εξόδου του πάρκου και την χρησιμοποιούμενη στρατηγική ελέγχου κατά την διάρκεια βυθίσεων της τάσης του δικτύου. Η διερεύνηση αυτή έγινε υπολογίζοντας τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης ανά περίπτωση. Τέλος μελετάται η απόκριση της διάταξης όταν αυτή δέχεται σαν είσοδο χρονοσειρές ταχυτήτων ανέμου.

Λέξεις Κλειδιά

Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών, πλήρης μετατροπέας, ελεγκτής γωνίας βήματος πτερυγίων, MATLAB/SIMULINK, μετασχηματισμός dq, ευστάθεια μικρών διαταραχών, μεταβατική ευστάθεια, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, αδιάλειπτη λειτουργία υπό χαμηλή τάση

Abstract

In this diploma thesis, a generic model of a pitch controlled variable speed wind turbine equipped with a full converter unit has been developed, suitable for power system studies.

At first, the most important subsystems of a full converter wind turbine are analyzed in tandem with their most common control techniques. Through this analysis, the most vital factors which contribute to the response of the specific system at a time scale corresponding to stability studies are determined. So, as seen from the power system, the most relevant response is the behavior of the grid-side converter which has been modeled as a controlled current source with a small time constant which represents lags in the active and reactive power command control loops. The DC capacitor voltage is assumed to be constant for the purposes of power system studies. Thus, the electric power of the generator is equal to the active power injected into the network. Moreover, the maximum power point tracking strategy is analyzed, by which the active power command is determined. The reactive power command can be determined either by voltage control or by power factor control. Furthermore, the pitch controller is modeled, which adjusts the pitch angle in order to maintain the rotational speed of the generator at its maximum limit, during high wind speeds. Finally, the control strategy of the grid-side converter during voltage dips is analyzed. Specifically, this strategy determines the amount of the converter reactive current that must be injected into the network and is given as a function of voltage at the point of common coupling. This adjustment has been made according to the most common grid codes concerning large wind farms.

In the last part of this thesis, simulation results of the specific model are presented. Generally, two different network topologies are investigated, to which the wind farm (with full converter wind turbines) is connected. Comparison between voltage control at the point of common coupling and unity power factor operation during various disturbances is made, in order to assess which is the most beneficial. Next, the contribution of the wind farm to the network transient stability is examined, depending on its initial active power production and on its control strategy during voltage dips. This evaluation has been made calculating the critical fault clearance time for each case. Finally, the wind farm response to various wind speed time series is investigated.

Keywords

Variable speed wind turbine, full converter, pitch control, MATLAB/SIMULINK, dq transformation, small signal stability, transient stability, critical fault clearance time, low voltage ride through

Ευχαριστίες

Θα ήθελα κατ' αρχάς να ευχαριστήσω εκ βαθέων τον καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Κωνσταντίνο Βουρνά για την άψογη συνεργασία που είχαμε κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου καθώς και για την δυνατότητα που μου προσέφερε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον αντικείμενο. Η συνεχής επιστημονική του καθοδήγηση και τα κατάλληλα εναύσματα που μου έδωσε αποτέλεσαν καθοριστικούς παράγοντες για την άρτια εκπόνηση της εργασίας αυτής.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Γιώργο Τσουράκη για τις εύστοχες υποδείξεις του και την χρήσιμη συνεργασία που είχαμε κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Πίνακας περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	14
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	14
1.1.1 Αξιολόγηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας	14
1.1.2 Αιολική Ενέργεια	16
1.2 Τεχνολογίες ανεμογεννητριών	17
1.3 Ανεμογεννήτρια με πλήρη μετατροπέα (full converter unit)	21
1.4 Αδιάλειπτη παροχή ισχύος σε συνθήκες χαμηλής τάσης (Low Voltage Ride Through)	23
1.4.1 Τεχνολογία LVRT για Α/Γ με πλήρη μετατροπέα	26
1.5 Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας	27
1.5.1 Ορισμός ευστάθειας ΣΗΕ	27
1.4.2 Κατηγοριοποίηση φαινομένων ευστάθειας ΣΗΕ	28
1.4.3 Ευστάθεια γωνίας	29
1.4.5 Ευστάθεια συχνότητας	30
1.5 Επισκόπηση βιβλιογραφίας	31
1.6 Αντικείμενο και δομή της διπλωματικής	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	34
ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΕ ΠΛΗΡΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ	34
2.1 Περιγραφή συστήματος Α/Γ	34
2.2 Προσομοίωση του ανέμου	35
2.3 Αεροδυναμικό μέρος	36
2.4 Ρυθμιστής Γωνίας Βήματος Πτερυγίων (Pitch Controller)	38
2.5 Σύστημα μετάδοσης της κίνησης	40
2.6 Αναπαράσταση μεγεθών μέσω χρονομεταβλητών φασιθετών (phasors)	41
2.6.1 Φασιθέτες	41
2.6.2 Μετασχηματισμός abc-dq0	43
2.8 DC/DC μετατροπέας ανύψωσης (boost converter)	47
2.9 DC/AC μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου	49
2.9.1 Γενικά περί τεχνικών ελέγχου μετατροπέων	49
2.9.2 Ισχύς Τριφασικού DC/AC Μετατροπέα	53
2.9.3 Παράγοντες που καθορίζουν την επιλογή της τιμής της dc τάσης ενός τριφασικού DC/AC μετατροπέα	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	56
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΦΑΣΕΩΣ ΚΑΙ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	56

3.1	Λειτουργία μετατροπέα στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς	56
3.2	Ρεύμα εξόδου μετατροπέα με έλεγχο υστέρησης ρεύματος (hysteresis current control).....	57
3.2.1	Περιγραφή τεχνικής ελέγχου	57
3.2.2	Επίδραση σφάλματος μέτρησης φάσης στην περίπτωση λειτουργίας στο στρεφόμενο πλαίσιο dq.....	61
3.3	Ρεύμα εξόδου μετατροπέα με έλεγχο ρεύματος με την τεχνική σύγκρισης ράμπας (PI current control with ramp comparison).....	63
3.3.1	Περιγραφή τεχνικής ελέγχου	63
3.3.2	Επίδραση σφάλματος μέτρησης φάσης	65
3.3	Άλλες τεχνικές ελέγχου του DC/AC μετατροπέα	67
3.4	Διερεύνηση δυνατότητας ανεξάρτητου ελέγχου ενεργού και αέργου συνιστώσας του ρεύματος εξόδου συναρτήσει των συνθηκών του δικτύου	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4		73
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΕ ΠΛΗΡΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ		73
4.1	Παραδοχές.....	73
4.2	Παράσταση αεροδυναμικού και μηχανικού μέρους.....	74
4.3	Παράσταση ρυθμιστή γωνίας βήματος πτερυγίων	77
4.4	Παράσταση ρυθμιστή στροφών της A/Γ	78
4.5	Παράσταση DC/AC μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου (grid side converter).....	80
4.6	Μοντελοποίηση στρατηγικής αδιάλειπτης λειτουργίας (LVRT)	84
4.6.1	Χρήση περιοριστών ρεύματος	84
4.6.2	Εύρεση μέγιστου ρεύματος DC/AC μετατροπέα και κρίσιμης τάσης V_{tmin} για μεταγωγή ελέγχου	88
4.6.3	Στρατηγική ελέγχου του DC/DC μετατροπέα και του DC/AC μετατροπέα κατά την διάρκεια βυθίσεων τάσης του δικτύου	88
4.7	Αναγωγή μεγεθών στην αναφορά του δικτύου.....	89
4.8	Ανάπτυξη μοντέλου στο περιβάλλον simulink.....	91
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5		95
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ		95
5.1	Αιολικό πάρκο συνδεδεμένο σε άπειρο δίκτυο	95
5.1.1	Περιγραφή τοπολογίας.....	95
5.1.2	Απόκριση μοντέλου σε τριφασικό βραχυκύκλωμα	97
5.1.3	Απόκριση μοντέλου σε μεταβολές της ταχύτητας ανέμου	103
5.2	Αιολικό πάρκο συνδεδεμένο σε μικρό διασυνδεδεμένο σύστημα.....	107
5.2.1	Περιγραφή τοπολογίας.....	107
5.2.2	Απόκριση δικτύου σε τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ΣΚΣ.....	109
5.2.3	Απόκριση μοντέλου σε τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 3	115

5.2.4 Απόκριση μοντέλου σε βύθιση τάσης του άπειρου ζυγού.....	128
5.2.5 Απόκριση μοντέλου σε μεταβολές της ταχύτητας ανέμου	134
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	141
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	141
6.1 Συμπεράσματα	141
6.2 Προοπτικές.....	142
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	144

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

1.1.1 Αξιολόγηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

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

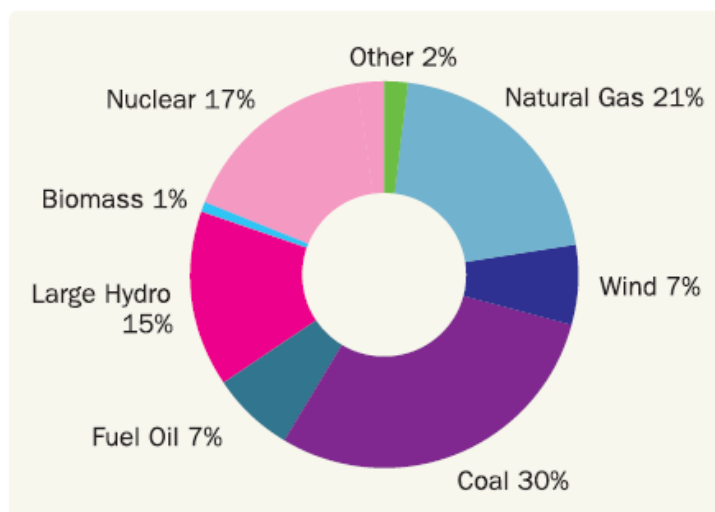
Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Α.Π.Ε.) είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, η γεωθερμία, η κίνηση του νερού και άλλες. Το βασικότερο πλεονέκτημα των ΑΠΕ είναι ότι η μορφή τους είναι ήδη αξιοποιήσιμη για την παραγωγή ενέργειας. Δηλαδή δεν χρειάζονται κάποιου είδους επεξεργασία ή μετατροπή σε άλλης μορφής ενέργειας έτσι ώστε να μπορούν να είναι εκμεταλλεύσιμες, όπως ισχύει πχ με την καύση ορυκτών καυσίμων για την μετατροπή τους σε θερμική ενέργεια. Αυτό σημαίνει πως οι ΑΠΕ είναι ανεξάντλητες και πολύ φιλικές προς το περιβάλλον, μιας και δεν απελευθερώνονται ρυπογόνες ουσίες στην ατμόσφαιρα, όπως συμβαίνει με τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής.

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

- Αιολική ενέργεια
- Ηλιακή ενέργεια
- Υδροηλεκτρική ενέργεια
- Βιομάζα
- Γεωθερμική ενέργεια
- Ενέργεια από παλίρροιας
- Ενέργεια από θαλάσσια κύματα

Στο Σχ. 1.1 φαίνεται η συνεισφορά όλων των ενεργειακών μορφών στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στις χώρες της Ε.Ε. μέχρι τα τέλη του 2007.

EU Energy mix end 2007 (Total 775 GW)



Σχήμα 1.1 : Συνεισφορά όλων των πηγών ενέργειας μέχρι τα τέλη του 2007 [1]

Οι Α.Π.Ε. χρησιμοποιούνται είτε άμεσα (κυρίως για θέρμανση), είτε μετατρέπομενες σε άλλες μορφές ενέργειας (κυρίως ηλεκτρισμό ή μηχανική ενέργεια). Υπολογίζεται ότι το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο ενεργειακό δυναμικό απ' τις Α.Π.Ε. είναι πολλαπλάσιο της παγκόσμιας συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Η υψηλή, όμως, μέχρι πρόσφατα τιμή των νέων ενεργειακών εφαρμογών, τα τεχνικά προβλήματα εφαρμογής, καθώς και οι πολιτικές και οικονομικές σκοπιμότητες που συνδέονται με τη διατήρηση του παρόντος επιπέδου ανάπτυξης στον ενεργειακό τομέα, εμπόδισαν την εκμετάλλευση έστω και μέρους αυτού του δυναμικού. Ειδικά στην Ελλάδα, που έχει μορφολογία και κλίμα κατάλληλο για νέες ενεργειακές εφαρμογές, η εκμετάλλευση αυτού του ενεργειακού δυναμικού θα συντελούσε σημαντικά στην ενεργειακή αυτονομία της χώρας.

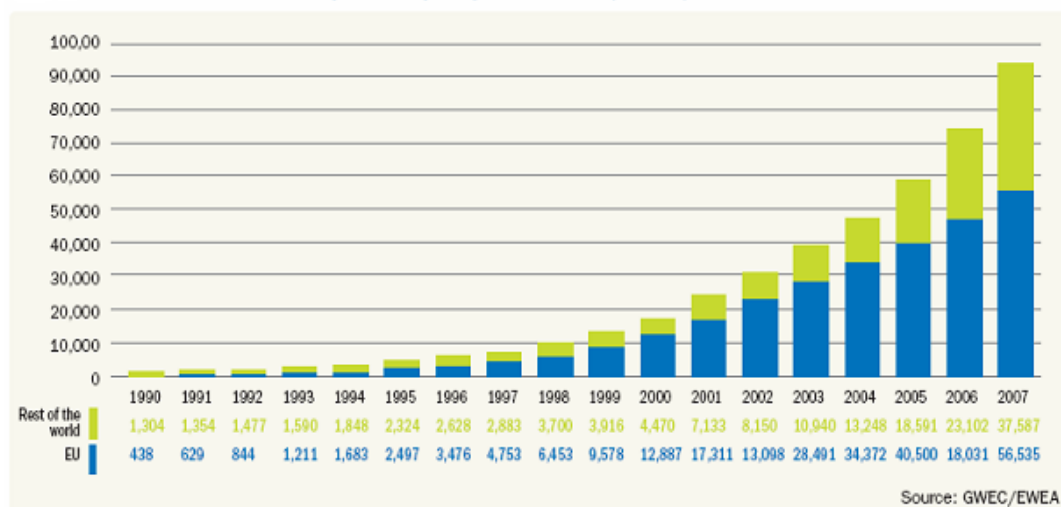
Παρόλα αυτά, οι Α.Π.Ε. παρουσιάζουν έναν αρκετά μικρό συντελεστή απόδοσης, της τάξης του 30% ή και χαμηλότερο. Αυτό ουσιαστικά σημαίνει ότι απαιτείται ένα μεγάλο σύνολο εγκαταστάσεων και, άρα, ένα αρκετά μεγάλο αρχικό κόστος εφαρμογής σε μεγάλη επιφάνεια γης. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος, μέχρι τώρα, χρησιμοποιούνται σαν συμπληρωματικές πηγές ενέργειας και όχι για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των μεγάλων αστικών κέντρων. Επίσης, ορισμένες μορφές Α.Π.Ε. εμφανίζουν έντονη μεταβλητότητα, γεγονός που δεν επιτρέπει την διείσδυσή τους σε πολύ μεγάλα ποσοστά. Για παράδειγμα, η ηλεκτρική ενέργεια που προέρχεται από την αιολική παραγωγή, παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές λόγω της τυχαίας μεταβολής της ταχύτητας ανέμου. Έτσι οι μονάδες αυτές δεν μπορούν να κάνουν ρύθμιση της παραγόμενης ισχύος τους, όπως συμβαίνει με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής.

1.1.2 Αιολική Ενέργεια

Από όλες τις Α.Π.Ε., η αιολική ενέργεια είναι σήμερα η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη, καθώς παρατηρείται μια συνεχής βελτίωση της τεχνολογίας των ανεμογεννητριών, και επιπλέον, παράγεται ηλεκτρική ενέργεια σε τιμές συγκρίσιμες με αυτές των συμβατικών μονάδων και σε μεγάλες σχετικά ισχύεις. Για το λόγο αυτό, η προώθηση από πολλές κυβερνήσεις των Α.Π.Ε., οδήγησε σε μεγάλη αύξηση την παραγωγή από αιολική ενέργεια στην Ευρώπη και τον υπόλοιπο κόσμο, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.2.

Αξίζει να σημειωθεί πως η εξέλιξη της τεχνολογίας στον τομέα της αιολικής ισχύος είναι τέτοια, όπου μια ανεμογεννήτρια σημερινής τεχνολογίας είναι σε θέση να παράγει ετησίως 180 φορές περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια με κόστος ανά KWh λιγότερο από το μισό σε σχέση με μια ανεμογεννήτρια τεχνολογίας της δεκαετίας του 1980 [3].

Global cumulative wind power capacity 1990-2007 (in MW)



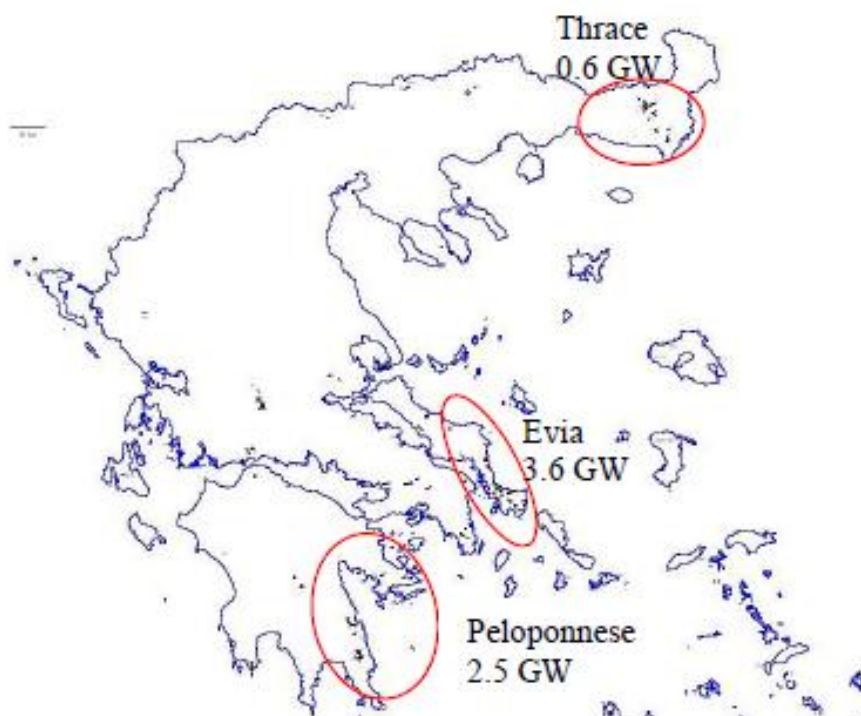
Σχήμα 1.2 : Παγκόσμια ετήσια εγκατεστημένη αιολική ισχύς τη δεκαετία 1991-2007 [2]

Όπως φαίνεται και στο Σχ. 1.2, την τελευταία δεκαετία η παγκόσμια εγκατεστημένη αιολική ισχύς έχει αυξηθεί ραγδαία. Στις Η.Π.Α. υπολογίζεται ότι μέχρι το 2005 είχαν εγκατασταθεί 6.8GW αιολικής ισχύος. Στην Αυστραλία η αιολική παραγωγή σχεδόν διπλασιάστηκε από τα 198MW το 2003 στα 380MW στο τέλος του 2004. Τέλος στην Ευρώπη στα τέλη του 2003 η αιολική διείσδυση έφτανε τα 28.7MW, με τις Γερμανία, Ισπανία και Δανία να ξεχωρίζουν μεταξύ των άλλων χωρών όσον αφορά στην ισχύ των αιολικών πάρκων που διαθέτουν.

Στην Ελλάδα η κατάσταση σχετικά με την αιολική ενέργεια δεν είναι αρκετά ικανοποιητική. Παρά το υψηλό αιολικό δυναμικό που έχει η χώρα μας, μόνο το 1.7% της συνολικής ζήτησης καλύφθηκε το 2003 από αιολική παραγωγή. Μετά την υπογραφή του πρωτοκόλλου του Κιότο το Δεκέμβριο του 1997, η Ελλάδα, ως μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ακολουθεί πλέον την ευρωπαϊκή πολιτική όσον αφορά την εκπομπή αερίων που είναι υπεύθυνα για το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Κύριος στόχος είναι η επίτευξη ποσοστού 20% διείσδυσης Α.Π.Ε. στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Για το λόγο αυτό δίνεται πληθώρα κινήτρων στους ανεξάρτητους παραγωγούς, μεταξύ των οποίων επενδυτικές επιχορηγήσεις, εγγυημένη σύνδεση στο δίκτυο, μακροπρόθεσμα συμβόλαια, κτλ. Επιπρόσθετα, η απελευθέρωση των ενεργειακών αγορών με την κατάργηση του καθετοποιημένου

συστήματος παραγωγής-μεταφοράς-διανομής παρέχει τη δυνατότητα στους υποψήφιους ανεξάρτητους παραγωγούς να επενδύσουν σε περιοχές της επιλογής τους ανάλογα με τα συμφέροντά τους. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την κατάθεση στην Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (Ρ.Α.Ε.), η οποία ιδρύθηκε για να παρακολουθεί και να ελέγχει τη λειτουργία ολόκληρης της αγοράς ενέργειας, αιτήσεων για εγκατάσταση αιολικών πάρκων, ισχύος πάνω από 13000 MW. Οι περισσότερες αιτήσεις από αυτές αφορούν περιοχές της Ελλάδας με μεγάλο αιολικό δυναμικό, όπως η Εύβοια, η νοτιοανατολική Πελοπόννησος και η Θράκη, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.3.

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



Σχήμα 1.3 : Γεωγραφική διανομή αιολικών πάρκων προς εγκατάσταση[5]

1.2 Τεχνολογίες ανεμογεννητριών

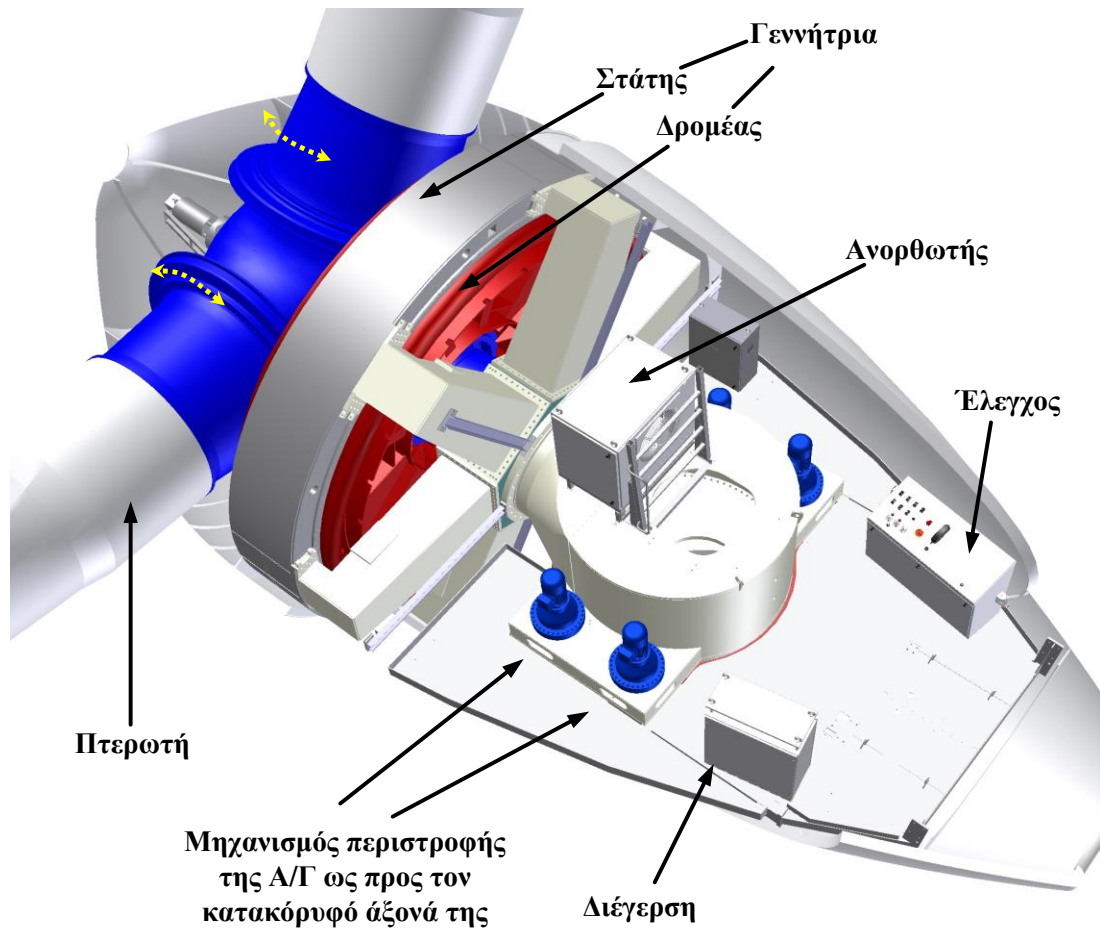
Η λειτουργία της ανεμογεννήτριας (Α/Γ) βασίζεται σε δύο συστήματα μετατροπής ενέργειας :

- Το μηχανικό σύστημα, το οποίο μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική ροπή στον δρομέα.
- Το ηλεκτρικό σύστημα, στο οποίο η γεννήτρια μετατρέπει την μηχανική ροπή του δρομέα σε ηλεκτρική ενέργεια.

Παρά το γεγονός ότι η παραπάνω περιγραφή για την αρχή λειτουργίας της ανεμογεννήτριας φαίνεται αρκετά απλή, στην πραγματικότητα η Α/Γ παραμένει ένα αρκετά σύνθετο σύστημα στο οποίο συνδυάζονται γνώσεις από πολλούς επιμέρους τομείς. Ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση των πτερυγίων απαιτεί σύνθετες γνώσεις αεροδυναμικής: η δομή του άξονα οδήγησης καθώς και του πύργου της Α/Γ απαιτεί γνώσεις μηχανολογικές και δομικές, ενώ το τμήμα των ελεγκτών και το σύστημα προστασίας απαιτούν γνώσεις ηλεκτρολογικές και συστημάτων αυτομάτου ελέγχου.

Όσον αφορά το μηχανικό σύστημα, για την μετάδοση της κίνησης χρησιμοποιείται ένα κιβώτιο ταχυτήτων, το οποίο μετατρέπει τις χαμηλές στροφές της πτερωτής, σε υψηλές στροφές στον δρομέα της γεννήτριας.

Στο Σχ. 1.4 φαίνονται με λεπτομέρεια τα στοιχεία μιας τυπικής Α/Γ της κατασκευάστριας εταιρίας Enercon.



Σχήμα 1.4 : Δομικά στοιχεία Α/Γ κατασκευάστριας εταιρίας Enercon [7].

Οι ανεμογεννήτριες σήμερα χωρίζονται κυρίως σε σταθερών και μεταβλητών στροφών αναφορικά με την χρήση ή όχι ηλεκτρονικών ισχύος. Τρεις είναι οι τύποι ανεμογεννητριών που έχουν επικρατήσει σήμερα (βλέπε Σχ. 1.5).

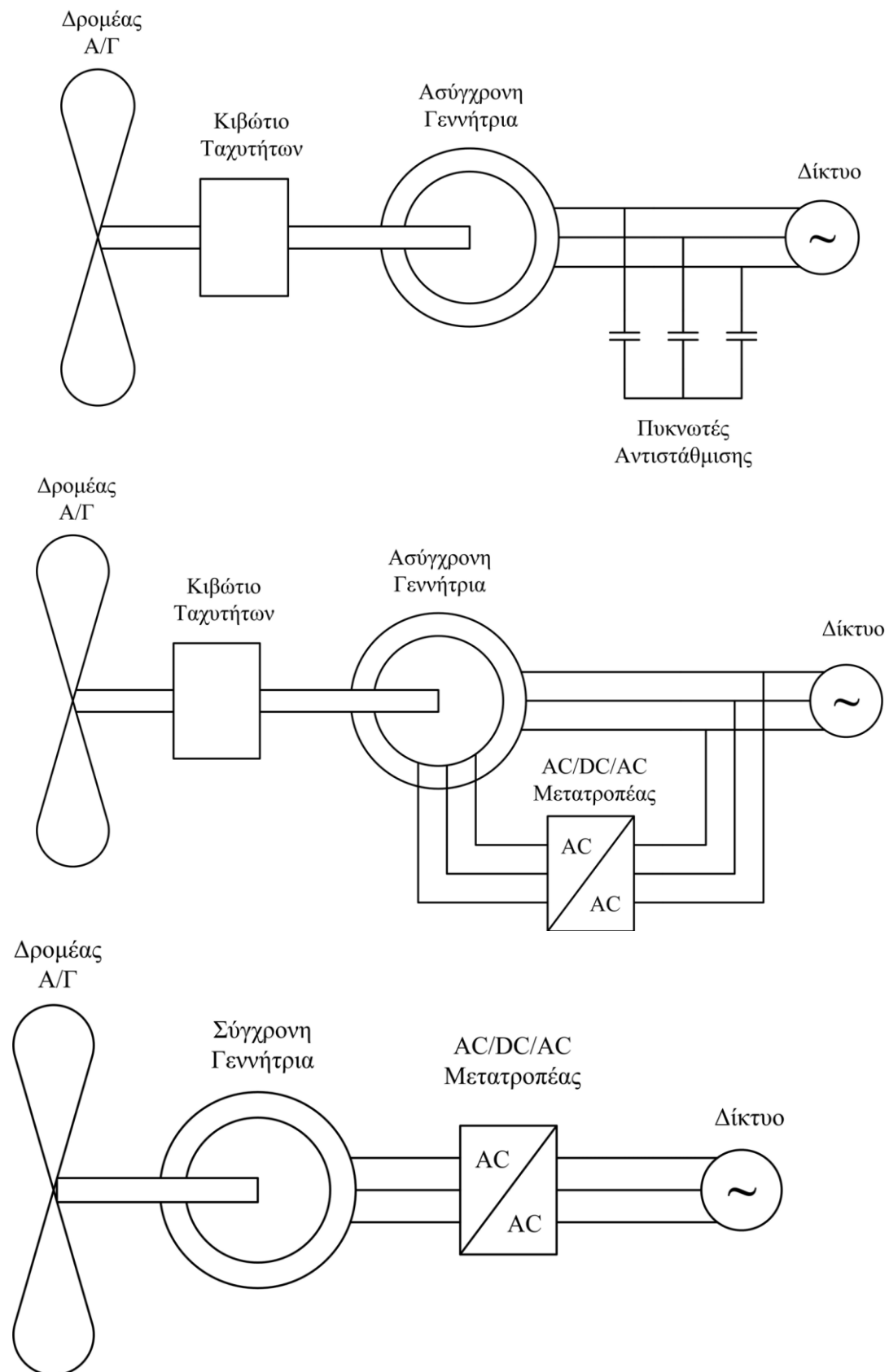
- Σταθερών στροφών, με ασύγχρονη γεννήτρια κλωβού, απ' ευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο.

- Μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης (τυλιγμένου δρομέα), με σύστημα μετατροπών ισχύος AC/DC/AC μερικής ισχύος συνδεδεμένο στον δρομέα.
- Μεταβλητών στροφών με σύγχρονη πολυπολική γεννήτρια, είτε μονίμων μαγνητών, είτε με σύστημα διέγερσης. Σε αυτή την κατηγορία το κιβώτιο ταχυτήτων μπορεί να παραληφθεί.

Καθένας από τους τρεις τύπους Α/Γ έχει τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά του. Συγκεκριμένα η Α/Γ σταθερών στροφών έχει το πλεονέκτημα ότι είναι σχετικά πιο απλή και πιο φθηνή. Πρέπει όμως να είναι και μηχανικά πιο στιβαρή, εξαιτίας των μεγαλύτερων μηχανικών καταπονήσεων, καθώς η ταχύτητα του δρομέα δεν μπορεί να αλλάξει με αποτέλεσμα οι διαταραχές του ανέμου να μεταφράζονται απ' ευθείας σε διαταραχές της ροπής. Επίσης έχουμε μεγαλύτερες διαταραχές στην ισχύ εξόδου, το οποίο για ένα ασθενές δίκτυο συνεπάγεται διαταραχές στην τάση (flicker). Το πλεονέκτημα των Α/Γ μεταβλητών στροφών είναι ότι παράγουν περισσότερη ενέργεια για δεδομένες ταχύτητες ανέμου και η παραγόμενη ενεργός και άεργος ισχύς μπορεί εύκολα να ελεγχθεί. Επίσης έχουμε μικρότερες μηχανικές καταπονήσεις και εξομάλυνση των διαταραχών της ισχύος εξόδου, ενώ γενικά δεν έχουμε προβλήματα flicker. Ακόμα μπορούν να συμβάλλουν στη ρύθμιση της τάσης του δικτύου καθώς έχουν την δυνατότητα ελέγχου της παραγόμενης αέργου ισχύος. Το μειονέκτημα των Α/Γ μεταβλητών στροφών είναι ότι απαιτούν ηλεκτρονικά ισχύος τα οποία είναι σχετικά ακριβά αλλά και ευαίσθητα σε τυχόν σφάλματα.

Συγκρίνοντας τώρα τους δυο τύπους Α/Γ μεταβλητών στροφών, η ασύγχρονη διπλής τροφοδότησης έχει το πλεονέκτημα ότι αποτελείται από μια συνηθισμένη γεννήτρια και ένα μικρό και σχετικά φθινό μετατροπέα. Από την άλλη η Α/Γ μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια (Σχ. 1.5) έχει το πλεονέκτημα να μην χρειάζεται το κιβώτιο ταχυτήτων, επιτυγχάνοντας έτσι μείωση του κόστους και του βάρους, βελτίωση της αξιοπιστίας και ελάττωση του θορύβου. Ακόμα έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να διεγείρεται από μόνη της είτε με ηλεκτρική διέγερση είτε με μόνιμους μαγνήτες, με αποτέλεσμα στην πλευρά της γεννήτριας να απαιτείται ένας απλός ανορθωτής διόδων. Έχει όμως και το μειονέκτημα ότι απαιτεί μια μεγάλη, βάρια και πολύπλοκη γεννήτρια και ένα μεγάλο μετατροπέα από τον οποίο θα περάσει το 100% της παραγόμενης ισχύος σε αντίθεση με την ασύγχρονη διπλής τροφοδότησης, όπου μόνο το 1/3 περίπου της παραγόμενης ισχύος περνάει από το μετατροπέα, [4]. Βεβαίως όμως αυτό σημαίνει πως ο μετατροπέας στην Α/Γ με σύγχρονη γεννήτρια έχει μεγαλύτερη δυνατότητα παραγωγής αέργου ισχύος, σε σχέση με τον μετατροπέα στην Α/Γ με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης, πράγμα που γίνεται ολοένα σημαντικότερο από τις τεχνικές απαιτήσεις κωδίκων για την σύνδεση αιολικών πάρκων μεγάλης ισχύος.

Επίσης ένα άλλο κριτήριο διαχωρισμού των Α/Γ είναι ο τύπος των πτερυγίων και ο τρόπος ελέγχου της γωνίας τους. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι πτερυγίων για τον έλεγχο και περιορισμό της αεροδυναμικής ισχύος (και ροπής) :



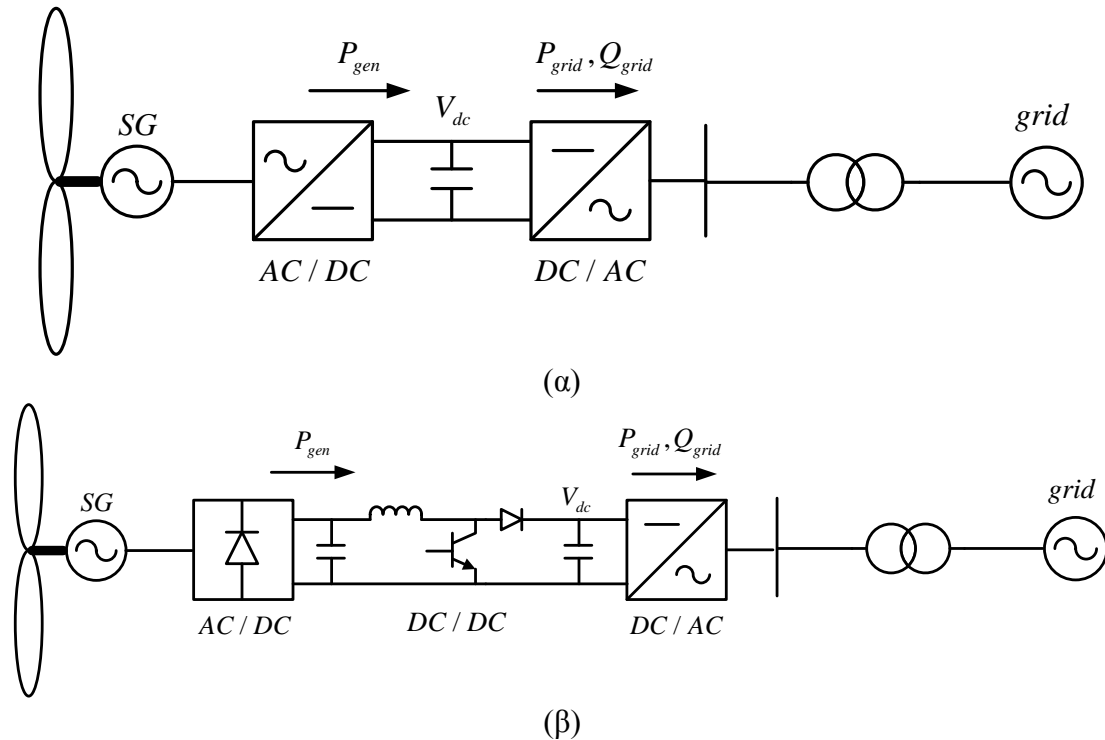
Σχήμα 1.5 : Τυπικές διαμορφώσεις ηλεκτρικού μέρους Α/Γ

- Οι Α/Γ με αεροδυναμικό έλεγχο της ροπής και ισχύος του δρομέα (stall controlled), διαθέτουν πτερύγια σταθερής κλίσης, τα οποία σε υψηλές ταχύτητες ανέμου εμφανίζουν απώλεια αεροδυναμικής στήριξης. Με αυτό τον τρόπο περιορίζεται η αναπτυσσόμενη ροπή και η παραγόμενη ενέργεια, χωρίς να απαιτείται σύστημα ελέγχου.
- Πτερύγια με έλεγχο της γωνίας βήματός τους, που μπορούν να περιστραφούν κατά τον διαμήκη άξονά τους (pitch controlled). Με αυτόν τον τρόπο όταν η ταχύτητα ανέμου ξεπεράσει την ονομαστική της τιμή η γωνία των πτερυγίων μεταβάλλεται αντίθετα, μεγαλώνει δηλαδή η γωνία με τον άνεμο περιορίζοντας με αυτόν τον τρόπο την εισερχόμενη αεροδυναμική ισχύ. Το σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι η ισχύς εξόδου της γεννήτριας μπορεί να ελεγχθεί ταχύτερα με αποτέλεσμα το σύστημα να μην καταπονείται σε περιόδους ριπών ανέμου. Ο έλεγχος της γωνίας των πτερυγίων εφαρμόζεται σε Α/Γ μεγάλης ισχύος, άνω του 1MW.

1.3 Ανεμογεννήτρια με πλήρη μετατροπέα (full converter unit)

Όπως ειπώθηκε προηγουμένως, στην διάταξη αυτή χρησιμοποιείται κυρίως σύγχρονη γεννήτρια. Η σύγχρονη γεννήτρια που μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίζεται σε δύο κατηγορίες :

- με τύλιγμα πεδίου : Το τύλιγμα πεδίου βρίσκεται στο δρομέα και τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα από το σύστημα διέγερσης. Ο δρομέας προκαλεί στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο με ταχύτητα περιστροφής τη σύγχρονη. Το στρεφόμενο πεδίο του δρομέα επάγει τριφασική εναλλασσόμενη τάση στο τριφασικό τύλιγμα του στάτη. Ουσιαστικά, το τύλιγμα του δρομέα παρέχει τη διέγερση της γεννήτριας. Το πλεονέκτημα αυτής της κατηγορίας είναι ότι η τάση στα άκρα της γεννήτριας μπορεί να ελέγχεται από το σύστημα διέγερσης. Συνεπώς μπορεί στην πλευρά της γεννήτριας να χρησιμοποιηθεί ένας απλός ανορθωτής διόδων.
- με μόνιμους μαγνήτες : Πρόκειται για αυτοδιεγερόμενη γεννήτρια. Την κατάλληλη διέγερση την παρέχουν μόνιμοι μαγνήτες στον δρομέα. Συνήθως αυτές οι γεννήτριες είναι έκτυπων πόλων. Το τύλιγμα του στάτη είναι και σε αυτήν την κατηγορία τριφασικό. Το μειονέκτημα αυτής της κατηγορίας σύγχρονων γεννητριών είναι ότι δεν υπάρχει έλεγχος της διέγερσης, με αποτέλεσμα την αδυναμία διατήρησης σταθερής τάσης. Από την άλλη όμως δεν υπάρχουν απώλειες, λόγω του ότι το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο δημιουργείται από τους μαγνήτες και όχι από κάποιο κύκλωμα που απαιτεί εξωτερική τροφοδοσία για την παραγωγή του απαιτούμενου πεδίου. Επίσης, με αυτού του είδους την γεννήτρια παρουσιάζονται προβλήματα κατά τον συγχρονισμό με το δίκτυο. Η συμπεριφορά σε περίπτωση σφάλματος είναι πιο δύσκαμπτη. Στην περίπτωση μόνιμων μαγνητών, ο μετατροπέας στην έξοδο της γεννήτριας πρέπει να είναι τύπου πηγής τάσης με ελεγχόμενα στοιχεία (IGBTs). Η παρεμβολή του μετατροπέα αυτού αντισταθμίζει τα προηγούμενα μειονεκτήματα.



Σχήμα 1.6 : (α) Περίπτωση ανεμογεννήτριας με σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών [15], (β) Περίπτωση ανεμογεννήτριας με σύγχρονη γεννήτρια τυλίγματος διέγερσης [24].

Στην περίπτωση σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών (Σχ. 1.6.α) ο DC/AC μετατροπέας που βρίσκεται στην πλευρά της συνήθως είναι αυτός που ρυθμίζει την ηλεκτρική ισχύ που παράγει η γεννήτρια. Ο DC/AC μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου (grid side converter) είναι αυτός που ρυθμίζει την dc τάση του πυκνωτή μεταξύ των δύο μετατροπέων. Τα παραπάνω βέβαια μπορούν να γίνουν και αντίστροφα, δηλαδή ο grid side converter να ρυθμίζει την έγχυση ενεργού ισχύος στο δίκτυο ανεξαρτήτως dc τάσης και ο μετατροπέας πλευράς δικτύου να ακολουθεί διατηρώντας την dc τάση σταθερή. Επίσης ο μετατροπέας πλευράς δικτύου έχει την δυνατότητα να ρυθμίζει ανεξάρτητα την επιθυμητή έγχυση αέργου ισχύος στο δίκτυο.

Στην περίπτωση σύγχρονης γεννήτριας με τύλιγμα διέγερσης (Σχ. 1.6.β), στην πλευρά της μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας ανορθωτής διόδων σε συνδυασμό με έναν DC/DC μετατροπέα ανύψωσης. Ο μετατροπέας αυτός, μπορεί να ρυθμίσει το dc ρεύμα στην έξοδο του ανορθωτή, και άρα το ρεύμα της γεννήτριας, σε μια επιθυμητή τιμή. Και εδώ στην πλευρά του δικτύου χρησιμοποιείται ένας DC/AC μετατροπέας. Οι στρατηγικές ελέγχου που χρησιμοποιούνται είναι παρόμοιες με αυτές που αναπτύχθηκαν στην προηγούμενη περίπτωση.

Από τα παραπάνω εύκολα μπορούμε να συμπεράνουμε πως στην ουσία ο μετατροπέας πλευράς δικτύου είναι αυτός που εγχέει ενεργό και άεργο ισχύ στο δίκτυο και είναι αυτός που πρέπει να ρυθμίζει την συχνότητα της τάσης του στην συχνότητα του δικτύου. Η dc σύνδεση που παρεμβάλλεται μεταξύ γεννήτριας και δικτύου, προσφέρει στην γεννήτρια την δυνατότητα να λειτουργεί σε συχνότητα ανεξάρτητη από αυτή του δικτύου. Έτσι η A/Γ είναι σε θέση να λειτουργεί σε ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων περιστροφής, πράγμα που σημαίνει ότι η ταχύτητα περιστροφής της μπορεί πλέον να ελέγχεται σε τέτοιες τιμές που θα οδηγούν σε μεγιστοποίηση της εισερχόμενης αεροδυναμικής ισχύος. Επίσης η πλήρης απόζευξη μεταξύ γεννήτριας και δικτύου, καθιστά πιο εύκολο τον έλεγχο κατά την διάρκεια

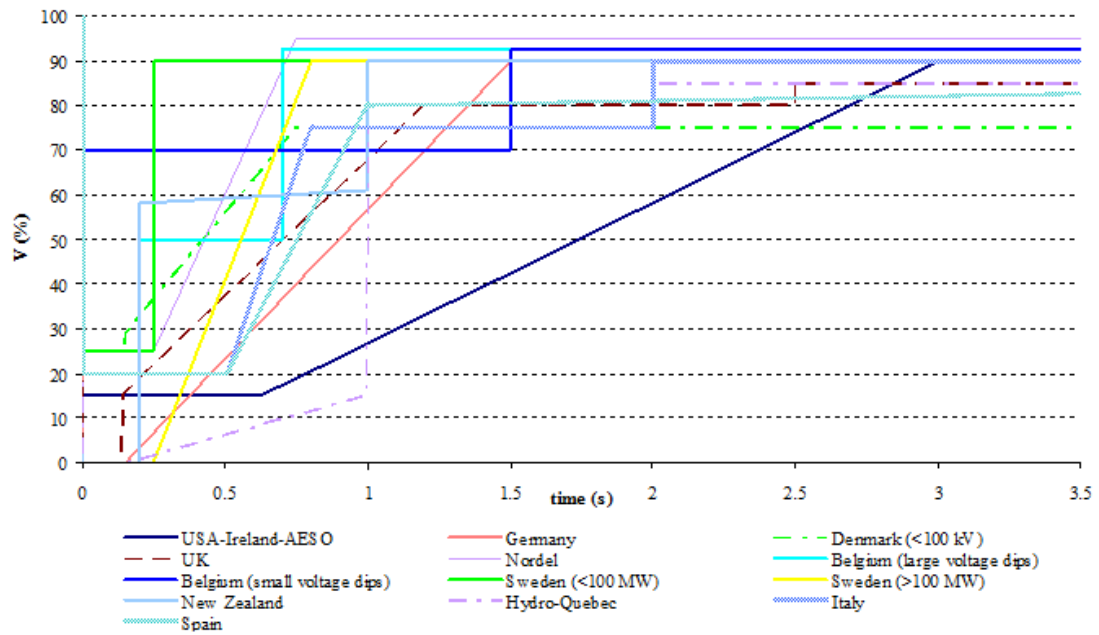
βυθίσεων της τάσης του δικτύου, καθώς τα μεταβατικά της γεννήτριας είναι σημαντικά μειωμένα.

1.4 Αδιάλειπτη παροχή ισχύος σε συνθήκες χαμηλής τάσης (Low Voltage Ride Through)

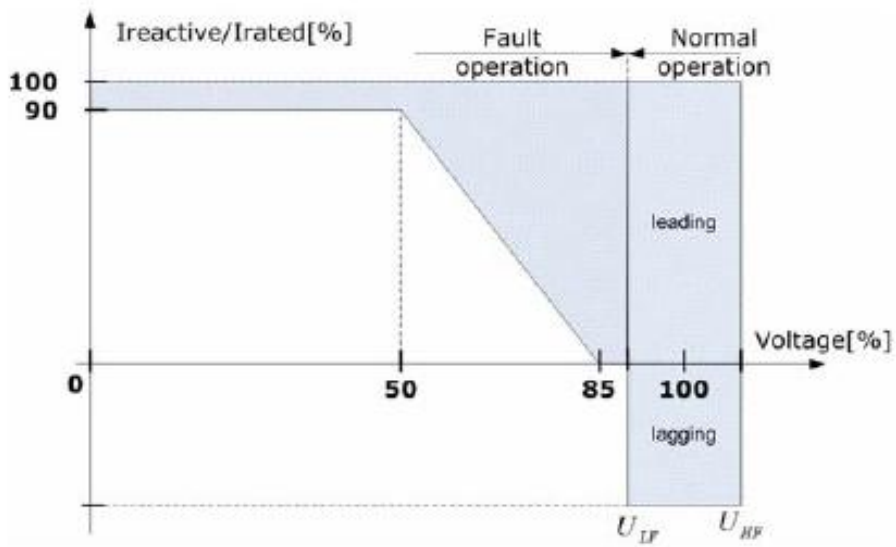
Παλαιότερα όταν η διείσδυση αιολικής παραγωγής ήταν μικρή, οι ανεμογεννήτριες αποσυνδέονταν από το δίκτυο όταν η τερματική τάση έπεφτε κάτω από το 80-90% της ονομαστικής της τιμής, για λόγους προστασίας των συστημάτων που χρησιμοποιούνται στις διατάξεις αυτές (κυρίως των ηλεκτρονικών ισχύος). Αυτό δεν αποτελούσε πρόβλημα για την ευστάθεια του συστήματος όταν η παραγόμενη ισχύς από Α/Γ ήταν σχετικά μικρή. Ωστόσο με την αύξηση της διείσδυσης της αιολικής παραγωγής, η ενεργός ισχύς που εγχέεται στο δίκτυο έχει υψηλές τιμές με αποτέλεσμα, αποσύνδεση του αιολικού πάρκου μετά από μια διαταραχή μπορεί να προκαλέσει ένα σημαντικό έλλειμμα μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης ενεργού ισχύος. Αυτό το έλλειμμα μπορεί να μην είναι σε θέση να αναπληρωθεί εγκαίρως από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής με αποτέλεσμα οι γεννήτριες να επιβραδύνονται με τέτοιο ρυθμό ώστε η συχνότητα του συστήματος να μειωθεί σε επικίνδυνα χαμηλές τιμές για την ευστάθεια του συστήματος.

Πέραν των λόγων προστασίας που αναφέρθηκαν προηγουμένως, ένας άλλος σημαντικός λόγος για τον οποίο οι Α/Γ άμεσα αποσυνδέονταν στην περίπτωση σφάλματος ήταν η αποφυγή του φαινομένου της νησιδοποίησης. Η νησιδοποίηση αναφέρεται στην κατάσταση κατά την οποία ένα σχετικά μικρό δίκτυο αρχίζει να λειτουργεί ανεξάρτητα από το ηλεκτρικό σύστημα μετά από την αποσύνδεσή του λόγω διαταραχής, όπως ένα σφάλμα που οδηγεί σε απώλεια γραμμής ή Μ/Σ που προ σφάλματος συνέδεε το δίκτυο αυτό με το υπόλοιπο κύριο ηλεκτρικό σύστημα. Το ανεξάρτητα λειτουργόν δίκτυο αναφέρεται ως (ηλεκτρική) νησίδα. Η νησιδοποίηση είναι σε πολύ μεγάλο βαθμό ανεπιθύμητη, καθώς στο νησιδοποιημένο δίκτυο οι τάσεις και οι συχνότητες δεν ελέγχονται πλέον από τους συμβατικούς μεγάλους σταθμούς παραγωγής. Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε μεγάλες διακυμάνσεις της τάσης και της συχνότητας από τις ονομαστικές τιμές, θέτοντας σε κίνδυνο τόσο τα στοιχεία του ίδιου του δικτύου όσον και τον εξοπλισμό του πελάτη.

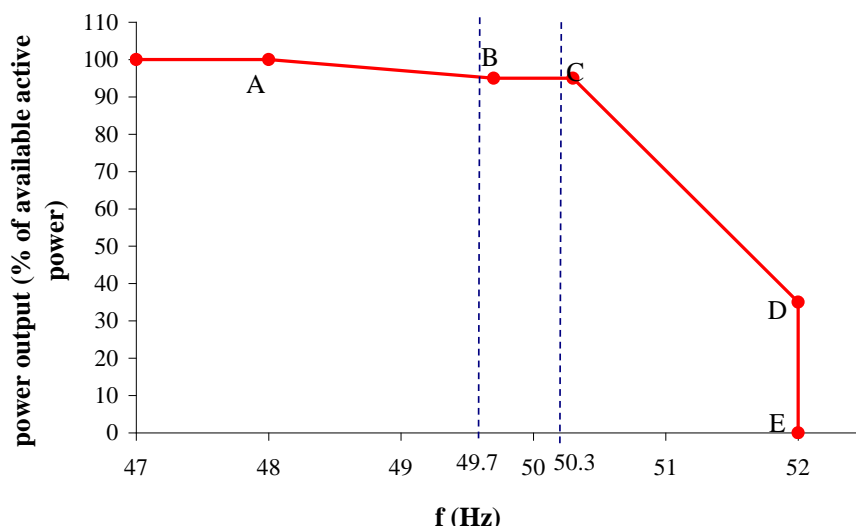
Με την αύξηση της διείσδυσης της αιολικής παραγωγής, οι σύγχρονοι κώδικες προβλέπουν συγκεκριμένες και αυστηρές απαιτήσεις για την δυνατότητα παραμονής σε λειτουργία των Α/Γ υπό συνθήκες βύθισης τάσης και οι οποίες είναι γνωστές ως Low Voltage Ride Through (LVRT) capability και εκφράζονται υπό την μορφή καμπυλών τάσης-χρόνου. Τυπική μορφή τέτοιας καμπύλης φαίνεται στο Σχ. 1.7.



Σχήμα 1.8 : Συγκριτική παρουσίαση καμπυλών LVRT [12]



Σχήμα 1.9 : Ισπανικός κώδικας για απαίτηση παραγωγής αέργου ρεύματος συναρτήσει της τάσης στο ΣΚΣ [12]



Σχήμα 1.10 : Ιρλανδικός κώδικας για απαίτηση ρύθμισης της ενεργού ισχύος εξόδου συναρτήσει της συχνότητας του δικτύου [12].

1.4.1 Τεχνολογία LVRT για Α/Γ με πλήρη μετατροπέα

Για την επίτευξη της αδιάλειπτης παροχής ισχύος σε συνθήκες χαμηλής τάσης (low voltage ride through ή fault ride through), καταρχάς πρέπει να εξασφαλιστεί η τροφοδοσία όλων των συστημάτων ελέγχου που απαρτίζουν την διάταξη της Α/Γ για το χρονικό διάστημα όπου η τάση του δικτύου έχει τιμές αρκετά χαμηλότερες της ονομαστικής. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μόνο με την χρήση διατάξεων UPS (Uninterruptible Power Supply), τα οποία τροφοδοτούν όλα τα απαραίτητα συστήματα ελέγχου και έτσι η Α/Γ μένει σε λειτουργία και είναι πλήρως ελεγχόμενη. Το UPS συνήθως τοποθετείται στην dc τάση του πυκνωτή [8].

Αφού εξασφαλιστεί η τροφοδοσία των συστημάτων, θα πρέπει να εφαρμοστεί κατάλληλη στρατηγική στον έλεγχο των ηλεκτρονικών ισχύος. Στις Α/Γ με πλήρη μετατροπέα, κρίσιμης σημασίας είναι η στρατηγική που θα εφαρμοστεί στον μετατροπέα πλευράς δικτύου. Συγκεκριμένα ο βασικότερος έλεγχος έγκειται στο να μην αυξηθεί το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα πέρα από μια μέγιστη τιμή. Μια απόπειρα να διατηρήσει την τάση εξόδου του σε υψηλές τιμές σε συνθήκες σφάλματος, μπορεί να οδηγήσει σε πολύ μεγάλη αύξηση του ρεύματος που θα προκαλέσει αμέσως την αποκοπή των IGBTs, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να τροφοδοτεί το δίκτυο. Μάλιστα το ρεύμα θα πρέπει να ρυθμιστεί έτσι ώστε να έχει μεγάλη άεργο συνιστώσα αν απαιτείται βέβαια αυτό από τις τεχνικές απαιτήσεις κωδίκων.

Όσον αφορά το υπόλοιπο σύστημα, για να αποφευχθεί υπερβολική επιτάχυνση της Α/Γ και αύξηση της dc τάσης του πυκνωτή πέραν του ορίου (πράγμα που θα οδηγούσε σε αποσύνδεση της Α/Γ) θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια αντίσταση ελεγχόμενη από διακοπτικό στοιχείο (chopper resistance) [5], [7], η οποία θα απορροφά την περίσσεια της ηλεκτρικής ισχύος που θα προκαλούσε τα παραπάνω προβλήματα. Αξίζει να σημειωθεί πως στον συγκεκριμένο τύπο Α/Γ, η πλήρης απόξυξη της γεννήτριας από το δίκτυο έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση των λιγότερων μεταβατικών φαινομένων, συγκριτικά με τις άλλες διατάξεις που χρησιμοποιούνται.

1.5 Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

1.5.1 Ορισμός ευστάθειας ΣΗΕ

Η ευστάθεια των ΣΗΕ ορίζεται από την ικανότητα του συστήματος, για ένα δεδομένο αρχικό λειτουργικό σημείο, να επανακτά ένα αποδεκτό σημείο λειτουργίας μετά από μία διαταραχή, η οποία οδηγεί τις περισσότερες μεταβλητές του συστήματος κοντά στις αρχικές τιμές τους, ώστε το συνολικό σύστημα να παραμένει πρακτικά αμετάβλητο.

Η διατήρηση της ευσταθούς λειτουργίας ενός ΣΗΕ στο ενδεχόμενο μίας διαταραχής εξαρτάται από τις αρχικές λειτουργικές συνθήκες, καθώς επίσης και από τη φύση της διαταραχής. Τα ΣΗΕ υπόκεινται σε ένα μεγάλο πλήθος μικρών και μεγάλων διαταραχών. Οι μικρές διαταραχές συμβαίνουν διαρκώς, αν αναλογιστεί κανείς ότι το ηλεκτρικό φορτίο των διαφόρων καταναλωτών μεταβάλλεται συνεχώς. Στις περιπτώσεις αυτές, το εξεταζόμενο σύστημα θα πρέπει να διαθέτει την ικανότητα της άμεσης προσαρμογής στις εκάστοτε λειτουργικές συνθήκες, ώστε να αποκρίνεται ικανοποιητικά. Επίσης, είναι επιθυμητή η αντοχή του συστήματος σε ιδιαίτερα κρίσιμες διαταραχές, όπως είναι για παράδειγμα ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα σε μία γραμμή μεταφοράς ή η απώλεια μίας μεγάλης μονάδας παραγωγής. Μία κρίσιμη διαταραχή μπορεί να προκαλέσει την ενεργοποίηση ορισμένων διακοπών προστασίας, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της τοπολογίας του δικτύου και τη δημιουργία δύο ή περισσότερων νησίδων.

Η απόκριση ενός ηλεκτρικού δικτύου σε μία διαταραχή μπορεί να εμπλέξει ένα μεγάλο μέρος του εξοπλισμού. Για παράδειγμα, ένα σφάλμα σε ένα κρίσιμο στοιχείο και η συνακόλουθη απομόνωσή του λόγω της δράσης του αντίστοιχου εξοπλισμού προστασίας, μπορεί να προκαλέσει μεταβολές στις ροές ισχύος των γραμμών, στις τάσεις των ζυγών και στις ταχύτητες των δρομέων των στρεφόμενων μηχανών. Οι μεταβολές των τάσεων των ζυγών επηρεάζουν τους ρυθμιστές τάσης των γεννητριών και των δικτύων μεταφοράς. Επίσης, οι μεταβολές στην ταχύτητα των σύγχρονων γεννητριών έχουν αντίκτυπο στη συμπεριφορά των στροβίλων και των ρυθμιστών στροφών. Ταυτόχρονα, οι μεταβολές της τάσης και της συχνότητας επηρεάζουν σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό την κατανάλωση των φορτίων, ανάλογα με την κατά περίπτωση χαρακτηριστική αυτών. Ακολούθως, οι παραπάνω μεταβολές είναι πιθανό να οδηγήσουν στην ενεργοποίηση ορισμένων διατάξεων προστασίας, οι οποίες με τη σειρά τους θα αποσυνδέσουν τις αντίστοιχες διατάξεις από το δίκτυο, με αποτέλεσμα την περαιτέρω επιβάρυνση του δικτύου, η οποία πιθανώς να καταλήξει σε εκδήλωση φαινομένων αστάθειας.

Εάν το δίκτυο αποκριθεί ευσταθώς μετά από μία διαταραχή, θα οδηγηθεί σε ένα νέο σημείο ισορροπίας, στο οποίο θα διατηρηθεί η ακεραιότητα του δικτύου, δηλαδή για παράδειγμα το σύνολο των γεννητριών και των φορτίων θα συνδέονται μεταξύ τους. Ένα πλήθος γεννητριών και φορτίων είναι πιθανό να αποσυνδεθεί από το δίκτυο είτε εξαιτίας της απομόνωσης του εξοπλισμού που συνδέεται με το σφάλμα είτε λόγω της σκόπιμης απόρριψης ορισμένων διατάξεων προκειμένου να διατηρηθεί η συνέχεια της λειτουργίας του υπόλοιπου συστήματος. Στις περιπτώσεις σοβαρών διαταραχών σε διασυνδεδεμένα συστήματα, η επερχόμενη απομόνωση ορισμένων στοιχείων μπορεί να οδηγήσει στο διαχωρισμό του συστήματος σε δύο ή περισσότερες νησίδες (ανεξάρτητες μεταξύ τους), προκειμένου να ικανοποιηθεί όσο

το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος του φορτίου. Στη συνέχεια, η δράση των αυτόματων ελεγκτών του συστήματος σε συνδυασμό με τους ανθρώπινους χειρισμούς θα αποκαταστήσουν σταδιακά την ομαλή λειτουργία του συστήματος.

Σε αντίθετη περίπτωση, εάν δηλαδή το σύστημα αποδειχθεί ασταθές, θα οδηγηθεί σε διαδοχικές απώλειες των διατάξεων, με αποτέλεσμα τη σβέση ενός μεγάλου μέρους του συστήματος.

Όπως προαναφέρθηκε, τα ΣΗΕ υπόκεινται σε συνεχείς διακυμάνσεις μικρού πλάτους. Ωστόσο, στις μελέτες ευστάθειας θεωρείται ότι στο αρχικό σημείο λειτουργίας πριν την κατά περίπτωση εξεταζόμενη διαταραχή, το σύστημα βρίσκεται σε σημείο μονίμου καταστάσεως.

1.4.2 Κατηγοριοποίηση φαινομένων ευστάθειας ΣΗΕ

Ένα τυπικό σύγχρονο ΣΗΕ αποτελεί ουσιαστικά ένα πολυμεταβλητό σύστημα, του οποίου η δυναμική συμπεριφορά επηρεάζεται από ένα τεράστιο σύνολο διατάξεων με διαφορετικές χαρακτηριστικές και ποικίλους ρυθμούς απόκρισης. Ανάλογα με την τοπολογία του δικτύου, τη λειτουργική κατάσταση του συστήματος και τον τύπο της διαταραχής, είναι πιθανόν να οδηγηθεί το σύστημα σε διαφορετικές μορφές αστάθειας.

Η ευστάθεια των ΣΗΕ αποτελεί ένα ενιαίο πρόβλημα. Εντούτοις, οι τύποι αστάθειας, οι οποίοι μπορεί να εμφανιστούν σε ένα ΣΗΕ, διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους και καθιστούν τη μελέτη της ευστάθειας περισσότερο εξειδικευμένη. Έτσι, η ανάλυση της ευστάθειας των ΣΗΕ πραγματοποιείται με κατάλληλες αναλυτικές τεχνικές κατά περίπτωση, λαμβάνοντας υπόψη ορισμένες απλουστευτικές παραδοχές. Οι παραδοχές αυτές οδηγούν σε ένα απλοποιημένο μοντέλο του συστήματος, στο οποίο όμως διατηρείται αναλλοίωτη η δυναμική των φαινομένων που ενδιαφέρουν κάθε φορά.

Συγκεκριμένα, η μελέτη της ευστάθειας των ΣΗΕ περιλαμβάνει την ανάλυση των φαινομένων τα οποία συνεισφέρουν στη διέγερση των μηχανισμών αστάθειας και στη συνέχεια την επεξεργασία μεθόδων ενίσχυσης της ευσταθούς λειτουργίας του συστήματος. Ανάλογα με τις επιπτώσεις της διαταραχής στο δίκτυο, διακρίνονται η ευστάθεια μικρών και μεγάλων διαταραχών. Η ανάλυση ευστάθειας μικρών διαταραχών πραγματοποιείται με γραμμικοποίηση του συστήματος πολύ κοντά στην περιοχή του εξεταζόμενου σημείου ισορροπίας. Από την άλλη πλευρά, η μελέτη ευστάθειας μεγάλων διαταραχών προϋποθέτει συνήθως την προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς του δικτύου με ένα κατάλληλο πρόγραμμα προσομοίωσης.

Όπως γίνεται αντιληπτό, η μελέτη ευστάθειας των ΣΗΕ διευκολύνεται σημαντικά εάν διαχωριστούν τα φαινόμενα της ευστάθειας σε κατάλληλες κατηγορίες. Στην αναφορά [40] η κατηγοριοποίηση των φαινομένων ευστάθειας των ΣΗΕ πραγματοποιείται βάσει των ακόλουθων κριτηρίων:

- Τη φύση του ρυθμού αστάθειας που υποδεικνύεται από τις κυρίαρχες μεταβλητές του συστήματος στις αποκρίσεις των οποίων παρατηρείται η εμφανιζόμενη αστάθεια.
- Το μέγεθος της εξεταζόμενης διαταραχής, το οποίο επηρεάζει τη μεθοδολογία για τον υπολογισμό και την πρόβλεψη της αστάθειας.
- Τις διατάξεις, τις διαδικασίες και τη χρονική κλίμακα που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την εκτίμηση της ευστάθειας.

Η κατηγοριοποίηση των φαινομένων ευστάθειας ΣΗΕ, ως προς την χρονική κλίμακα και την κινητήρια δύναμη (παραγωγή ή φορτία) φαίνεται ενδεικτικά στο Σχ. 1.11.

Χρονική κλίμακα \ Κινητήρια δύναμη	Παραγωγή (Σύγχρονες Μηχανές)	Φορτία (Μηχανές Επαγωγής)
Βραχυπρόθεσμη	ευστάθεια γωνίας (μικρών διαταραχών/μεταβατική)	βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης
Μακροπρόθεσμη	ευστάθεια συχνότητας	μακροπρόθεσμη ευστάθεια τάσης

Σχήμα 1.11 : Κατηγοριοποίηση φαινομένων ευστάθειας ΣΗΕ[43]

Για μελέτες ευστάθειας μικρών διαταραχών ενδιαφέρουν μεταβατικά φαινόμενα που συμβαίνουν στην χρονική κλίμακα από 10 έως 20 δευτερόλεπτα μετά από μια εμφανιζόμενη διαταραχή [41]. Για μελέτες μεταβατικής ευστάθειας ενδιαφέρουν μεταβατικά φαινόμενα που συμβαίνουν στην χρονική κλίμακα από 3 έως 5 δευτερόλεπτα μετά από μια εμφανιζόμενη διαταραχή [41]. Συνεπώς σε μελέτες ευστάθειας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, υποσυστήματα των οποίων τα μεταβατικά φαινόμενα εξελίσσονται σε μικρότερη χρονική κλίμακα από τις προαναφερθείσες, μπορούν να απλοποιηθούν. Συγκεκριμένα μπορεί να αμεληθεί η δυναμική συμπεριφορά τους και να αντικατασταθεί από μια διαδοχή σημείων ισορροπίας. Αυτή η παραδοχή ονομάζεται οιονεί στατική (Quasi-Steady-State) προσέγγιση [56].

1.4.3 Ευστάθεια γωνίας

Η ευστάθεια γωνίας αναφέρεται στην ικανότητα των σύγχρονων μηχανών ενός διασυνδεδεμένου συστήματος να παραμένουν σε συγχρονισμό με το δίκτυο μετά από μία διαταραχή. Η ευστάθεια αυτού του είδους εξαρτάται από την ικανότητα κάθε σύγχρονης μηχανής να διατηρεί ή να αποκαθιστά την ισορροπία μεταξύ της αναπτυσσόμενης ηλεκτρομαγνητικής και της μηχανικής ροπής εισόδου.

Η ευστάθεια γωνίας δρομέα υποδιαιρείται στην ευστάθεια μικρών διαταραχών (small signal stability) και στην μεταβατική ευστάθεια (transient stability).

Η ευστάθεια γωνίας μικρών διαταραχών σχετίζεται με την ικανότητα του συστήματος να παραμένει σε συγχρονισμό μετά από μικρές διαταραχές, το μέγεθος των οποίων επιτρέπει την ανάλυση της ευστάθειας με τη γραμμικοποίηση του συστήματος κοντά σε μία περιοχή του εξεταζόμενου σημείου ισορροπίας [40].

Η ευστάθεια μικρών διαταραχών εξαρτάται από την αρχική λειτουργική κατάσταση του δικτύου. Στην περίπτωση αυτή, η αστάθεια μπορεί να εκδηλωθεί με τους εξής δύο τρόπους: α) την αύξηση της γωνίας δρομέα μέσω ενός απεριοδικού ρυθμού λόγω της έλλειψης ροπής συγχρονισμού, ή β) ταλαντώσεις δρομέα αυξανόμενου πλάτους λόγω της έλλειψης ροπής απόσβεσης.

Η ευστάθεια μεγάλων διαταραχών ή μεταβατική ευστάθεια γωνίας σχετίζεται με την ικανότητα του συστήματος να παραμένει σε συγχρονισμό μετά από αρκετά σοβαρές διαταραχές, όπως είναι για παράδειγμα ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα σε μία γραμμή μεταφοράς. Η απόκριση ενός δικτύου σε μία τόσο σοβαρή διαταραχή διακρίνεται από μεγάλες μεταβολές των γωνιών δρομέα των γεννητριών, ενώ

επηρεάζεται έντονα από τη μη γραμμική χαρακτηριστική ενεργού ισχύος-γωνίας δρομέα.

Το χρονικό διάστημα σε μελέτες ευστάθειας γωνίας είναι συνήθως της τάξης λίγων δευτερολέπτων μετά τη διαταραχή. Ωστόσο, σε περιπτώσεις αρκετά μεγάλων ΣΗΕ το διάστημα αυτό μπορεί να επεκταθεί σε λίγες δεκάδες δευτερολέπτων λόγω της κυριαρχίας των ταλαντώσεων διασυνδέσεων.

1.4.4 Ευστάθεια τάσης

Η ευστάθεια τάσης αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος ισχύος να διατηρεί αποδεκτές τάσεις σε όλους τους ζυγούς του συστήματος κάτω από συνθήκες κανονικής λειτουργίας και όταν υπάρχει διαταραχή.

Η αστάθεια τάσης προκαλείται από την απόπειρα του φορτίου (μέσω της δυναμικής του συμπεριφοράς) να αυξήσει την ισχύ που καταναλώνει πέρα από την ικανότητα μεταφοράς του συνδυασμένου συστήματος παραγωγής και μεταφοράς.

Σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό, η ευστάθεια τάσης εξαρτάται από την ικανότητα του συστήματος να διατηρεί ή να αποκαθιστά την ισορροπία μεταξύ της παραγωγής και της κατανάλωσης ισχύος των φορτίων. Η αστάθεια τάσης ενός συστήματος μπορεί να διαρκέσει από μερικά δευτερόλεπτα έως και μερικές δεκάδων λεπτών. Η εξέλιξη ενός σεναρίου αστάθειας τάσης μπορεί να έχει μία από τις παρακάτω καταλήξεις [42]:

- Μία μη ομαλή μόνιμη κατάσταση λειτουργίας σε εξαιρετικά χαμηλό επίπεδο τάσεων. Η κατάσταση αυτή εμφανίζεται συνήθως όταν οι μηχανισμοί που συνεισφέρουν στην αστάθεια απενεργοποιούνται επειδή συναντούν τα άνω ή κάτω όρια λειτουργίας τους. Τυπική περίπτωση είναι τα ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών, των οποίων οι λήψεις έχουν περιορισμένη περιοχή ρύθμισης.
- Μία επιτάχυνση του φαινομένου, η οποία οδηγεί στην απότομη βύθιση των τάσεων στην περιοχή εμφάνισης του προβλήματος. Στην περίπτωση αυτή, το φαινόμενο ονομάζεται κατάρρευση τάσης. Η κατάρρευση τάσης έχει ως αποτέλεσμα τη μερική ή ολική σβέση του συστήματος.

1.4.5 Ευστάθεια συχνότητας

Η ευστάθεια συχνότητας αναφέρεται στην ικανότητα ενός ΣΗΕ να διατηρεί τη συχνότητά του εντός ενός προκαθορισμένου εύρους τιμών μετά από μία διαταραχή, η οποία διαταράσσει το συνολικό ισοζύγιο μεταξύ παραγόμενης και καταναλισκόμενης ισχύος [41]. Ειδικότερα, η ευστάθεια συχνότητας εξαρτάται από την ικανότητα του συστήματος να διατηρεί ή να επαναφέρει το ισοζύγιο μεταξύ παραγωγής και ζήτησης με τη μικρότερη δυνατή απόρριψη παραγωγής ή φορτίου. Στην περίπτωση αυτή, μία πιθανή αστάθεια εκδηλώνεται με τη μορφή συνεχών ταλαντώσεων στην τιμή της συχνότητας, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν στη διαδοχική αποκοπή μονάδων παραγωγής και φορτίων μέχρι την ολική σβέση του συστήματος.

Όπως φαίνεται στο Σχ. 1.11, τα φαινόμενα ευστάθειας συχνότητας κατατάσσονται στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, διότι στη διέγερσή τους κυρίαρχο ρόλο διαδραματίζουν ορισμένες αργές συνιστώσες του συστήματος, όπως είναι για παράδειγμα οι στρόβιλοι και οι αντίστοιχοι ρυθμιστές στροφών των μονάδων

παραγωγής, καθώς επίσης και τα συστήματα ελέγχου και προστασίας των σύγχρονων γεννητριών.

1.5 Επισκόπηση βιβλιογραφίας

Σημαντικό κομμάτι της βιβλιογραφίας για τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας τα τελευταία χρόνια είναι αφιερωμένο στη μελέτη της διείσδυσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας σε αυτά. Κυρίαρχη θέση κατέχει η αιολική ενέργεια, καθώς αποτελεί υπό τις παρούσες συνθήκες τη μόνη από τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας που μπορεί να συγκριθεί με τις αντίστοιχες συμβατικές τόσο από πλευράς κόστους όσο και από πλευράς παραγόμενων μεγεθών ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα βιβλία και οι εργασίες που ασχολούνται με την αιολική ενέργεια καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα από ποικίλες θεματικές περιοχές. Τα τελευταία χρόνια κυρίαρχο ρόλο κατέχει η μοντελοποίηση εναλλακτικών διαμορφώσεων του ηλεκτρικού μέρους ανεμογεννητριών σταθερών και μεταβλητών στροφών. Στις εργασίες [27], [29], [30], εξάγονται ισοδύναμα μοντέλα ανεμογεννητριών σταθερών στροφών, μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη μηχανή και μεταβλητών στροφών με σύγχρονη μηχανή, κατάλληλα για δυναμικές προσομοιώσεις. Στις δημοσιεύσεις [14], [15], [18], [24] γίνεται λεπτομερέστερη εξέταση και μοντελοποίηση των επιμέρους διατάξεων της ανεμογεννήτριας με πλήρη μετατροπέα και σύγχρονη μηχανή.

Επίσης ένα σημαντικό αντικείμενο αφορά τις διατάξεις των ηλεκτρονικών ισχύος οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρύτατα στις σύγχρονες τεχνολογίες των ανεμογεννητριών. Στα συγγράμματα [46], [47], [58] αναλύονται και αξιολογούνται οι διάφορες τεχνικές ελέγχου που χρησιμοποιούνται στους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος, οι οποίοι καθορίζουν και τον τρόπο λειτουργίας των ανεμογεννητριών. Επίσης στις εργασίες [31], [33] και στις δημοσιεύσεις [38], [39] μελετάται πιο λεπτομερώς η απόκριση των μετατροπέων ισχύος ανάλογα την εφαρμοζόμενη τεχνική ελέγχου.

Ένα άλλο θέμα με μεγάλο όγκο ερευνητικής δραστηριότητας τελευταία, αφορά τη δυνατότητα αδιάλειπτης λειτουργίας των ανεμογεννητριών σε διαταραχές της τάσης και της συχνότητας του δικτύου. Στην δημοσίευση [12] γίνεται μια συγκριτική παρουσίαση των απαιτήσεων αυτών, οι οποίες διαφέρουν εν γένει από χώρα σε χώρα. Στις αναφορές [6], [7], [8], [10] παρουσιάζονται οι σημερινές τεχνολογίες και στρατηγικές ελέγχου οι οποίες αφορούν ανεμογεννήτριες με πλήρη μετατροπέα και με τις οποίες ικανοποιούνται οι προαναφερθείσες απαιτήσεις. Επίσης στις αναφορές [53], [54], [55] προσομοιώνεται η λειτουργία των ανεμογεννητριών με πλήρη μετατροπέα κατά την διάρκεια σφαλμάτων του δικτύου. Τέλος στην δημοσίευση [19] μελετάται η επίδραση που έχει ένα αιολικό πάρκο στην ευστάθεια τάσης, με παράμετρο το κατά πόσο ισχυρό ή ασθενές είναι το δίκτυο στο οποίο συνδέεται το αιολικό πάρκο.

Οι εργασίες [35], [37], όπως και η [24] αναφέρονται σε πιο λεπτομερές μοντέλο ανεμογεννήτριας με πλήρη μετατροπέα. Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται ένα πιο απλοποιημένο μοντέλο, κατάλληλο για μελέτες ευστάθειας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Το μοντέλο αυτό είναι πλησιέστερο στην αναφορά [5] για την ανεμογεννήτρια με πλήρη μετατροπέα. Η μέθοδος είναι ανάλογη με αυτή που χρησιμοποιήθηκε στις εργασίες [60] και [61] για την ανεμογεννήτρια διπλής τροφοδότησης.

1.6 Αντικείμενο και δομή της διπλωματικής

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής είναι η ανάπτυξη ενός μοντέλου ανεμογεννήτριας με πλήρη μετατροπέα, κατάλληλο για μελέτες ευστάθειας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Πιο συγκεκριμένα, αρχικά περιγράφονται οι επιμέρους διατάξεις που χρησιμοποιούνται σε μια ανεμογεννήτρια με πλήρη μετατροπέα και αναλύονται οι συνθήκες τεχνικές ελέγχου τους. Στη συνέχεια βάσει της προηγούμενης ανάλυσης εξάγονται συμπεράσματα για το ποιοι είναι οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την λειτουργία της διάταξης στην χρονική κλίμακα που αντιστοιχεί σε μελέτες ευστάθειας μικρών διαταραχών και μεταβατικής ευστάθειας. Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν στο περιβάλλον simulink και αξιολογείται η απόκριση της διάταξης για διάφορες συνθήκες λειτουργίας.

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από 6 κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ιδιαίτερα στην αιολική ενέργεια. Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι επικρατέστερες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στις μέρες μας στην κατασκευή ανεμογεννητριών. Έπειτα γίνεται μια αναφορά στους κυριότερους κανόνες που θεσπίζονται τα τελευταία χρόνια όσον αφορά στην σύνδεση αιολικών πάρκων στο δίκτυο και τις προϋποθέσεις που πρέπει αυτά να ικανοποιούν. Τέλος δίνονται κάποια θεωρητικά στοιχεία περί ευστάθειας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι για την κατανόηση των δυναμικών φαινομένων που συμβαίνουν σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία θα μελετηθούν και στην παρούσα εργασία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή των επιμέρους υποσυστημάτων που απαρτίζουν μια Α/Γ με πλήρη μετατροπέα. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι συνθήκες τεχνικές ελέγχου του DC/DC μετατροπέα ανύψωσης έτσι ώστε να αξιολογηθεί η ταχύτητα απόκρισής του. Στην συνέχεια γίνεται η παρουσίαση του μετασχηματισμού abc-dq0, ο οποίος είναι αναγκαίος για την μοντελοποίηση της διάταξης, καθώς απλοποιεί σημαντικά τις αναγκαίες μεταβλητές για την πλήρη περιγραφή της απόκρισης της διάταξης. Στην συνέχεια παρουσιάζεται η γενική δομή του τριφασικού DC/AC μετατροπέα και εξηγείται πώς διαμέσου της διάταξης αυτής επιτυγχάνεται η έγχυση της επιθυμητής ισχύος στο δίκτυο.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι συνηθέστερες τεχνικές ελέγχου ενός DC/AC μετατροπέα και αναλύονται οι επιμέρους διατάξεις που χρησιμοποιούνται στο εσωτερικό του, και οι οποίες τελικά διαμορφώνουν την απόκρισή του. Στόχος της συγκεκριμένης μελέτης είναι να αιτιολογηθεί γιατί στην ουσία μπορεί ο μετατροπέας αυτός να μοντελοποιηθεί ως μια ελεγχόμενη πηγή ρεύματος. Επίσης μελετάται κατά πόσον ο μη απόλυτος συγχρονισμός του μετατροπέα με την τάση του δικτύου επηρεάζει την απόκριση του ρεύματος εξόδου του, έτσι ώστε να αξιολογηθεί τελικά αν είναι αναγκαία ή όχι η μοντελοποίηση της διάταξης μέσω της οποίας γίνεται ο συγχρονισμός. Τέλος διερευνάται κατά πόσον είναι εφικτή η ανεξάρτητη ρύθμιση του ενεργού και αέργου ρεύματος εξόδου του μετατροπέα συναρτήσεως των συνθηκών του δικτύου. Στόχος της συγκεκριμένης διερεύνησης είναι να αξιολογηθεί η πιθανότητα να οδηγηθεί ο μετατροπέας σε αστάθεια κατά την διάρκεια σοβαρών σφαλμάτων του δικτύου. Μέσα από αυτή τη μελέτη εξάγονται συμπεράσματα για το τι ρύθμιση θα πρέπει να γίνει τελικά σε αυτόν κατά την διάρκεια σοβαρών σφαλμάτων, ώστε να αποφευχθεί η προαναφερθείσα κατάσταση. Με αυτή τη ρύθμιση θα ικανοποιούνται και οι απαιτήσεις των πιο αυστηρών κωδίκων που αναφέρονται στην υποστήριξη της

τάσης του δικτύου από τα αιολικά πάρκα, ακόμα και όταν αυτή είναι μηδενική (στο σημείο κοινής σύνδεσης).

Στο τέταρτο κεφάλαιο χρησιμοποιούνται τα συμπεράσματα των κεφαλαίων 2,3 ώστε να γίνουν οι κατάλληλες παραδοχές και να αναπτυχθεί ένα μοντέλο που θα περιγράφει ικανοποιητικά την απόκριση του πραγματικού συστήματος, έτσι όπως αυτή φαίνεται από πλευράς δικτύου. Επίσης στο μοντέλο αυτό παρουσιάζεται και η στρατηγική με την οποία το αιολικό πάρκο θα πρέπει να εγγχεί ενεργό και άεργο ισχύ στο δίκτυο κατά την διάρκεια βυθίσεων της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης, έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις των σύγχρονων κωδίκων. Τέλος γίνεται μια αναφορά για το πώς υλοποιούνται τα παραπάνω υποσυστήματα στο περιβάλλον simulink.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις του μοντέλου της ανεμογεννήτριας που αναπτύχθηκε. Αρχικά μελετάται η απόκριση του μοντέλου όταν το εξεταζόμενο αιολικό πάρκο είναι συνδεδεμένο απευθείας σε ένα άπειρο δίκτυο. Συγκρίνονται τα αποτελέσματα στις περιπτώσεις όπου το Α/Π λειτουργεί με έλεγχο της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης και όταν λειτουργεί με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος στην έξοδό του. Στην συνέχεια μελετάται η απόκριση του μοντέλου όταν το εξεταζόμενο αιολικό πάρκο είναι συνδεδεμένο σε ένα μικρό διασυνδεδεμένο σύστημα. Μελετάται η επίδρασή του στην απόκριση του δικτύου ανάλογα με το ποια από τις δύο προαναφερθείσες τεχνικές ελέγχου της αέργου ισχύος χρησιμοποιεί. Επίσης μελετάται και η συμβολή του αιολικού πάρκου στην μεταβατική ευστάθεια του συστήματος, με παραμέτρους την αρχική ενεργό ισχύ εξόδου του και την στρατηγική ελέγχου του κατά την διάρκεια βυθίσεων τάσης. Στο τέλος του κεφαλαίου εξετάζεται η απόκριση του αιολικού πάρκου όταν δέχεται σαν είσοδο χρονοσειρές ταχυτήτων ανέμου.

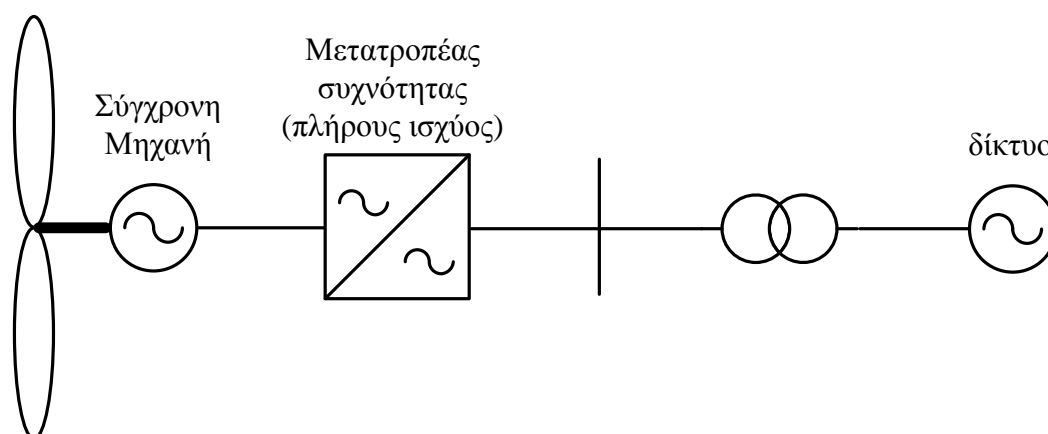
Τέλος στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξάγονται από την μελέτη των προηγούμενων κεφαλαίων. Επίσης αναλύονται θέματα με τα οποία δεν ασχολείται η παρούσα εργασία και τα οποία μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενα μελλοντικής ερευνητικής μελέτης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΕ ΠΛΗΡΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ

2.1 Περιγραφή συστήματος Α/Γ

Το μοντέλο της ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία αποτελείται από σύγχρονη μηχανή. Πλεονέκτημα αυτού του είδους μηχανής είναι ότι μπορεί να κατασκευασθεί γεννήτρια με μεγάλο αριθμό πόλων και έτσι η γεννήτρια μπορεί να λειτουργήσει με χαμηλές στροφές $\left(n_s = \frac{120f}{p}\right)$. Συνεπώς ο δρομέας της γεννήτριας μπορεί να συνδεθεί απευθείας με τον δρομέα της περρωτής, με αποτέλεσμα να μπορεί να παραληφθεί το κιβώτιο ταχυτήτων.



Σχήμα 2.1 : Γενική δομή της εξεταζόμενης διάταξης

Η γεννήτρια συνδέεται στο δίκτυο μέσω ενός πλήρους μετατροπέα AC/DC/AC, γεγονός που δημιουργεί πλήρη απόζευξη της από το δίκτυο. Από την πλευρά της συνήθως τοποθετείται ένας τριφασικός μη ελεγχόμενος ανορθωτής διόδων σε συνδυασμό με έναν DC/DC μετατροπέας ανύψωσης. Από την πλευρά του δικτύου τοποθετείται ένας DC/AC μετατροπέας.

Ο DC/DC μετατροπέας ανύψωσης μπορεί να λειτουργεί είτε υλοποιώντας την στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος (MPPT strategy) είτε διατηρώντας την DC τάση σταθερή. Αντίστοιχα, ο μετατροπέας πλευράς δικτύου (Μ.Π.Δ.) μπορεί να λειτουργεί είτε διατηρώντας την DC τάση σταθερή, είτε υλοποιώντας την στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος. Επίσης, ο Μ.Π.Δ. ελέγχει την ανταλλαγή αέργου ισχύος με το δίκτυο είτε διατηρώντας τον συντελεστή ισχύος στην πλευρά του δικτύου στην επιθυμητή τιμή, είτε ελέγχοντας την τάση του ζυγού όπου συνδέεται η ανεμογεννήτρια.

2.2 Προσομοίωση του ανέμου

Για την προσομοίωση μιας A/Γ απαιτείται η χρήση κατάλληλων χρονοσειρών ανέμου οι οποίες όμως τις περισσότερες φορές δεν είναι διαθέσιμες με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η αναπαραγωγή τους.

Ο άνεμος είναι μέγεθος χωρικά και χρονικά συνεχές. Βραχυπρόθεσμα μπορεί να υποτεθεί ότι αποτελείται από μια σταθερή μέση τιμή και μια τυχαία μεταβαλλόμενη συνιστώσα (τύρβη). Επομένως, αν η χωρική συσχέτιση της τύρβης είναι γνωστή μπορούν να αναπαραχθούν χρονοσειρές ανέμου χωρικά και χρονικά μεταβαλλόμενες. Έτσι η στιγμιαία ισοδύναμη ταχύτητα του ανέμου δίνεται από τη σχέση [44] :

$$V_w(t) = \bar{V}_w + v(t) \quad (2.1)$$

Όπου $V_w(t)$: η στιγμιαία ταχύτητα ανέμου

\bar{V}_w : η μέση ταχύτητα ανέμου στο διάστημα της προσομοίωσης

$v(t)$: η στιγμιαία τιμή της τυρβώδους συνιστώσας του ανέμου

Για την περιγραφή της φασματικής πυκνότητας της τύρβης η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη συνάρτηση είναι η Von Karman. Η συνάρτηση αυτή εξαρτάται πρωτογενώς από τα χαρακτηριστικά του εδάφους και το εκάστοτε ύψος της μέτρησης του ανέμου από αυτό.

Με δεδομένη τη συνάρτηση της φασματικής πυκνότητας, οι χρονοσειρές της τυρβώδους συνιστώσας του ανέμου μπορούν να αναπαραχθούν με σύνθεση Fourier όπως φαίνεται στη σχέση [45]:

$$v(t) = \sqrt{2\Delta f} \sum_{i=1}^N \left(\sqrt{S_v(f_i)} \cdot \cos(2\pi f_i t + \varphi_i) \right) \quad (2.2)$$

Όπου $S_v(f_i)$: η κατανομή του φασματικού περιεχομένου της τύρβης

N : ο αριθμός των εξεταζόμενων συχνοτήτων

$f_i = (i - 1/2)\Delta f$: η i -οστή συχνότητα του φασματικού περιεχομένου της τύρβης

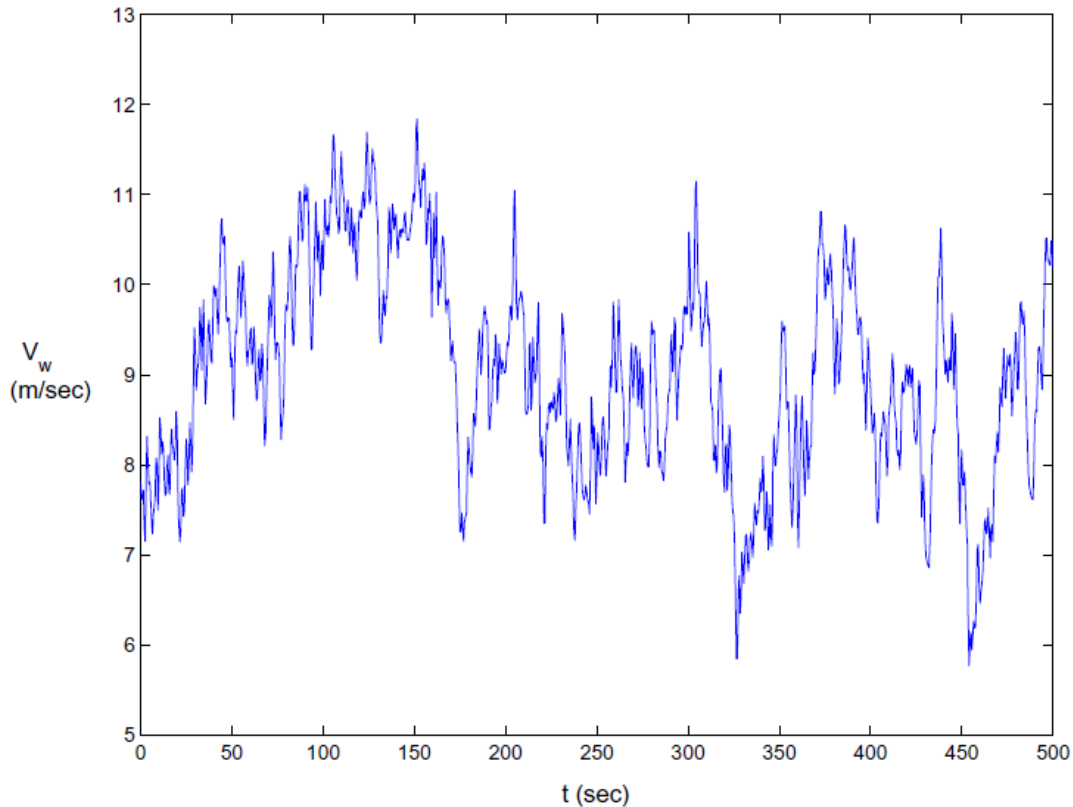
Δf : η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών συχνοτήτων

φ_i : ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές φάσης ομοιόμορφα κατανομημένες στο διάστημα $[0, 2\pi]$.

Κατά την αναπαραγωγή της χρονοσειράς του ανέμου πρέπει να επιλεγεί το εύρος των διαστημάτων της συχνότητας, Δf , καθώς και το πλήθος τους. Θα πρέπει όμως να ληφθεί υπόψη ότι η συγκεκριμένη διαδικασία ισχύει για το ορισμένο χρονικό διάστημα προσομοίωσης, γεγονός που επιβάλλει τους αντίστοιχους περιορισμούς στις εξεταζόμενες συχνότητες.

Γενικά ισχύει ότι η επιλογή των N , Δf πρέπει να είναι τέτοια ώστε η περίοδος που αντιστοιχεί στην ελάχιστη συχνότητα $\Delta f/2$ να είναι μεγαλύτερη από το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης (θεώρημα του Shannon) και η μέγιστη συχνότητα $(N-0.5)\Delta f$ να είναι τουλάχιστον διπλάσια της ταχύτητας περιστροφής της έλικας [44].

Στο Σχ. 2.2 φαίνεται μια χρονοσειρά ανέμου μέσης τιμής 9 m/sec.



Σχήμα 2.2 : Χρονοσειρά ανέμου μέσης τιμής 9m/sec[35].

2.3 Αεροδυναμικό μέρος

Η βασική σχέση που εκφράζει την αεροδυναμική ισχύ της Α/Γ είναι η ακόλουθη :

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot V_w^3 \quad (2.3)$$

όπου P_m : η μηχανική ισχύς στον άξονα της Α/Γ (W)

ρ : η πυκνότητα του αέρα (συνήθης τιμή 1.225 kg/m³)

A : η επιφάνεια που διαγράφει η έλικα (m²)

V_w : η ταχύτητα του ανέμου (m/sec)

C_p : ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος

Όπως φαίνεται από την σχέση , η αεροδυναμική ισχύς εξαρτάται από την ακτίνα της έλικας, την ταχύτητα του ανέμου και τον αεροδυναμικό συντελεστή C_p . Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος, είναι μια συνάρτηση που εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής της Α/Γ, την ταχύτητα ανέμου και την γωνία βήματος έλικας β και όσο μεγαλύτερη τιμή έχει, τόσο μεγαλύτερη είναι και η εκμεταλλεύσιμη αεροδυναμική ισχύς.

Τυπικές τιμές του C_p είναι από 0.4 έως 0.5, ενώ το θεωρητικό μέγιστο όριο είναι 0.593 (όριο Betz). Αυτό σημαίνει πως η εκμεταλλεύσιμη αεροδυναμική ισχύς έχει πάντα ένα μέγιστο όριο (ανάλογα και με την ταχύτητα ανέμου) το οποίο δεν μπορούμε να υπερβούμε.

Ο παραπάνω συντελεστής εξαρτάται από :

- την ταχύτητα ακροπτερυγίου λ (tip speed ratio) που δίνεται από τη σχέση :

$$\lambda = \frac{R\omega_R}{V_w} \quad (2.4)$$

όπου ω_R : η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της Α/Γ (rad/sec)

R : η ακτίνα της έλικας

- τη γωνία βήματος β των πτερυγίων της Α/Γ

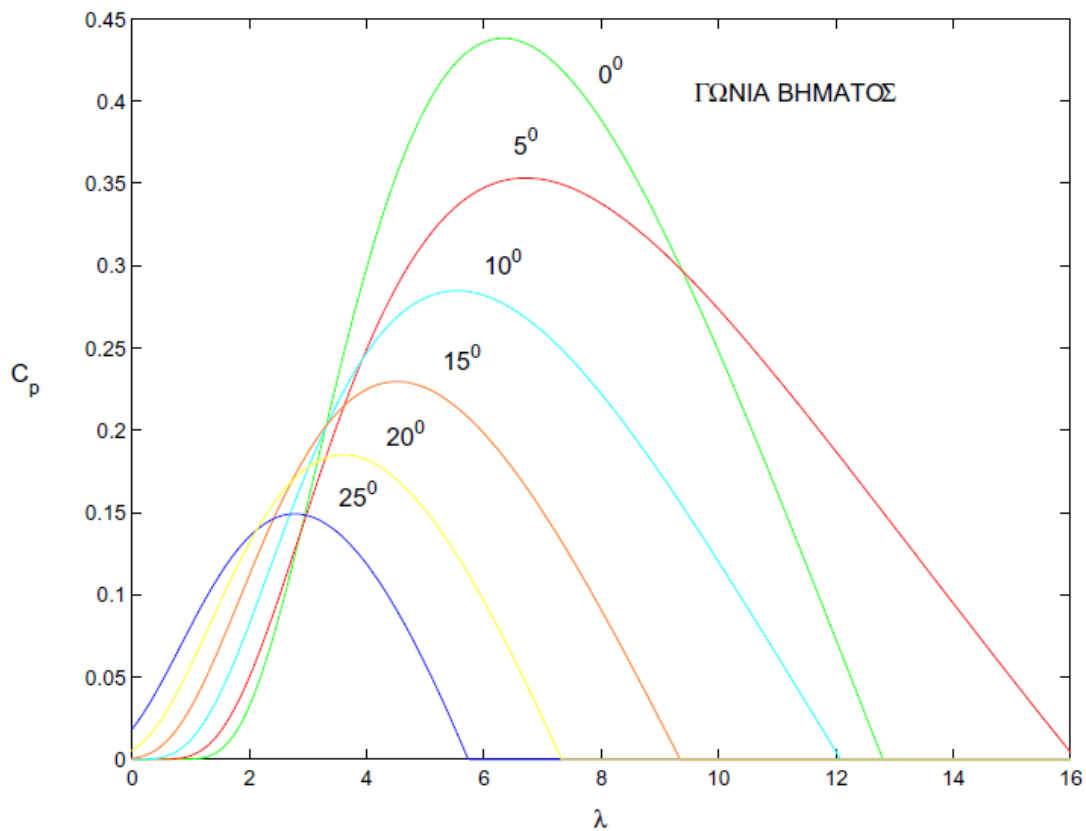
Γνωρίζοντας την αεροδυναμική ισχύ και την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της Α/Γ, η ασκούμενη αεροδυναμική ροπή στην πτερωτή της Α/Γ είναι :

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_R} \quad (2.5)$$

Η αναλυτική σχέση η οποία χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για τον υπολογισμό του συντελεστή C_p συναρτήσει των λ , β είναι η ακόλουθη [35] :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \cdot \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) \cdot e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (2.6)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2.7)$$



Σχήμα 2.3 : Καμπύλες αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος συναρτήσει της ταχύτητας ακροπτερυγίου λ για διαφορετικές τιμές της γωνίας βήματος β [35].

Στο Σχ. 2.3 φαίνονται οι καμπύλες C_p - λ με παράμετρο την γωνία βήματος β . Η Α/Γ που μοντελοποιήθηκε στην παρούσα εργασία έχει παραμέτρους που παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά της Α/Γ [35]

Χαρακτηριστικά Α/Γ	Τιμή
Διάμετρος δρομέα	75 m
Ταχύτητα δρομέα	9-21 RPM
Ονομαστική ισχύς	2 MW
Ονομαστική ταχύτητα ανέμου	12 m/s
Ταχύτητα ανέμου εισόδου (cut in)	3.5 m/s
Ταχύτητα ανέμου αποκοπής (cut out)	25 m/s

Για $\beta=0$, ο αεροδυναμικός συντελεστής γίνεται μέγιστος όταν η παράγωγος της σχέσης (2.6) είναι 0. Έτσι προκύπτει μια εξίσωση με μόνο άγνωστο το λόγο λ . Η τιμή του μετά από τη λύση αυτής της εξίσωσης προκύπτει :

$$\lambda_{opt} = 6.3250$$

Οπότε από τις σχέσεις (2.6), (2.7) προκύπτει ότι :

$$C_p(\lambda_{opt}, 0) = 0.4382 \Rightarrow C_{p,max} = 0.4382$$

2.4 Ρυθμιστής Γωνίας Βήματος Πτερυγίων (Pitch Controller)

Οι Α/Γ που διαθέτουν ρυθμιστή γωνίας βήματος έχουν πτερύγια τα οποία έχουν την δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από τον άξονά τους. Στόχος αυτού του σχεδιασμού είναι να διατηρείται η αεροδυναμική ισχύς και η ταχύτητα περιστροφής σε μια μέγιστη τιμή, όταν η ταχύτητα ανέμου έχει τιμές μεγαλύτερες της ονομαστικής.

Η γωνία βήματος β την οποία πρέπει να έχουν τα πτερύγια της Α/Γ ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τη σχέση της αεροδυναμικής ισχύος. Συγκεκριμένα, όταν η ταχύτητα ανέμου είναι μικρότερη της ονομαστικής τότε ο ρυθμιστής γωνίας βήματος δεν χρειάζεται να δράσει ($\beta = 0^\circ$) διότι έτσι και αλλιώς η μέγιστη αεροδυναμική ισχύς που μπορεί να εξαχθεί από τον άνεμο θα είναι μικρότερη της ονομαστικής. Για μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου θα πρέπει να βρεθεί εκείνη η γωνία β που διατηρεί την αεροδυναμική ισχύ στην ονομαστική της τιμή.

Στην πραγματικότητα ο ρυθμιστής γωνίας βήματος χρησιμοποιεί έναν αναλογικό-ολοκληρωτικό ελεγκτή ο οποίος στην είσοδό του δέχεται το σφάλμα μεταξύ μετρούμενης της ταχύτητας περιστροφής της ανεμογεννήτριας και της μέγιστης επιτρεπόμενης τιμής της. Όταν το σφάλμα είναι αρνητικό τότε ο ελεγκτής δίνει μηδενική γωνία αναφοράς. Όταν το σφάλμα είναι θετικό ο ελεγκτής θα διαμορφώσει τέτοια γωνία βήματος ώστε οι στροφές της ανεμογεννήτριας να επανέλθουν στις ονομαστικές. Κατά αυτό τον τρόπο η εισερχόμενη αεροδυναμική ισχύς θα ρυθμιστεί στην ονομαστική ηλεκτρική ισχύ της γεννήτριας. Παρακάτω θα υπολογιστεί

θεωρητικά ποια θα είναι η γωνία βήματος που θα διαμορφώσει ο ρυθμιστής στην μόνιμη κατάσταση μέσω της προαναφερθείσας τεχνικής.

Χρησιμοποιώντας τα χαρακτηριστικά του Πίνακα 2.1, για βέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή $C_{p,opt}$ και ονομαστική ταχύτητα ανέμου (12 m/s) η παραγόμενη μηχανική ισχύς είναι ίση με 2.049 MW. Για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής η ταχύτητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας διατηρείται σταθερή και ίση με:

$$N_{R,nom} = 18\Sigma\Lambda\Lambda$$

Ο λόγος ταχύτητας περιστροφής του ακροπτερυγίου προς την ταχύτητα ανέμου δίνεται τότε από τη σχέση (2.4):

$$\lambda = \frac{R\omega_{R,nom}}{V_w}$$

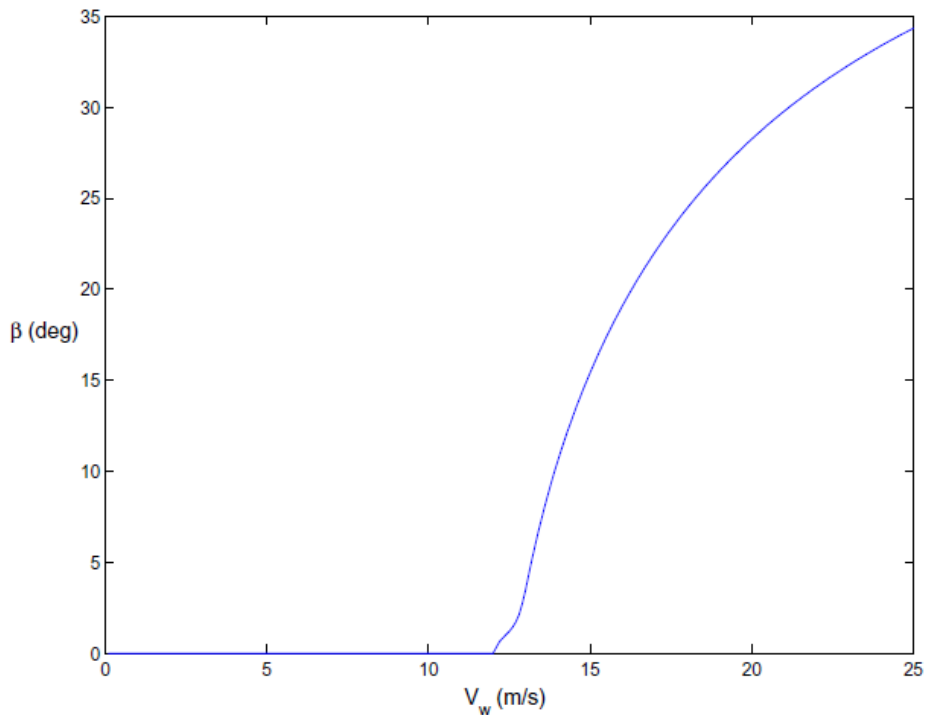
Οπότε αντικαθιστώντας τις τιμές των παραμέτρων προκύπτει :

$$\lambda = \frac{70.69}{V_w} \quad (2.8)$$

Για να εξασφαλιστεί ότι η παραγόμενη μηχανική ισχύς διατηρείται ίση με την ονομαστική, η γωνία βήματος πρέπει να παίρνει τις κατάλληλες τιμές έτσι ώστε να ισχύει η (2.3). Αντικαθιστώντας τις τιμές των παραμέτρων στην (2.3) και μετά από πράξεις προκύπτει η παρακάτω μη γραμμική εξίσωση [36]:

$$V_w^3 \cdot C_p\left(\frac{70.69}{V_w}, \beta\right) = 742.04 \quad (2.9)$$

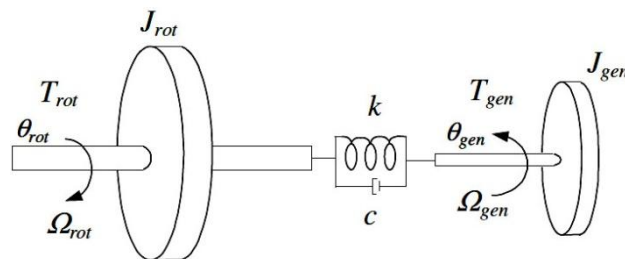
Με τη βοήθεια λογισμικού υπολογίζεται από τη σχέση (2.9) για κάθε ταχύτητα ανέμου, μεγαλύτερη της ονομαστικής $V_{w,nom}$, η απαιτούμενη τιμή της γωνίας β . Στο Σχ. 2.4 παρατίθεται γραφικά η σχέση μεταξύ της απαιτούμενης γωνία βήματος των πτερυγίων συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου :



Σχήμα 2.4 : Χαρακτηριστική ελέγχου της γωνίας βήματος β [35].

2.5 Σύστημα μετάδοσης της κίνησης

Οι ανεμογεννήτριες έχουν σχετικά ελαστικούς άξονες στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης [15]. Συνήθως για την μοντελοποίηση του συστήματος αυτού χρησιμοποιείται το λεγόμενο ισοδύναμο μοντέλο δύο μαζών, όπως φαίνεται και στο Σχ. 2.5. Η μία μάζα αναπαριστά την ροπή αδράνειας της πτερωτής J_{rot} , ενώ η δεύτερη μάζα αναπαριστά την ροπή αδράνειας της γεννήτριας J_{gen} και του μειωτήρα στροφών (εάν υπάρχει). Οι δύο αυτές μάζες συνδέονται μέσω ενός ελαστικού άξονα χαμηλών στροφών, ο οποίος χαρακτηρίζεται από μια σκληρότητα k και μια σταθερά απόσβεσης c [15].



Σχήμα 2.5 : Μοντέλο δύο μαζών για την μοντελοποίηση του συστήματος μετάδοσης της κίνησης [14]

Όπως φαίνεται και στο Σχ. 2.5, από το αριστερό άκρο (πτερωτή) ασκείται στον κινητήριο άξονα η αεροδυναμική ροπή T_{rot} , ενώ στο δεξί άκρο (γεννήτρια) ασκείται

στον κινητήριο άξονα η ηλεκτρική ροπή της γεννήτριας T_{gen} , αντίθετης φοράς από την αεροδυναμική. Λόγω λοιπόν της ελαστικότητας που εμφανίζει ο κινητήριος άξονας, η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας είναι επιρρεπής σε ταλαντώσεις όποτε το σύστημα διεγείρεται από μια μεταβολή της αεροδυναμικής ή της ηλεκτρικής ροπής.

Όταν το είδος γεννήτριας που χρησιμοποιείται είναι ασύγχρονη, τότε λόγω της υψηλής ταχύτητας περιστροφής της είναι αναγκαία η χρησιμοποίηση ενός κιβωτίου ταχυτήτων, το οποίο πολλαπλασιάζει τις χαμηλές στροφές της πτερωτής. Η χρήση λοιπόν του κιβωτίου ταχυτήτων επηρεάζει την σκληρότητα k και την απόσβεση c του ισοδύναμου μοντέλου δύο μαζών.

Όταν σαν γεννήτρια χρησιμοποιείται σύγχρονη πολυπολική, όπως στην παρούσα εργασία, τότε να μην μπορεί να απαλειφτεί το κιβώτιο ταχυτήτων, λόγω όμως του ότι η μετάδοση της κίνησης γίνεται πλέον σε χαμηλές στροφές, αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο κινητήριος άξονας να εμφανίζει και σε αυτή την περίπτωση μια ελαστικότητα. Σύμφωνα με την αναφορά [27], όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός πόλων της γεννήτριας, τόσο ελαστικότερος γίνεται ο κοινός πλέον άξονας.

Συνεπώς για να αποφευχθεί μια ταλαντωτική συμπεριφορά της διάταξης που θα μελετηθεί στην παρούσα εργασία, πρέπει να εφαρμοστεί μια κατάλληλη στρατηγική ελέγχου η οποία να αποσβένει τις προκαλούμενες ταλαντώσεις στην ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας, και άρα στην ενεργό ισχύ που εγχέεται στο δίκτυο.

Η απόσβεση των στρεπτικών ταλαντώσεων μιας σύγχρονης γεννήτριας με τύλιγμα διέγερσης επιτυγχάνεται με την χρήση ενός σταθεροποιητή (power system stabilizer) [62]. Η βασική λειτουργία του είναι να δίνει ένα επιπρόσθετο σήμα στον ελεγκτή που ρυθμίζει την διέγερση της μηχανής έτσι ώστε να προκύπτει μια συνιστώσα ηλεκτρικής ροπής η οποία να είναι σε φάση με την μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας της γεννήτριας. Βέβαια ο σταθεροποιητής θα πρέπει να δρα στην συχνότητα των ταλαντώσεων που προκαλούνται λόγω της ελαστικότητας του κινητήριου άξονα. Η συχνότητα αυτή λοιπόν θα πρέπει να εκτιμηθεί από πριν. Έτσι με μια αύξηση της γωνιακής ταχύτητας θα πρέπει να προκαλείται ταυτόχρονη αύξηση στην ηλεκτρική ροπή της γεννήτριας, με αποτέλεσμα να αναιρείται η προηγούμενη αύξηση. Με άλλα λόγια η χρήση του σταθεροποιητή θα προκαλεί μια καθαρά θετική ροπή απόσβεσης στην συχνότητα των ταλαντώσεων που οφείλονται στον κινητήριο άξονα.

Παρόμοια στρατηγική θα πρέπει να εφαρμοστεί όταν η σύγχρονη γεννήτρια που χρησιμοποιείται είναι μονίμων μαγνητών. Σε αυτή την περίπτωση μια συνήθης τεχνική είναι η θετική ροπή απόσβεσης να προκαλείται από ένα επιπρόσθετο σήμα που θα δίνεται στον DC/AC μετατροπέα στην πλευρά της γεννήτριας [15].

2.6 Αναπαράσταση μεγεθών μέσω χρονομεταβλητών φασιθετών (phasors)

2.6.1 Φασιθέτες

Η ανάλυση μεγεθών τα οποία μεταβάλλονται αρμονικά συναρτήσει του χρόνου (όπως στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας) γίνεται ευκολότερη με την χρήση των στρεφόμενων διανυσμάτων, τα οποία ονομάζονται και φασιθέτες (phasors).

Έστω ένα μέγεθος $v(t)$ το οποίο περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση :

$$v(t) = \sqrt{2}v_{rms} \cos \omega t \quad (2.10)$$

Όπου v_{rms} : η ενεργός τιμή του μεγέθους αυτού

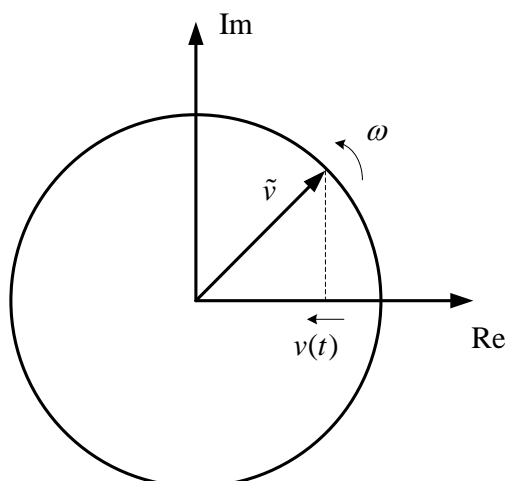
ω : η γωνιακή συχνότητα με την οποία μεταβάλλεται το μέγεθος αυτό

Το παραπάνω μέγεθος μπορεί εναλλακτικά να αναπαρασταθεί από ένα διάνυσμα \tilde{v} σταθερού μέτρου, το οποίο επιλέγεται να είναι ίσο με τη ενεργό τιμή, και το οποίο διάνυσμα στρέφεται με την κυκλική συχνότητα ω . Στο Σχ. 2.6 φαίνεται η αντιστοιχία του φασιθέτη με την τιμή του πραγματικού μεγέθους. Κάθε στιγμή η προβολή του διανύσματος στον άξονα των πραγματικών επί τον αριθμό $\sqrt{2}$, μας δίνει την τιμή του πραγματικού μεγέθους.

Το διάνυσμα \tilde{v} μαθηματικά μπορεί να περιγραφεί ως εξής :

$$\tilde{v} = v_{rms} e^{j\theta_v} \quad (2.11)$$

Όπου θ_v είναι η αρχική φάση του εξεταζόμενου μεγέθους. Εδώ είναι $\theta_v=0$. Έστω ότι το προηγούμενο μέγεθος περιγράφει την τάση σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα.



Σχήμα 2.6 : Αντιστοιχία μεταξύ στρεφόμενου διανύσματος και πραγματικού μεγέθους $v(t)$

Αντίστοιχα, το ρεύμα $i(t)$ με αναφορά την τάση (σχέση 2.10) είναι της μορφής :

$$i(t) = \sqrt{2}i_{rms} \cos(\omega t - \varphi) \quad (2.12)$$

Όπου i_{rms} : η ενεργός τιμή του μεγέθους αυτού

ω : η γωνιακή συχνότητα με την οποία μεταβάλλεται το μέγεθος αυτό

φ : η αρχική φάση του μεγέθους αυτού

Με την χρήση φασιθετών το παραπάνω μέγεθος εκφράζεται ως :

$$\tilde{i} = i_{rms} e^{-j\varphi} \quad (2.13)$$

Δηλαδή τα δύο παραπάνω μεγέθη αναπαρίστανται σαν δύο στρεφόμενα διανύσματα με σταθερή διαφορά φάσης, ίση με φ .

2.6.2 Μετασχηματισμός abc-dq0

Η χρησιμότητα του συγκεκριμένου μετασχηματισμού έγκειται στην σημαντική απλοποίηση της ανάλυσης των εξεταζόμενων μεγεθών (τάση, ρεύμα, κλπ) σε τριφασικά συστήματα. Σε συνθήκες συμμετρίας οποιοδήποτε μέγεθος σε κάθε φάση έχει την ακόλουθη μορφή :

$$f_a = \sqrt{2}F \cos(\omega_e t + \varphi) \quad (2.14)$$

$$f_b = \sqrt{2}F \cos(\omega_e t + \varphi - 2\pi/3) \quad (2.15)$$

$$f_c = \sqrt{2}F \cos(\omega_e t + \varphi + 2\pi/3) \quad (2.16)$$

Όπου F : η rms τιμή των τριών μεγεθών
 ω : η γωνιακή συχνότητα με την οποία μεταβάλλονται τα τρία μεγέθη
 φ : η αρχική φάση

Τα παραπάνω μεγέθη μπορούν να αναλυθούν σε ένα ακίνητο πλαίσιο αναφοράς abc, του οποίου οι τρεις άξονες έχουν μεταξύ τους διαφορά φάσης 120 μοιρών. Στο Σχ. 2.7 φαίνεται και ο φασιθέτης για το μέγεθος f_a . Προφανώς ισχύει :

$$f_a = \text{Re}\{\sqrt{2}F e^{j\theta(t)}\} \quad (2.17)$$

Όπου $\theta(t) = \omega_e t + \varphi$. Όπως μπορούμε να συμπεράνουμε από το Σχ. 2.7, αν θεωρήσουμε ένα πλαίσιο dq0 το οποίο στρέφεται με την γωνιακή ταχύτητα ω_e , τότε ως προς το πλαίσιο αυτό ο φασιθέτης είναι ακίνητος, οπότε οι συνιστώσες του στους άξονες d και q έχουν τιμές χρονικά αμετάβλητες. Συνιστώσα στον άξονα 0 υπάρχει μόνο σε συνθήκες ασυμμετρίας του δικτύου.

Το παραπάνω επιτυγχάνεται μέσω του μετασχηματισμού abc→dq0 ο οποίος έχει την ακόλουθη μορφή :

$$\begin{pmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{pmatrix} = T_{dq0}(\theta_T) \begin{pmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

Όπου :

$$T_{dq0}(\theta_T) = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos \theta_T & \cos(\theta_T - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_T + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta_T & -\sin(\theta_T - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_T + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

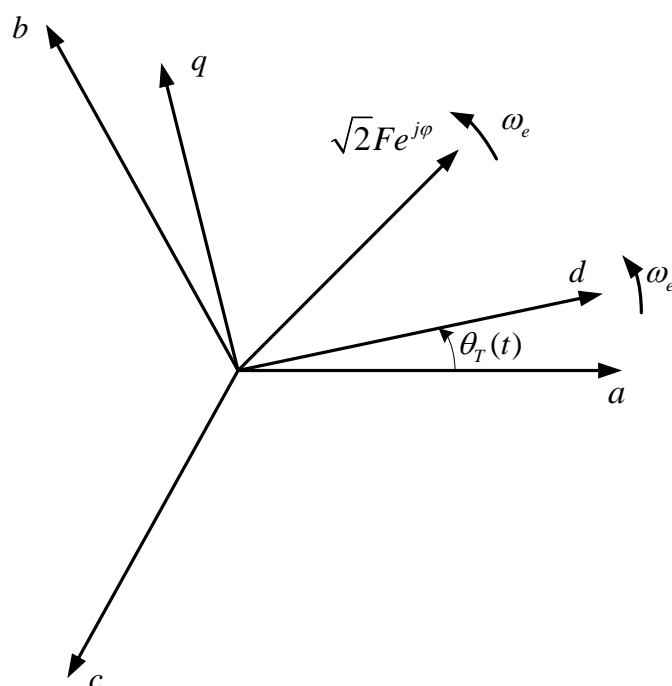
Όπου $\theta_T(t) = \omega_e t + \theta_0$. Ως θ_0 συμβολίζεται η αρχική γωνία που σχηματίζει ο άξονας d με τον άξονα a. Εδώ θεωρείται ότι $\theta_0 = 0$.

Αντίστροφα, με γνωστές τις τιμές στο πλαίσιο dq0, οι τιμές στο πλαίσιο abc υπολογίζονται βάσει του αντίστροφου μετασχηματισμού $dq0 \rightarrow abc$, ο οποίος είναι ο ακόλουθος :

$$\begin{pmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{pmatrix} = \Gamma_{dq0}^{-1}(\theta_T) \begin{pmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

όπου :

$$\Gamma_{dq0}^{-1}(\theta_T) = \begin{pmatrix} \cos \theta_T & -\sin \theta_T & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_T - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_T - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_T + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_T + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (2.21)$$



Σχήμα 2.7 : Ακίνητο πλαίσιο abc, στρεφόμενο πλαίσιο dq και ο φασιθέτης για το μέγεθος της φάσης a.

Αν για παράδειγμα εφαρμόσουμε τον μετασχηματισμό αυτό στις μεταβλητές f_a , f_b , f_c , τότε οι d,q συνιστώσες προκύπτουν ως εξής :

$$f_d = \frac{2\sqrt{2}F}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_T & \cos(\theta_T - 2\pi/3) & \cos(\theta_T + 2\pi/3) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix}$$

Εφαρμόζοντας τις ιδιότητες :

$$\cos(\theta - 2\pi/3) = \frac{-\cos\theta + \sqrt{3}\sin\theta}{2} \quad (2.22)$$

$$\cos(\theta + 2\pi/3) = \frac{-\cos\theta - \sqrt{3}\sin\theta}{2} \quad (2.23)$$

και αντικαθιστώντας στην προηγούμενη σχέση μετά από πράξεις προκύπτει :

$$f_d = \frac{2\sqrt{2}F}{3} \cdot \frac{3}{2} (\cos\theta_T \cos\theta + \sin\theta_T \sin\theta) = \sqrt{2}F \cos(\theta_T - \theta) = \sqrt{2}F \cos\varphi \quad (2.24)$$

Όμοια για την q συνιστώσα ο μετασχηματισμός δίνει :

$$f_q = \frac{2\sqrt{2}F}{3} \begin{bmatrix} -\sin\theta_T & -\sin(\theta_T - 2\pi/3) & -\sin(\theta_T + 2\pi/3) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix}$$

Απ'όπου με χρήση των σχέσεων (2.22),(2.23) προκύπτει :

$$f_q = -\sqrt{2}F \sin(\theta_T - \theta) = \sqrt{2}F \sin\varphi \quad (2.25)$$

Από τα παραπάνω επιβεβαιώνεται πως οι d,q συνιστώσες εξαρτώνται μόνο από την αρχική φάση φ , η οποία συμπίπτει με την διαφορά φάσης πλαισίου dq από τον φασιθέτη της φάσης a. Έτσι οι συνιστώσες αυτές έχουν τιμές χρονικά ανεξάρτητες.

Παρακάτω θα υπολογιστεί η ισχύς εκφρασμένη σε dq συνιστώσες με βάση την σχέση που μας δίνει την ισχύ στο abc πλαίσιο. Έστω \tilde{V}_{dq} το διάνυσμα της τάσης που προκύπτει από την σύνθεση των dq συνιστωσών, και \tilde{I}_{dq} το διάνυσμα του ρεύματος αντίστοιχα.

Τα διανύσματα της τάσης και του ρεύματος εκφράζονται στο πλαίσιο dq ως εξής :

$$\begin{aligned} \tilde{V}_{dq} &= V_d + jV_q \\ \tilde{I}_{dq} &= I_d + jI_q \end{aligned}$$

Τότε για την φαινόμενη ισχύ ισχύει ότι :

$$S = 3 \frac{\tilde{V}_{dq}}{\sqrt{2}} \frac{\tilde{I}_{dq}^*}{\sqrt{2}} = \frac{3}{2} \tilde{V}_{dq} \tilde{I}_{dq}^* = \frac{3}{2} (V_d I_d + V_q I_q) + j \frac{3}{2} (V_q I_d - V_d I_q) \quad (2.26)$$

Στο abc πλαίσιο ως βασική τάση $V_{B(abc)}$ επιλέγεται η ενεργός τιμή της φασικής τάσης και ως βασική τιμή για το ρεύμα $I_{B(abc)}$ η ενεργός τιμή του ρεύματος γραμμής. Επειδή στο dq πλαίσιο το διάνυσμα που προκύπτει έχει μέτρο ίσο με το πλάτος του εξεταζόμενου μεγέθους τότε σαν βασικές τιμές επιλέγονται τα πλάτη της φασικής τάσης και ρεύματος γραμμής αντίστοιχα. Δηλαδή ισχύει :

$$V_{B(dq)} = \sqrt{2}V_{B(abc)} \quad (2.27)$$

$$I_{B(dq)} = \sqrt{2}I_{B(abc)} \quad (2.28)$$

Οπότε η βασική ισχύς προκύπτει από την σχέση :

$$S_B = 3V_{B(abc)}I_{B(abc)} = \frac{3}{2}V_{B(dq)}I_{B(dq)} \quad (2.29)$$

Οπότε στο ανά μονάδα σύστημα η φαινόμενη ισχύς στο dq πλαίσιο είναι η ακόλουθη :

$$S_{pu} = \frac{\frac{3}{2}\tilde{V}_{dq}\tilde{I}_{dq}^*}{\frac{3}{2}V_{B(dq)}I_{B(dq)}} = \tilde{v}_{dq}\tilde{i}_{dq}^* = v_d i_d + v_q i_q + j(v_q i_d - v_d i_q) \quad (2.30)$$

Έστω ότι σε ένα σημείο του δικτύου η τάση είναι \tilde{v}_{dq} και η φαινόμενη ισχύς $\tilde{S} = P + jQ$ σε ανά μονάδα τιμές. Παρακάτω θα υπολογιστούν οι dq συνιστώσες του ρεύματος συναρτήσει των προηγούμενων μεγεθών που θεωρούνται γνωστά. Ισχύει :

$$S_{pu} = \tilde{v}_{dq}\tilde{i}_{dq}^* \quad \text{ή}$$

$$\tilde{i}_{dq} = \frac{S^*}{\tilde{v}_{dq}^*} = \frac{P - jQ}{v_d - jv_q}$$

Από την παραπάνω σχέση μετά από πράξεις προκύπτει :

$$i_d = \frac{Pv_d + Qv_q}{v_d^2 + v_q^2} \quad (2.31)$$

$$i_q = \frac{Pv_q - Qv_d}{v_d^2 + v_q^2} \quad (2.32)$$

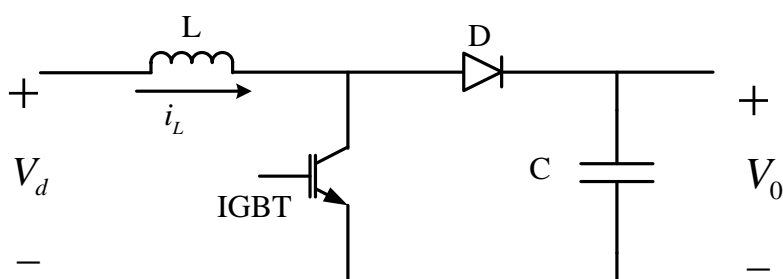
2.7 Σύγχρονη γεννήτρια με τύλιγμα διέγερσης

Θεωρείται στην ενότητα αυτή μια πολυπολική σύγχρονη γεννήτρια με τύλιγμα διέγερσης, η οποία χρησιμοποιείται αρκετά συχνά σε ανεμογεννήτριες με πλήρη μετατροπέα. Στην πλευρά της τοποθετείται ένας τριφασικός ανορθωτής διόδων σε συνδυασμό με έναν DC/DC μετατροπέα ανύψωσης. Η σύνδεση του τριφασικού ανορθωτή στην έξοδο της γεννήτριας, της επιβάλλει να λειτουργεί υπό μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Στην πραγματικότητα τα φαινόμενα μεταγωγής του ρεύματος εισάγουν μια φασική μετατόπιση (μικρή υστέρηση της κυματομορφής του ρεύματος ως προς αυτή της τάσης), δηλαδή ο ανορθωτής χαρακτηρίζεται από την κατανάλωση μικρής ποσότητας αέργου ισχύος. Επιπλέον, η τάση εξόδου της γεννήτριας δεν επιβάλλεται από το σύστημα που αυτή συνδέεται, αλλά προκύπτει από την εσωτερική ΗΕΔ και τις εμφανιζόμενες πτώσεις τάσης.

Ελέγχοντας το ρεύμα εξόδου της γεννήτριας, μπορούμε να ελέγξουμε την ηλεκτρική ροπή της και συνεπώς τις στροφές της. Ο έλεγχος του ρεύματος γίνεται μέσω του ρεύματος εξόδου του ανορθωτή, το οποίο είναι και το ρεύμα εισόδου στον DC/DC μετατροπέα.

Κατάλληλη στρατηγική ελέγχου χρησιμοποιείται στο σύστημα διέγερσης, η οποία συνήθως υλοποιείται συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής της γεννήτριας [24]. Γενικά, υψηλές τιμές της τάσης διέγερσης αυξάνουν την μέγιστη ηλεκτρική ροπή που μπορεί να παραχθεί από την γεννήτρια αλλά επίσης οδηγούν και σε υψηλές απώλειες σιδήρου. Έτσι, για λειτουργία σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, και συνεπώς σε χαμηλές ταχύτητες περιστροφής, η τάση διέγερσης μπορεί να μειωθεί, μιας και οι απαιτήσεις για παραγωγή ηλεκτρικής ροπής από την γεννήτρια είναι μειωμένες. Από την άλλη πλευρά, για υψηλές ταχύτητες ανέμου, χρειάζονται υψηλές τιμές της τάσης διέγερσης, έτσι ώστε η γεννήτρια να μπορεί να παράγει την πλήρη ηλεκτρική της ροπή.

2.8 DC/DC μετατροπέας ανύψωσης (boost converter)



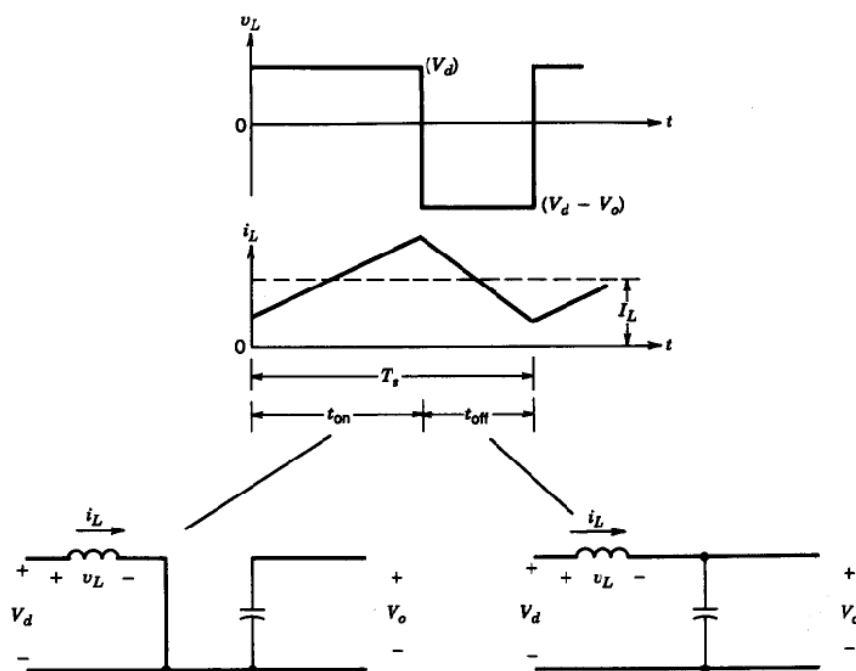
Σχήμα 2.8 : Κύκλωμα ισχύος ενός μετατροπέα ανύψωσης

Ο DC/DC μετατροπέας ανύψωσης αποτελείται από ένα πηνίο L , ένα διακοπτικό στοιχείο (IGBT), μια δίοδο και έναν πυκνωτή C . Ο μετατροπέας αυτός μπορεί να ρυθμιστεί έτσι ώστε είτε να ελέγχει την ροπή της Α/Γ ρυθμίζοντάς το dc ρεύμα εξόδου του ανορθωτή, είτε να διατηρεί την dc τάση στην έξοδο του σταθερή.

Μια απλή τεχνική για τον έλεγχο της ροπής είναι ο έλεγχος υστέρησης ρεύματος. Συγκεκριμένα ανάλογα με την επιθυμητή ροπή που θέλουμε να αναπτύξει η ανεμογεννήτρια διαμορφώνεται ένα κατάλληλο σήμα αναφοράς για το ρεύμα, έστω

I_{dcref} . Επίσης μετράται και το ρεύμα i_L που διαρρέει το πηνίο. Έτσι κάθε στιγμή υπολογίζεται το σφάλμα $\Delta I = I_{dcref} - i_L$. Έτσι αν το σφάλμα ΔI είναι μεγαλύτερο από μια τιμή κατωφλίου ($\Delta I > k$) τότε δίνεται κατάλληλος παλμός να κλείσει το IGBT (ON). Κλείνοντας όμως τον διακόπτη στην ουσία βραχυκυκλώνεται το πηνίο L και ο ρυθμός μεταβολής του ρεύματός του δίνεται από την σχέση :

$$V_d = L \frac{di_L}{dt} \quad \text{ή} \quad \frac{di_L}{dt} = \frac{V_d}{L} \quad (2.33)$$



Σχήμα 2.9 : Κυματομορφές τάσης και έντασης του πηνίου του μετατροπέα στις δύο καταστάσεις λειτουργίας του IGBT και το αντίστοιχο κύκλωμα που ισχύει κάθε φορά [48]

Επειδή η τιμή της αυτεπαγωγής του πηνίου που χρησιμοποιείται είναι της τάξης των mH και η τάση V_d είναι συνεχής, είναι προφανές πως ο ρυθμός αύξησης του ρεύματος είναι πολύ μεγάλος με αποτέλεσμα να φτάσει πολύ γρήγορα την τιμή I_{dcref} . Στην συνέχεια όταν το ρεύμα του πηνίου υπερβεί το ρεύμα αναφοράς πέρα από μια τιμή κατωφλίου ($\Delta I < -k$), τότε δίνεται κατάλληλος παλμός να ανοίξει το IGBT (OFF). Σε αυτή τη φάση στην πλευρά του πηνίου όπου είχε γίνει βραχυκύκλωμα τώρα εφαρμόζεται η υψηλή dc τάση του πυκνωτή με αποτέλεσμα τώρα το ρεύμα του πηνίου να μειώνεται με ρυθμό που δίνεται από την σχέση :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_d - V_c}{L} \quad (2.34)$$

Στην συνέχεια το ρεύμα ξαναγίνεται ίσο με την τιμή αναφοράς και ο κύκλος αυτός επαναλαμβάνεται. Συνεπώς το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο ακολουθεί με εξαιρετική ακρίβεια το ρεύμα αναφοράς, με μία μικρή κυμάτωση της τάξης των kHz. Προφανώς η κυμάτωση αυτή εξαρτάται από την τιμή κατωφλίου k που θα επιλεγεί, καθώς επίσης και από την τιμή της αυτεπαγωγής του πηνίου. Η τιμή κατωφλίου, καθώς επίσης και η αυτεπαγωγή, δεν θα πρέπει να είναι πολύ μεγάλες για να μην έχουμε

αισθητή κυμάτωση του ρεύματος, αλλά ούτε θα πρέπει να είναι πολύ μικρές και να έχουμε έτσι υψηλή διακοπτική συχνότητα και άρα υψηλές απώλειες στον dc/dc μετατροπέα. Επίσης με τον έλεγχο υστέρησης δεν είναι ελεγχόμενη η διακοπτική συχνότητα του, γιατί αυτό εξαρτάται πλήρως από την τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του πηνίου, για μια δεδομένη τιμή αυτεπαγωγής L .

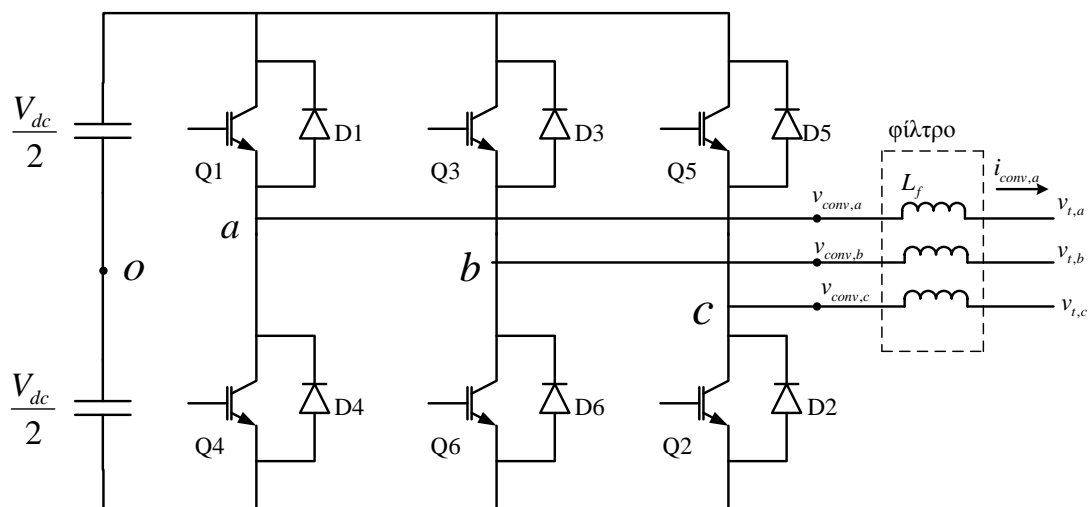
Κατάλληλη στρατηγική μπορεί να εφαρμοστεί και όταν ο μετατροπέας αυτός χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της τάσης εξόδου του. Εδώ το σήμα αναφοράς θα διαμορφώνεται από το σφάλμα μεταξύ της μετρούμενης dc τάσης εξόδου και της τάσης αναφοράς. Αν η dc τάση εξόδου μειωθεί κάτω από την τάση αναφοράς τότε θα πρέπει να αυξηθεί η ισχύς εισόδου έτσι ώστε η dc τάση να αυξηθεί ξανά. Και εδώ η dc τάση ακολουθεί την τάση αναφοράς με μια μικρή κυμάτωση και μάλιστα όσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα C τόσο μικρότερη είναι και η κυμάτωση.

Μια τεχνική έλεγχου που δεν έχει το μειονέκτημα του ελέγχου υστέρησης (μη ελεγχόμενη διακοπτική συχνότητα) είναι η χρησιμοποίηση φέροντος σήματος για την δημιουργία των παλμών οδήγησης του μετατροπέα. Συγκεκριμένα το προκύπτον σφάλμα της μετρούμενης τιμής από την τιμή αναφοράς συγκρίνεται με μια τριγωνική κυματομορφή υψηλής συχνότητας, και αν το σφάλμα είναι μεγαλύτερο από την τιμή του φέροντος εκείνη τη στιγμή δίνεται σήμα στο διακοπτικό στοιχείο να κλείσει (ON). Αν το σφάλμα είναι μικρότερο από την τιμή του φέροντος εκείνη την στιγμή το διακοπτικό στοιχείο ανοίγει (OFF). Έτσι με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται η τυχαία μεταβαλλόμενη διακοπτική συχνότητα στον μετατροπέα.

Συμπερασματικά λοιπόν μπορούμε να πούμε πως η απόκριση του μετατροπέα αυτού είναι πολύ γρήγορη και η ρύθμιση των μετρούμενων μεγεθών στις τιμές αναφοράς γίνεται σε χρόνο μικρότερο της βασικής περιόδου του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στο οποίο είναι συνδεδεμένη η συνολική διάταξη. Συνεπώς η απόκρισή του δεν επηρεάζει αισθητά την απόκριση της ολικής διάταξης στην χρονική κλίμακα στην οποία πρόκειται να μελετηθεί η συμπεριφορά της.

2.9 DC/AC μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου

2.9.1 Γενικά περί τεχνικών ελέγχου μετατροπέων



Σχήμα 2.10 : Τοπολογία DC/AC μετατροπέα τύπου πηγής τάσης

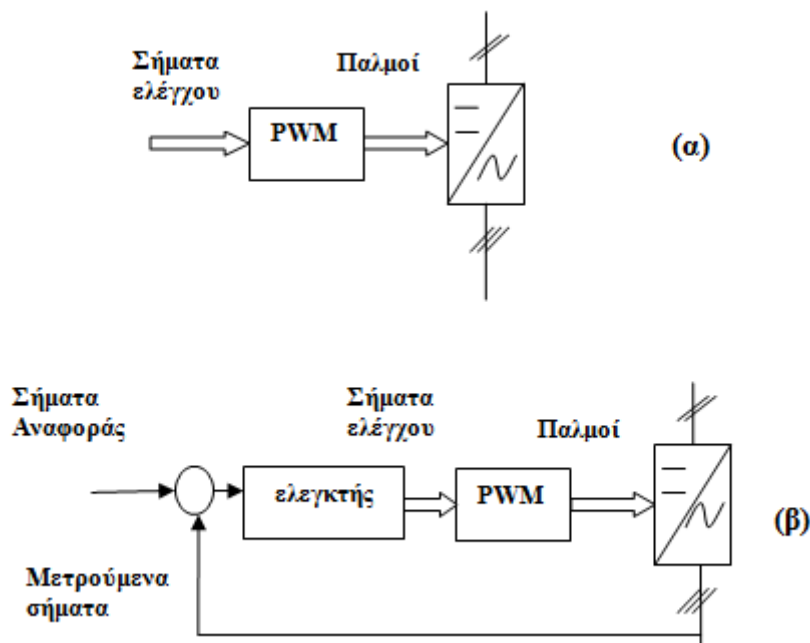
Στο Σχ. 2.10 φαίνεται ο αντιστροφέας τύπου πηγής τάσης. Στέλνοντας κατάλληλους παλμούς οδήγησης στα διακοπτικά στοιχεία έχουμε τη δυνατότητα να εφαρμόσουμε την dc τάση V_{dc} σε κατάλληλα χρονικά διαστήματα στην έξοδο του μετατροπέα. Ως αποτέλεσμα μπορούμε να ρυθμίσουμε την συχνότητα και την ενεργό τιμή της τάσης στην έξοδο του DC/AC αντιστροφέα, αλλάζοντας με κατάλληλη στρατηγική τους παλμούς οδήγησης των διακοπτικών στοιχείων.

Στην έξοδο του αντιστροφέα τοποθετείται συνήθως ένα φίλτρο L για την εξομάλυνση του ρεύματος εξόδου του. Επίσης μετρώντας την τάση στην έξοδο του φίλτρου διαμορφώνονται οι επιθυμητές εγχύσεις ενεργού και αέργου ισχύος.

Οι παλμοί οδήγησης των διακοπτικών στοιχείων προέρχονται είτε από ένα σύστημα ανοικτού βρόχου, δηλαδή από κάποια σήματα ελέγχου, είτε από ένα σύστημα κλειστού βρόχου, δηλαδή από ένα σύστημα το οποίο χρησιμοποιεί την έξοδο του αντιστροφέα για να παράγει τα σήματα ελέγχου.

Υπάρχουν μέθοδοι διαμόρφωσης στις οποίες χρησιμοποιείται ένα φέρον σήμα υψηλής συχνότητας f_c , και άλλες μέθοδοι στις οποίες η διαμόρφωση γίνεται χωρίς φέρον σήμα. Οι μέθοδοι PWM με φέρον σήμα είναι οι πιο συνηθισμένες και έχουν το κοινό χαρακτηριστικό ότι οι ημιαγωγικοί διακόπτες του μετατροπέα αλλάζουν κατάσταση αγωγής ανάλογα με το αποτέλεσμα της σύγκρισης ενός σήματος αναφοράς με το φέρον σήμα συχνότητας f_c , με το οποίο τροφοδοτείται το κύκλωμα παλμοδότησης.

Επομένως, δεδομένου του φέροντος σήματος, είναι γνωστή η διακοπτική συχνότητα που πρέπει να έχουν οι ημιαγωγικοί διακόπτες. Η χρήση του φέροντος σήματος πλεονεκτεί καθώς μετατοπίζει την αρμονική παραμόρφωση του παραγόμενου σήματος στη συχνότητα του φέροντος και στα πολλαπλάσιά της, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται, οικονομία στα φίλτρα. Έτσι λοιπόν, ανάλογα με το επίπεδο της τάσης και του ρεύματος, καθώς και την f_c , επιλέγονται οι καταλληλότεροι ημιαγωγικοί διακόπτες.



Σχήμα 2.11 Μέθοδος (α) ανοικτού και (β) κλειστού βρόχου

Η πιο χαρακτηριστική περίπτωση διαμόρφωσης είναι η ημιτονοειδής διαμόρφωση του εύρους των παλμών (SPWM). Στην τεχνική αυτή χρησιμοποιούνται τρεις ημιτονοειδείς κυματομορφές αναφοράς, μία για κάθε ημιγέφυρα, και μία τριγωνική κυματομορφή φορέα. Το εκάστοτε σήμα αναφοράς, το οποίο είναι ημίτονο με συχνότητα ίδια με τη συχνότητα της τάσης που θέλουμε να παράγουμε, συγκρίνεται με το φέρον σήμα, το οποίο είναι τριγωνικό, και από το αποτέλεσμα της σύγκρισης καθορίζεται το εύρος των παλμών.

Στην ημιτονική διαμόρφωση, όπως και σε κάθε διαμόρφωση, παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον τα ακόλουθα μεγέθη:

(i) Ο λόγος του πλάτους του σήματος ελέγχου προς το πλάτος του φέροντος σήματος

$$M_f = \frac{A_r}{A_c} \quad (2.35)$$

Το μέγεθος αυτό ονομάζεται «συντελεστής διαμόρφωσης» και καθορίζει το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου του αντιστροφέα. Ανάλογα με την τιμή του συντελεστή διαμόρφωσης, διακρίνουμε τις ακόλουθες περιπτώσεις:

- αν $M_f \in [0,1]$, τότε βρισκόμαστε στη γραμμική περιοχή και έχουμε λειτουργία SPWM.
- αν $M_f \in (1,3]$, τότε έχουμε υπερδιαμόρφωση, δηλαδή μια ενδιάμεση κατάσταση λειτουργίας μεταξύ SPWM και τετραγωνικού παλμού. Σε αυτή την περιοχή λειτουργίας, το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου δεν αυξάνεται γραμμικά με το M_f . Η σχέση μεταξύ του πλάτους της θεμελιώδους συνιστώσας και του M_f εξαρτάται από το λόγο της συχνότητας του φέροντος σήματος προς τη συχνότητα του σήματος αναφοράς, ο οποίος ορίζεται στη συνέχεια (F_{nc}).
- αν $M_f > 3$, τότε έχουμε λειτουργία τετραγωνικού παλμού.

Ο συντελεστής διαμόρφωσης είναι πολύ σημαντικό μέγεθος, αφενός γιατί καθορίζει το πλάτος της φασικής τάσης του μετατροπέα, και αφετέρου γιατί διαχωρίζει τις προηγούμενες περιοχές λειτουργίας. Όταν λειτουργούμε τον τριφασικό μετατροπέα στη γραμμική περιοχή, η μέγιστη τιμή της τάσης που μπορούμε να πάρουμε είναι για $M_f = 1$. Το γεγονός αυτό καθορίζει ουσιαστικά την επιλογή της DC τάσης σύμφωνα με την γνωστή σχέση που τη συνδέει με το πλάτος της βασικής αρμονικής συνιστώσας της πολικής τάσης εξόδου του τριφασικού αντιστροφέα:

$$V_{1,rms} = \frac{\hat{V}_1}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{3}}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot V_{dc} \cdot M_f$$

Συνεπώς η μέγιστη ενεργός τιμή της πολικής τάσης προκύπτει :

$$V_{1,rms}^{MAX} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{V_{dc}}{2} \quad (2.36)$$

(ii) Ο λόγος της συχνότητας του φέροντος σήματος προς τη συχνότητα του σήματος ελέγχου:

$$F_{nc} = \frac{f_c}{f_r} \quad (2.37)$$

Το μέγεθος αυτό ονομάζεται «κανονικοποιημένη συχνότητα» φορέα και καθορίζει τις τάξεις των αρμονικών συνιστωσών της τάσης.

Η τιμή της κανονικοποιημένης συχνότητας φορέα πρέπει να επιλέγεται έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η αρμονική παραμόρφωση της τάσης. Πιο συγκεκριμένα, το F_{nc} πρέπει να είναι ακέραιος, δηλαδή η συχνότητα του φέροντος να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της συχνότητας αναφοράς. Η επιλογή αυτή διασφαλίζει ότι υπάρχει σταθερός αριθμός κύκλων του φέροντος σήματος μέσα σε κάθε κύκλο του σήματος αναφοράς. Αν τα δύο παραπάνω σήματα είναι επιπλέον και συγχρονισμένα, τότε αποκλείεται η εμφάνιση υφαρμονικών στην περιοχή 0-50 Hz (subharmonics) [52].

Ειδικά για τον τριφασικό μετατροπέα, πρέπει ακόμα το F_{nc} να είναι ακέραιος αριθμός περιττής τάξης, γιατί έτσι εξαλείφονται οι άρτιες αρμονικές. Τέλος, αν το F_{nc} είναι και πολλαπλάσιο του τρία, εξαλείφονται και οι αρμονικές της πολικής τάσης που έχουν τάξη F_{nc} και πολλαπλάσια αυτού [51]. Βέβαια, αν το F_{nc} επιλέξουμε να έχει μεγάλη τιμή, δεν είναι αναγκαίο να πληροί τις παραπάνω προϋποθέσεις, ενώ ακόμα δεν απαιτείται να υπάρχει συγχρονισμός φέροντος σήματος και σήματος ελέγχου.

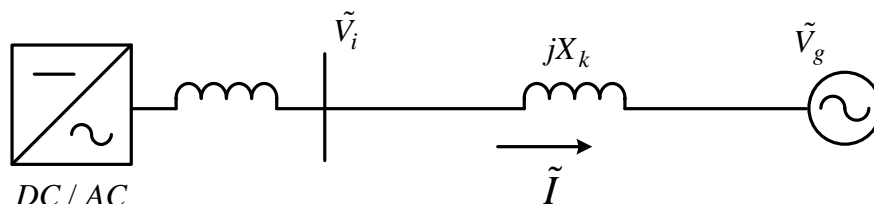
Οι τεχνικές PWM σε συνδυασμό με τις δυνατότητες των ημιαγωγικών διακοπών παρέχουν τη δυνατότητα αποδοτικού και γρήγορου ελέγχου της ηλεκτρικής ισχύος. Με τις τεχνικές PWM, μπορούμε να ελέγξουμε τη συχνότητα, το πλάτος της τάσης και του ρεύματος, καθώς επίσης και τον συντελεστή ισχύος, χωρητικό ή επαγωγικό. Με τους αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των παλμών, εξασφαλίζεται πολύ σημαντική μείωση του αρμονικού περιεχομένου των παραγόμενων τάσεων (μικρότερος δείκτης ολικής αρμονικής παραμόρφωσης, THD), ενώ οι αρμονικές της τάσης μετατοπίζονται σε υψηλές συχνότητες επιτρέποντας τη χρήση μικρότερων και οικονομικότερων φίλτρων. Η λειτουργία του μετατροπέα γίνεται, μάλιστα, με πολύ μεγάλο συντελεστή απόδοσης, διότι οι ημιαγωγοί διακόπτες άγουν για μικρό χρονικό διάστημα και οι απώλειες περιορίζονται.

Υπάρχουν ωστόσο και κάποια μειονεκτήματα των PWM μετατροπέων. Μπορεί οι απώλειες κατά την αγωγή των διακοπών σ' αυτούς τους μετατροπέες να είναι περιορισμένες, υπάρχουν όμως διακοπτικές απώλειες, οι οποίες είναι ανάλογες της διακοπτικής συχνότητας f_c . Επίσης, οι τάσεις που παράγονται σε υψηλές συχνότητες διαδίδονται κυματικά και προκαλούν παρενοχλήσεις [52]. Γι' αυτό το λόγο οι μετατροπέες κατασκευάζονται έτσι ώστε να πληρούν τις προδιαγραφές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC). Ένα ακόμη μειονέκτημα είναι ο ακουστικός θόρυβος που παράγεται κατά τη λειτουργία του μετατροπέα, ο οποίος αντιμετωπίζεται με την κατάλληλη επιλογή της διακοπτικής συχνότητας f_c , ώστε να βρίσκεται έξω από το ακουστικό φάσμα.

Σαν μειονεκτήματα μπορούμε ακόμα να θεωρήσουμε την αυξημένη πολυπλοκότητα και το υψηλό κόστος, τα οποία, βέβαια, αντισταθμίζονται από την πολύ καλή ποιότητα ισχύος και τον γρήγορο έλεγχο.

2.9.2 Ισχύς Τριφασικού DC/AC Μετατροπέα

Έστω \tilde{V}_i , \tilde{V}_g οι θεμελιώδεις φασικές τάσεις του αντιστροφέα (αμέσως μετά το φίλτρο L) και του δικτύου αντίστοιχα, και Z_k η σύνθετη αντίσταση που παρεμβάλλεται μεταξύ των δύο αυτών σημείων, όπως φαίνεται και στο Σχ. 2.12.



Σχήμα 2.12 : Μετατροπέας συνδεδεμένος στο δίκτυο

Το θεμελιώδες ρεύμα του μετατροπέα ικανοποιεί τη σχέση:

$$\begin{aligned}\tilde{V}_i &= \tilde{V}_g + \tilde{I}Z_k \quad \text{ή} \\ \tilde{I} &= \frac{\tilde{V}_i - \tilde{V}_g}{Z_k}\end{aligned}\quad (2.38)$$

Θεωρώντας μόνο τις θεμελιώδεις συνιστώσες των μεγεθών (ενεργές τιμές) και με άνυσμα αναφοράς τη θεμελιώδη φασική τάση του δικτύου \tilde{V}_g , η μιγαδική ισχύς που εγγέεται στο δίκτυο μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση:

$$S = P + jQ = 3V_g \tilde{I}^* \quad (2.39)$$

Από τη σχέση (2.38), όπου $Z_k = jX_k$ (Σχ. 2.12) το ρεύμα \tilde{I} υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned}\tilde{I}^* &= \left(\frac{\tilde{V}_i - \tilde{V}_g}{jX_k} \right)^* \quad \text{ή} \\ \tilde{I}^* &= \frac{V_i \sin \delta + j(V_i \cos \delta - V_g)}{X_k}\end{aligned}\quad (2.40)$$

Οπότε με αντικατάσταση στη σχέση (2.39) μπορούμε να προσδιορίσουμε την ενεργό και την άεργο ισχύ του αντιστροφέα:

$$S = P + jQ = 3V_g \frac{V_i \sin \delta + j(V_i \cos \delta - V_g)}{X_k}$$

Απ' όπου προκύπτει :

$$P = 3 \frac{V_g V_i \sin \delta}{X_k} \quad (2.41)$$

$$Q = 3 \frac{V_g (V_i \cos \delta - V_g)}{X_k} \quad (2.42)$$

Από την σχέση (2.42) συμπεραίνουμε ότι άεργος ισχύς παράγεται όταν $V_i \cos \delta - V_g > 0$ (χωρητικός Σ.Ι.), ενώ άεργος ισχύς καταναλώνεται όταν $V_i \cos \delta - V_g < 0$ (επαγωγικός Σ.Ι.). Σημειώνεται πως ειδικά για μικρές γωνίες δ , ο τύπος (2.42) απλουστεύεται περισσότερο, αφού στην περίπτωση αυτή θα ισχύει $\cos \delta \cong 1$, συνεπώς:

$$Q = 3 \frac{V_g (V_i - V_g)}{X_k} = 3 \frac{V_g \Delta V_k}{X_k} \quad (2.43)$$

Έτσι, παρατηρούμε τώρα ότι αν $\Delta V_k > 0$ τότε $Q > 0$, ενώ αν $\Delta V_k < 0$ τότε $Q < 0$, όπου ΔV_k η πτώση τάσης επί της αντίδρασης X_k . Από τα προαναφερθέντα γίνεται σαφές ότι η λειτουργία του αντιστροφέα δε διαφέρει καθόλου από τη λειτουργία σύγχρονης γεννήτριας.

2.9.3 Παράγοντες που καθορίζουν την επιλογή της τιμής της dc τάσης ενός τριφασικού DC/AC μετατροπέα

Καταρχάς η επιλογή της τιμής της dc τάσης του πυκνωτή εξαρτάται άμεσα από την μέγιστη ενεργό τιμή της πολικής τάσης που θέλουμε να αναπτύσσει ο μετατροπέας στην έξοδό του. Για παράδειγμα, η μέγιστη ενεργός τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας που μπορούμε να πάρουμε στην έξοδο του αντιστροφέα δίνεται από την σχέση (2.36). Έστω V_n η ονομαστική ενεργός τιμή της πολικής τάσης του δικτύου. Όπως φαίνεται από την σχέση (2.43) προκειμένου ο μετατροπέας να είναι σε θέση να παράγει άεργο ισχύ θα πρέπει $V_i > V_g$, δηλαδή :

$$\sqrt{3}V_i > \sqrt{3}V_g = V_n \quad (2.44)$$

Επειδή στην παράγραφο 2.9.2 τα μεγέθη V_i, V_g αντιστοιχούν στις φασικές τάσεις, γίνεται ο πολλαπλασιασμός τους στην (2.44) με $\sqrt{3}$ για να προκύψουν οι πολικές τάσεις.

Από την (2.36) γνωρίζουμε ότι η μέγιστη ενεργός τιμή της πολικής τάσης του αντιστροφέα είναι $V_{1,rms}^{MAX} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{V_{dc}}{2}$. Οπότε από την (2.44) συμπεραίνουμε ότι θα πρέπει :

$$V_{1,rms}^{MAX} > V_n$$

Χρησιμοποιώντας την σχέση (2.36) τελικά προκύπτει :

$$V_{dc} > 1.633V_n \quad (2.45)$$

Συνεπώς θα πρέπει να ισχύει η συνθήκη (2.45) για την επιλογή της dc τάσης. Το πόσο μεγαλύτερη πρέπει να είναι η dc τάση εξαρτάται από την συνολική επαγωγική αντίδραση που παρεμβάλλεται μεταξύ αντιστροφέα – δικτύου. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται και στην σχέση (2.43) μεγάλη τιμή της αντίδρασης X_k απαιτεί μεγαλύτερη τιμή της διαφοράς $V_i - V_g$, και άρα ακόμα μεγαλύτερη τιμή dc τάσης προκειμένου να παραχθεί μια δεδομένη άεργος ισχύς. Από την άλλη, μικρή τιμή της αντίδρασης X_k

ναι μεν δεν απαιτεί τόσο μεγάλη dc τάση, μπορεί όμως να μειώσει την ποιότητα ισχύος του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα. Για παράδειγμα αν αυτός λειτουργεί με έλεγχο υστέρησης ρεύματος, η μικρή τιμή της επαγωγικής αντίδρασης θα επιφέρει υψηλές διακοπτικές συχνότητες στην λειτουργία του μετατροπέα, λόγω του πολύ υψηλού ρυθμού μεταβολής του ρεύματος εξόδου, με αποτέλεσμα την περαιτέρω παραμόρφωση της κυματομορφής του. Η τεχνική αυτή θα εξηγηθεί αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.

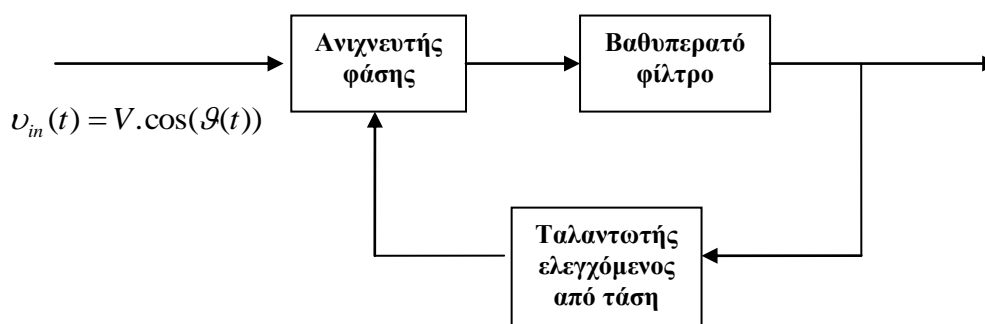
Συμπερασματικά λοιπόν απαιτούμε τη μικρότερη δυνατή συνολική επαγωγική αντίδραση, ώστε να μπορούμε να παράγουμε τα απαιτούμενα P, Q με όσο χαμηλότερη DC τάση γίνεται και με κυματομορφές ρευμάτων κοντά στις ημιτονοειδείς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΦΑΣΕΩΣ ΚΑΙ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

3.1 Λειτουργία μετατροπέα στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς

Στην πλειοψηφία των τεχνικών ελέγχου ενός DC/AC μετατροπέα χρησιμοποιείται το σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς στο οποίο μετασχηματίζονται τα μετρούμενα μεγέθη και τα σήματα αναφοράς. Όπως έχει εξηγηθεί στην παράγραφο 2.6.2, με τον μετασχηματισμό τριφασικών μεγεθών στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς, από χρονικά μεταβαλλόμενα μεγέθη προκύπτουν χρονικά αμετάβλητα μεγέθη. Στην πλειοψηφία των τεχνικών ελέγχου χρησιμοποιούνται PI ελεγκτές για να διαμορφωθούν οι παλμοί οδήγησης των διακοπτικών στοιχείων. Συνεπώς αν στην είσοδο των ελεγκτών αυτών τα σήματα αναφοράς και αυτά που ανατροφοδοτούνται είναι μετασχηματισμένα στο προαναφερθέν πλαίσιο τότε επιτυγχάνεται μηδενικό σφάλμα στην μόνιμη κατάσταση [58]. Αντίθετα, αν δεν χρησιμοποιηθεί κάποιος μετασχηματισμός τότε ο PI έλεγχος θα λειτουργούσε με εναλλασσόμενα μεγέθη στην είσοδό του με αποτέλεσμα να προέκυπταν σφάλματα στην μόνιμη κατάσταση [58] και έτσι η απόδοση του συστήματος ελέγχου δεν θα ήταν ικανοποιητική.



Σχήμα 3.1 : Η διάταξη του PLL

Για να επιτευχθεί η λειτουργία στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς θα πρέπει να υλοποιηθούν οι μετασχηματισμοί 2.19 και 2.21. Συνεπώς χρειάζεται να γνωρίζουμε κάθε στιγμή την γωνία μετασχηματισμού θ_T ή με άλλα λόγια την φάση της τάσης του δικτύου. Η διάταξη που χρησιμοποιείται για να επιτευχθεί το παραπάνω ονομάζεται Phase Locked Loop (PLL). Όπως φαίνεται στο Σχ. 3.1, τα τρία βασικά του μέρη είναι : ανιχνευτής φάσης, βαθυπερατό φίλτρο και ταλαντωτής ελεγχόμενος από τάση (VCO). Το PLL παράγει ένα σήμα, του οποίου η συχνότητα συγκρίνεται με αυτήν του σήματος εισόδου (της τάσης του δικτύου) μέσω ενός μείκτη και το προκύπτον σφάλμα (το οποίο απομονώνεται μέσω του βαθυπερατού φίλτρου) οδηγεί σε κατάλληλη αναπροσαρμογή της συχνότητας του PLL (μέσω του VCO) τέτοια ώστε

να μειώσει το παραπάνω σφάλμα. Έτσι στην μόνιμη κατάσταση η φάση που δίνει στην έξοδό του το PLL θα είναι η ίδια με την φάση της τάσης του δικτύου.

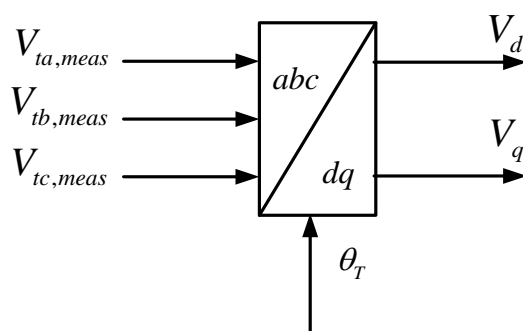
3.2 Ρεύμα εξόδου μετατροπέα με έλεγχο υστέρησης ρεύματος (hysteresis current control)

3.2.1 Περιγραφή τεχνικής ελέγχου

Η τεχνική αυτή ελέγχου είναι ιδιαίτερα απλή στην υλοποίησή της αλλά και στην λογική της. Η κεντρική ιδέα είναι να δίνονται στον μετατροπέα τα επιθυμητά ρεύματα αναφοράς για κάθε φάση που θέλουμε να εγχέονται στο δίκτυο, και να ελέγχεται κατάλληλα η αγωγή και η σβέση των διακοπτικών στοιχείων έτσι ώστε το πραγματικό ρεύμα κάθε φάσης να ακολουθεί το ρεύμα αναφοράς. Προφανώς το εγχεόμενο ρεύμα θα βρίσκεται εντός μιας ζώνης που περιβάλλει το ρεύμα αναφοράς, η οποία καθορίζεται από τον ίδιο τον έλεγχο (hysteresis band) και η οποία καθορίζει την αγωγή ή σβέση των διακοπτικών στοιχείων.

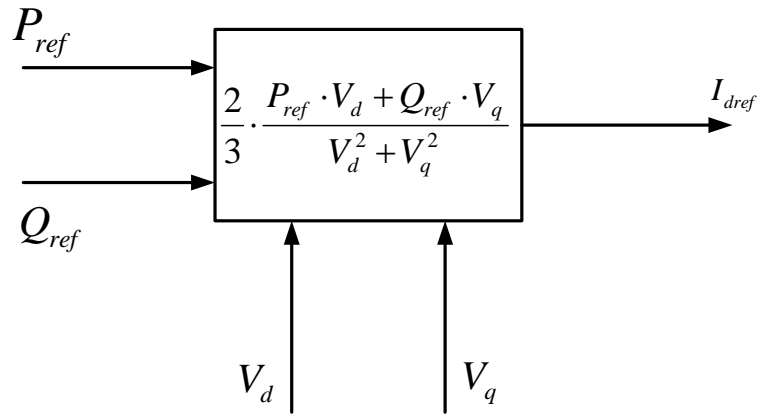
Για την δημιουργία των επιθυμητών ρευμάτων αναφοράς χρησιμοποιείται ο μετασχηματισμός $abc \rightarrow dq$, όπως περιγράφεται και στην αναφορά [24]. Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα επιμέρους στάδια για τον τελικό υπολογισμό των ρευμάτων αναφοράς.

Στο Σχ 3.2 φαίνεται το τμήμα του ελεγκτή του μετατροπέα στο οποίο γίνεται ο μετασχηματισμός $abc \rightarrow dq$ των μετρούμενων τάσεων, βάσει της γωνίας μετασχηματισμού θ_T .

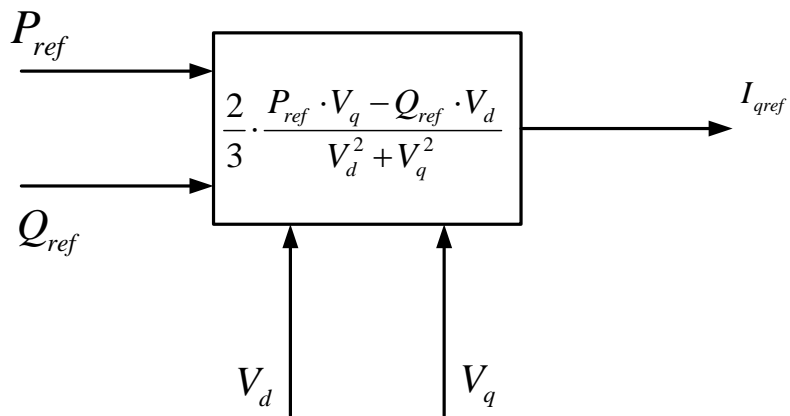


Σχήμα 3.2 : Μετασχηματισμός $abc \rightarrow dq$ των μετρούμενων τάσεων

Τώρα το επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός των ρευμάτων αναφοράς στους άξονες d,q. Στην ουσία, βάσει των συνιστωσών V_d , V_q και των επιθυμητών τιμών ενεργού και αέργου ισχύος P_{ref} , Q_{ref} , χρησιμοποιούνται οι σχέσεις (2.31) και (2.32) για τον καθορισμό των ρευμάτων αναφοράς στο dq πλαίσιο. Όλα τα προαναφερθέντα φαίνονται παραστατικά στα Σχ. 3.3 και 3.4.

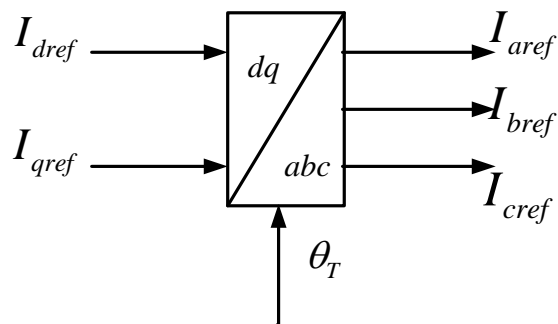


Σχήμα 3.3 : Καθορισμός του ρεύματος αναφοράς d άξονα

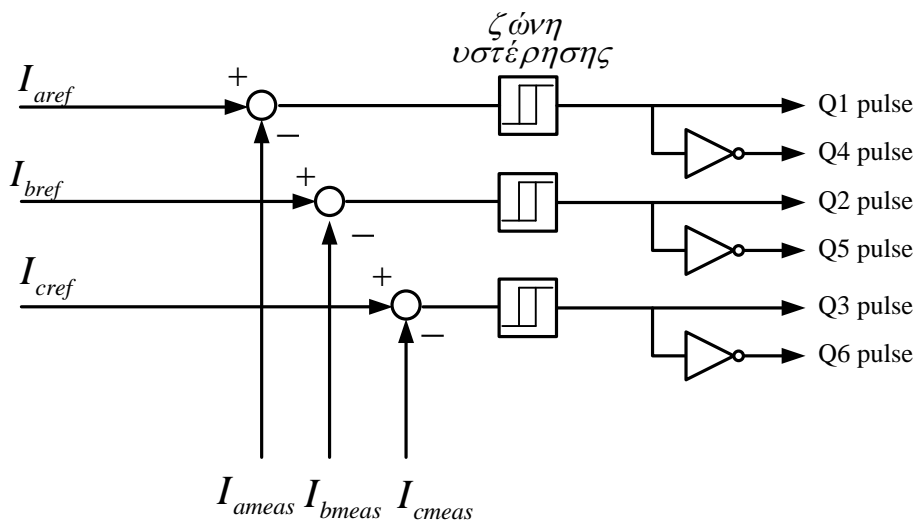


Σχήμα 3.4 : Καθορισμός του ρεύματος αναφοράς q άξονα

Πλέον αφού έχουν καθοριστεί τα ρεύματα αναφοράς στους άξονες d, q, μένει να μετασχηματιστούν από το dq στο abc πλαίσιο για να καθοριστούν τα ρεύματα αναφοράς σε κάθε φάση. Αυτό θα γίνει πάλι βάσει της γωνίας μετασχηματισμού θ_T , όπως φαίνεται στο Σχ. 3.5.



Σχήμα 3.5 : Αντίστροφος μετασχηματισμός $dq \rightarrow abc$ για τον καθορισμό των ρευμάτων αναφοράς στις τρεις φάσεις του δικτύου.

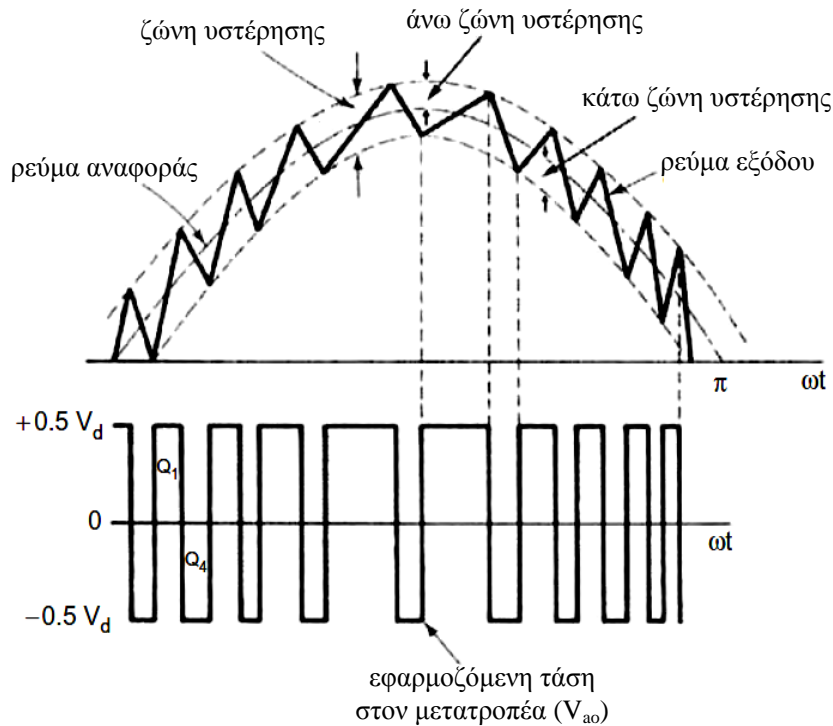


Σχήμα 3.6 : Διαμόρφωση παλμών οδήγησης διακοπτικών στοιχείων με την τεχνική ελέγχου υστέρησης ρεύματος.

Στο Σχ. 3.6 φαίνεται η φιλοσοφία του ελέγχου υστέρησης ρεύματος. Έχοντας τα ρεύματα αναφοράς σε κάθε φάση, γίνεται πλέον η σύγκρισή τους με τα μετρούμενα ρεύματα εξόδου του μετατροπέα. Ορίζοντας μια τιμή κατωφλίου h , η οποία ρυθμίζεται στη βαθμίδα της ζώνης υστέρησης, η οποία φαίνεται στο Σχ. 3.6, οι παλμοί οδήγησης των διακοπτικών στοιχείων ρυθμίζονται ως εξής :

- Αν $I_{aref} - I_{ameas} > h$, τότε δίνεται παλμός στο IGBT1 (βλέπε Σχ. 2.10) να κλείσει (κατάσταση ON), και στο IGBT4 να ανοίξει (OFF), με αποτέλεσμα στην φάση a στην έξοδο του μετατροπέα να εφαρμόζεται η dc τάση του πυκνωτή με θετικό πρόσημο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον πολύ γρήγορο ρυθμό αύξησης του ρεύματος εξόδου της φάσης a, λόγω της μικρής τιμής που έχει η ισοδύναμη αυτεπαγωγή που παρεμβάλλεται μεταξύ του αντιστροφέα και του δικτύου. Η συμπεριφορά αυτή είναι παρόμοια με αυτή που αναπτύχθηκε στο Κεφ. 2 για τον DC/DC μετατροπέα ανύψωσης. Η αύξηση αυτή κάνει σε ελάχιστο χρόνο το ρεύμα εξόδου καταρχάς να φτάσει το ρεύμα αναφοράς και στην συνέχεια να το υπερβεί. Όπως εξηγήθηκε και στην παράγραφο 2.9.3, η τιμή της dc τάσης είναι τέτοια (βλέπε σχέση (2.45)), που στην ουσία ο ρυθμός μεταβολής του ρεύματος εξαρτάται από την επιβολή της dc τάσης με θετικό ή αρνητικό πρόσημο.
- Αν $I_{aref} - I_{ameas} < -h$, τότε δίνεται παλμός στο IGBT1 (Σχ. 2.10) να ανοίξει (κατάσταση OFF), και στο IGBT4 να κλείσει (ON), με αποτέλεσμα στην φάση a στην έξοδο του μετατροπέα να εφαρμόζεται η dc τάση του πυκνωτή με αρνητικό πρόσημο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον πολύ γρήγορο ρυθμό μείωσης του ρεύματος εξόδου της φάσης a, για τον ίδιο λόγο που αναφέρθηκε προηγουμένως. Η μείωση αυτή κάνει σε ελάχιστο χρόνο το ρεύμα εξόδου καταρχάς να φτάσει το ρεύμα αναφοράς και στην συνέχεια να γίνει μικρότερο από αυτό.

Τα παραπάνω ισχύουν πανομοιότυπα και για τις φάσεις b, c. Αποτέλεσμα αυτής της μορφής ελέγχου είναι η μετάβαση από αγωγή σε σβέση των διακοπτικών στοιχείων να γίνεται σε συχνότητες της τάξης των kHz, με αποτέλεσμα το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα να είναι αναγκασμένο να ακολουθεί το εκάστοτε ρεύμα αναφοράς.



Σχήμα 3.7 : Τυπική μορφή ρεύματος εξόδου και η αντίστοιχη τάση V_{ao} με έλεγχο υστέρησης ρεύματος [47].

Η τυπική μορφή του ρεύματος που εγχέεται από τον αντιστροφέα με αυτή την τεχνική φαίνεται στο Σχ. 3.7. Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα ακολουθεί το ρεύμα αναφοράς, με μια μικρή κυμάτωση της τάξης των kHz, η οποία εξαρτάται από το εύρος της ζώνης υστέρησης ($h+h=2h$), αλλά και από τον ρυθμό μεταβολής του ρεύματος από το οποίο διαρρέεται το ισοδύναμο πηνίο κάθε φάσης μεταξύ μετατροπέα – δικτύου. Είναι προφανές πως η μικρή τιμή αυτεπαγωγής σε συνδυασμό με την εφαρμογή της dc τάσης του μετατροπέα στο ένα άκρο του, οδηγεί σε πολύ γρήγορη αύξηση ή μείωση του ρεύματος κάθε φάσης.

Συμπερασματικά λοιπόν ο έλεγχος υστέρησης ρεύματος είναι αρκετά απλός στην υλοποίησή του και ο μετατροπέας συμπεριφέρεται σαν μια **ελεγχόμενη πηγή ρεύματος**. Μειονέκτημα όμως αποτελεί το γεγονός ότι η διακοπτική συχνότητα δεν είναι σταθερή και εξαρτάται σημαντικά από το εύρος της ζώνης υστέρησης, από την αυτεπαγωγή του πηνίου, και από την διαφορά δυναμικού που εφαρμόζεται στα άκρα του. Επίσης το φάσμα του ρεύματος εξόδου είναι συνεχές, δηλαδή εκτός από συχνότητες πολλαπλασίες των 50Hz, περιέχει και ενδιάμεσες αρμονικές (interharmonics) αλλά και υφαρμονικές στην περιοχή από 0-50Hz (subharmonics). Για μετατροπείς μεγάλης ισχύος η συγκεκριμένη τεχνική μπορεί να αποφέρει υψηλές απώλειες, λόγω της μη ελεγχόμενης διακοπτικής συχνότητας.

Τα παραπάνω προβλήματα αντιμετωπίζονται αν σαν τεχνική ελέγχου εφαρμοστεί ο έλεγχος με τριγωνικό φέρον σήμα, ο οποίος ονομάζεται έλεγχος ρεύματος με την τεχνική σύγκρισης ράμπας και εξηγείται στην ενότητα

3.2.2 Επίδραση σφάλματος μέτρησης φάσης στην περίπτωση λειτουργίας στο στρεφόμενο πλαίσιο dq

Στην παράγραφο αυτή θα γίνει η υπόθεση ότι η γωνία μετασχηματισμού θ_T των Σχ. 3.2 και 3.5 δίνεται από την εκτιμώμενη φάση που δίνει το PLL και θα διερευνηθεί κατά πόσον το ρεύμα αναφοράς επηρεάζεται από το όποιο σφάλμα υπάρχει στην εκτίμηση της φάσης. Το παραπάνω μπορεί να διαπιστωθεί αν υπολογιστούν οι σχέσεις που δίνουν τα ρεύματα αναφοράς σε κάθε φάση.

Για παράδειγμα, έστω ότι η τερματική τάση της φάσης a είναι της μορφής $V_{t,a} = V_{t,\max} \cos \theta(t)$. Όσον αφορά την μέτρηση των τάσεων θεωρείται πως είναι πρακτικά ίσες με τις πραγματικές, λόγω της πολύ μικρής χρονικής σταθεράς του χρησιμοποιούμενου φίλτρου. Το PLL δίνει μια εκτίμηση της γωνίας $\theta(t)$, η οποία συμβολίζεται εδώ ως $\theta_{PLL}(t)$. Οπότε υπάρχει ένα σφάλμα εκτίμησης που ορίζεται ως $\tilde{\theta} = \theta_{PLL} - \theta$. Εφαρμόζοντας τον μετασχηματισμό $abc \rightarrow dq$ για τις τάσεις (βλέπε Σχ. 3.2) προκύπτει :

$$V_d = \frac{2V_{t,\max}}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_{PLL} & \cos(\theta_{PLL} - 2\pi/3) & \cos(\theta_{PLL} + 2\pi/3) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix}$$

Απ'όπου :

$$V_d = V_{t,\max} \cos(\theta_{PLL} - \theta) = V_{t,\max} \cos \tilde{\theta} \quad (3.1)$$

$$V_q = \frac{2V_{t,\max}}{3} \begin{bmatrix} -\sin \theta_{PLL} & -\sin(\theta_{PLL} - 2\pi/3) & -\sin(\theta_{PLL} + 2\pi/3) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix}$$

Δηλαδή :

$$V_q = -V_{t,\max} \sin(\theta_{PLL} - \theta) = -V_{t,\max} \sin \tilde{\theta} \quad (3.2)$$

Αν θεωρήσουμε ότι το PLL δρα ακαριαία τότε $\tilde{\theta} = \theta_{PLL} - \theta = 0$, οπότε $V_d = V_{t,\max}$ και $V_q = 0$, οπότε τα ρεύματα αναφοράς προκύπτουν με χρήση των σχέσεων (2.31), (2.32) σε φυσικές τιμές :

$$I_{dref} = \frac{2}{3} \cdot \frac{P_{ref} \cdot V_d + Q_{ref} \cdot V_q}{V_d^2 + V_q^2} = \frac{2P_{ref}}{3V_{t,\max}} \quad (3.3)$$

$$I_{qref} = \frac{2}{3} \cdot \frac{P_{ref} \cdot V_q - Q_{ref} \cdot V_d}{V_d^2 + V_q^2} = \frac{-2Q_{ref}}{3V_{t,\max}} \quad (3.4)$$

Συνεπώς σε αυτή την περίπτωση επιτυγχάνεται ανεξάρτητος έλεγχος της ενεργού και αέργου ισχύος ρυθμίζοντας αντίστοιχα τα ρεύματα d και q άξονα.

Όταν όμως υπάρχει κάποιο σφάλμα εκτίμησης της φάσης, όπως υπάρχει στην πραγματικότητα, τότε τα ρεύματα αναφοράς προκύπτουν από τις σχέσεις (2.31), (2.32) ως εξής (βλέπε Σχ. 3.3, 3.4) :

$$I_{dref} = \frac{2}{3} \cdot \frac{P_{ref} \cdot V_d + Q_{ref} \cdot V_q}{V_d^2 + V_q^2} = \frac{2}{3} \cdot \frac{P_{ref} \cdot \cos \tilde{\theta} - Q_{ref} \cdot \sin \tilde{\theta}}{V_{t,max}} \quad (3.5)$$

$$I_{qref} = \frac{2}{3} \cdot \frac{P_{ref} \cdot V_q - Q_{ref} \cdot V_d}{V_d^2 + V_q^2} = \frac{2}{3} \cdot \frac{-P_{ref} \cdot \sin \tilde{\theta} - Q_{ref} \cdot \cos \tilde{\theta}}{V_{t,max}} \quad (3.6)$$

Βλέπουμε λοιπόν πως τα ρεύματα αναφοράς στο dq πλαίσιο εξαρτώνται από το σφάλμα μέτρησης της φάσης. Όμως τα παραπάνω ρεύματα μετασχηματίζονται από dq σε abc συνιστώσες για να καθοριστούν τα ρεύματα αναφοράς για κάθε φάση. Και εδώ χρησιμοποιείται η εκτιμώμενη γωνία του PLL. Για παράδειγμα για το ρεύμα αναφοράς της φάσης a ισχύει :

$$I_{aref} = \cos \theta_{PLL} \cdot I_{dref} - \sin \theta_{PLL} \cdot I_{qref}$$

Με χρήση των σχέσεων (3.5), (3.6) προκύπτει :

$$I_{aref} = \frac{2}{3} \cdot \cos \theta_{PLL} \cdot \frac{P_{ref} \cdot \cos \tilde{\theta} - Q_{ref} \cdot \sin \tilde{\theta}}{V_{t,max}} - \frac{2}{3} \cdot \sin \theta_{PLL} \cdot \frac{-P_{ref} \cdot \sin \tilde{\theta} - Q_{ref} \cdot \cos \tilde{\theta}}{V_{t,max}} \quad \eta$$

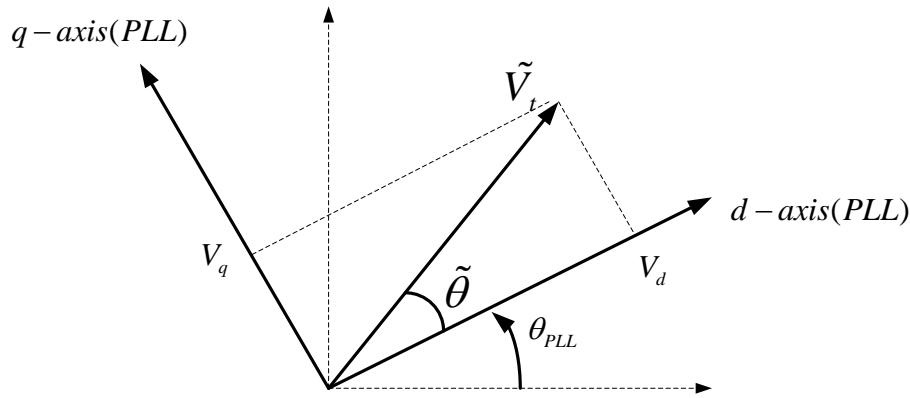
$$I_{aref} = \frac{2}{3V_{t,max}} \left(P_{ref} \cos(\theta_{PLL} - \tilde{\theta}) + Q_{ref} \sin(\theta_{PLL} - \tilde{\theta}) \right) = \frac{2}{3V_{t,max}} \left(P_{ref} \cos \theta + Q_{ref} \sin \theta \right)$$

Τελικά :

$$I_{aref} = \frac{2S_{ref}}{3V_{t,max}} \left(\cos \varphi_{ref} \cos \theta + \sin \varphi_{ref} \sin \theta \right) = I_{max} \cos(\theta - \varphi_{ref}) \quad (3.7)$$

Δηλαδή παρατηρούμε πως το ρεύμα αναφοράς στο abc πλαίσιο, το οποίο αποτελεί και το τελικό στάδιο πριν την σύγκριση με τα μετρούμενα ρεύματα, δεν επηρεάζεται από το σφάλμα εκτίμησης της φάσης που δίνει το PLL, και αυτό λόγω των δύο διαδοχικών μετασχηματισμών που γίνονται (πρώτα abc→dq και μετά dq→abc). Μάλιστα το ρεύμα αναφοράς αποκτά την κατάλληλη διαφορά φάσης σε σχέση με την τερματική τάση έτσι ώστε να προκύψουν οι επιθυμητές εγχύσεις ενεργού και αέργου ισχύος.

Όπως φαίνεται και στο Σχ. 3.8 η ύπαρξη σφάλματος στην εκτίμηση της φάσης συνεπάγεται και ύπαρξη q συνιστώσας για την τάση. Έτσι αν χρησιμοποιηθούν οι σχέσεις (3.5), (3.6) τα ρεύματα αναφοράς που θα προκύψουν στο πλαίσιο του PLL θα είναι αυτά που πρέπει ώστε η διαφορά φάσης του πραγματικού ρεύματος από την φάση της τάσης του δικτύου να είναι η επιθυμητή.



Σχήμα 3.8 : dq πλαίσιο του PLL όταν δεν είναι απόλυτα συγχρονισμένο με την τάση

Σφάλμα στην απόκριση του μετατροπέα θα υπήρχε αν αντί των σχέσεων (3.5), (3.6) χρησιμοποιούνταν οι σχέσεις (3.3), (3.4). Εκεί ενώ τα ρεύματα αναφοράς αναφέρονται σε ένα πλαίσιο όπου ο d άξονας ταυτίζεται με την τάση, θα χρησιμοποιούνταν σε ένα άλλο πλαίσιο το οποίο δεν συμπίπτει με το προηγούμενο. Οπότε λογικό είναι ο μετατροπέας να συνθέσει ένα ρεύμα που να μην είχε την σωστή διαφορά φάσης με την τάση.

Συμπερασματικά λοιπόν, όταν ο μετατροπέας λειτουργεί με έλεγχο υστέρησης ρεύματος δεν χρειάζεται να μελετηθεί η δυναμική συμπεριφορά του PLL, αν αυτό χρησιμοποιείται, καθώς δεν υπεισέρχεται η γωνία μετασχηματισμού θ_T στα ρεύματα αναφοράς (σε συνθήκες συμμετρίας του δικτύου). Η απόκριση του μετατροπέα σε αυτή την τεχνική εξαρτάται από τα χρησιμοποιούμενα φίλτρα για την μέτρηση των τάσεων και ρευμάτων, και από τους όποιους βρόχους ελέγχου χρησιμοποιούνται για την διαμόρφωση της ενεργού και αέργου ισχύος αναφοράς.

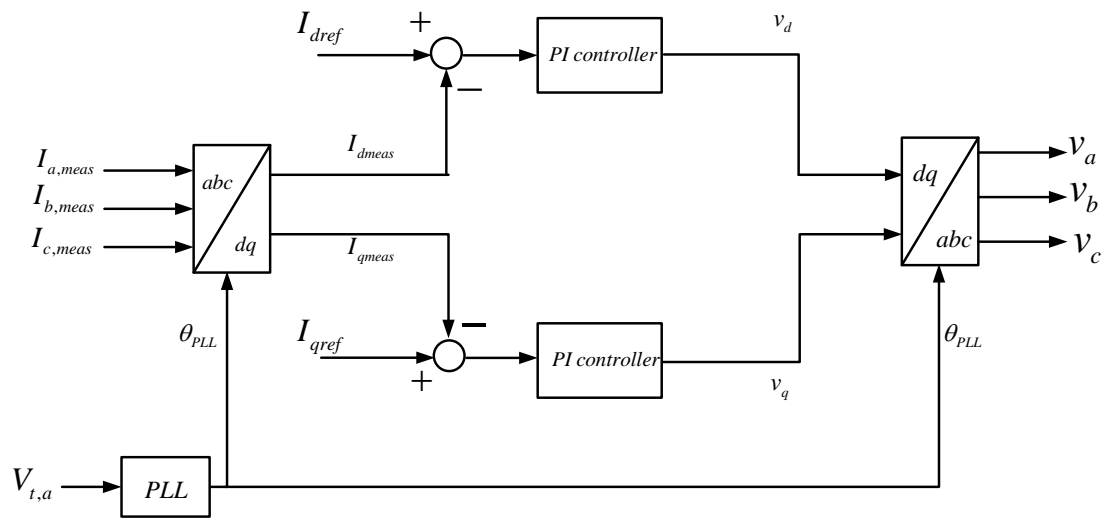
3.3 Ρεύμα εξόδου μετατροπέα με έλεγχο ρεύματος με την τεχνική σύγκρισης ράμπας (PI current control with ramp comparison)

3.3.1 Περιγραφή τεχνικής ελέγχου

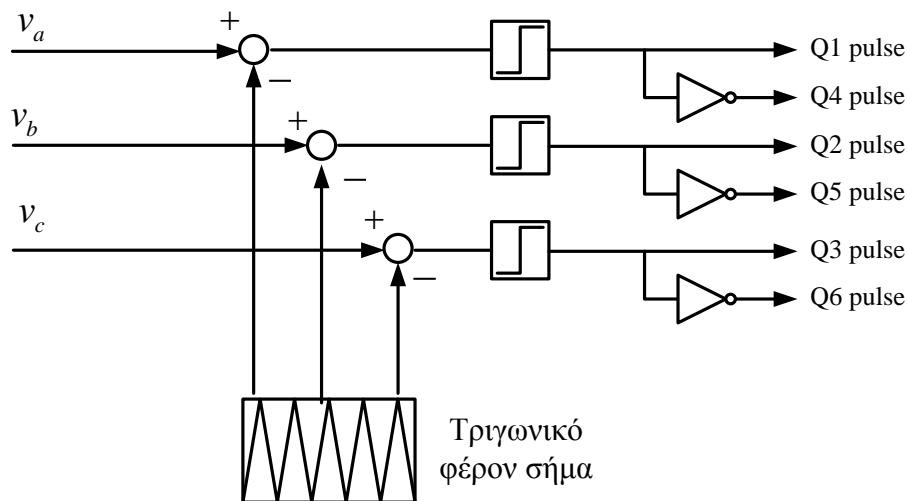
Στην τεχνική αυτή χρησιμοποιείται ένα τριγωνικό φέρον σήμα συχνότητας της τάξης των kHz για την διαμόρφωση των παλμών οδήγησης των διακοπτικών στοιχείων. Εδώ χρησιμοποιούνται δύο PI ελεγκτές οι οποίοι στην είσοδό τους δέχονται το σφάλμα του ρεύματος αναφοράς από το μετρούμενο, εκφρασμένα σε dq συνιστώσες. Στην συνέχεια τα σήματα στην έξοδο των 2 PI ελεγκτών μετασχηματίζονται από dq συνιστώσες σε abc συνιστώσες οι οποίες στην συνέχεια συγκρίνονται με το φέρον και από το αποτέλεσμα της σύγκρισης αυτής προκύπτουν οι παλμοί οδήγησης των διακοπτικών στοιχείων.

Τα ρεύματα αναφοράς σε dq συνιστώσες προκύπτουν ακριβώς όπως και στην προηγούμενη τεχνική, όπως φαίνονται στα Σχ. 3.2, 3.3, 3.4, οπότε δεν παρουσιάζονται εδώ. Εδώ η γωνία μετασχηματισμού θ_T του Σχ. 3.2 είναι αναγκαίο να δοθεί από το PLL διότι όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 3.1, για να είναι αποδοτικός ο PI έλεγχος πρέπει τα μετασχηματισμένα μεγέθη να μην είναι

εναλλασσόμενα, ή με άλλα λόγια ο μετασχηματισμός πρέπει να γίνει στο στρεφόμενο πλαίσιο dq. Παρακάτω εξηγούνται οι τροποποιημένες διατάξεις ελέγχου που χρησιμοποιούνται στην τεχνική αυτή.



Σχήμα 3.9 : Έλεγχος κλειστού βρόχου στο dq πλαίσιο αναφοράς του PLL και αντίστροφος μετασχηματισμός dq→abc για τον καθορισμό των επιθυμητών τάσεων αναφοράς στην έξοδο του μετατροπέα [16],[33].

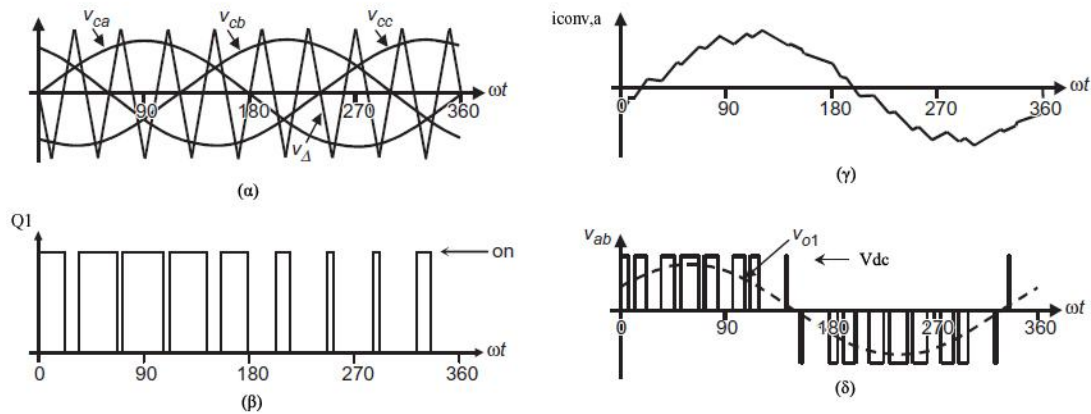


Σχήμα 3.10 : Σύγκριση με φέρων σήμα και διαμόρφωση παλμών οδήγησης διακοπτικών στοιχείων.

Στο Σχ. 3.9 χρησιμοποιείται η γωνία που δίνει το PLL για να μετασχηματιστούν τα μετρούμενα ρεύματα από abc σε dq συνιστώσες. Στην συνέχεια στο dq πλαίσιο του PLL γίνεται η σύγκριση των ρευμάτων αναφοράς από τα μετρούμενα, και το προκύπτον σφάλμα οδηγεί τους PI ελεγκτές. Έτσι παράγονται τα σήματα v_d, v_q . Έπειτα χρησιμοποιώντας ξανά την εκτιμώμενη γωνία του PLL γίνεται ο μετασχηματισμός από dq σε abc συνιστώσες.

Τέλος στο Σχ. 3.10 τα σήματα αναφοράς v_a, v_b, v_c συγκρίνονται με ένα τριγωνικό φέρων σήμα συχνότητας της τάξης των kHz, και από το αποτέλεσμα της σύγκρισης προκύπτουν οι παλμοί οδήγησης των διακοπτικών στοιχείων.

Στο Σχ. 3.11 φαίνονται κάποια τυπικά παραδείγματα κυματομορφών που προκύπτουν με αυτή την τεχνική ελέγχου.



Σχήμα 3.11 : Τυπικές μορφές καμπυλών με διαμόρφωση παλμών με τη χρήση φέροντος τριγωνικής κυματομορφής υψηλής συχνότητας [46].

Μια σημαντική διαφορά στην τεχνική αυτή είναι ότι στην ουσία προκύπτει μια επιθυμητή τάση αναφοράς για κάθε φάση του μετατροπέα τέτοια ώστε να τείνει να μηδενίζει το σφάλμα του ρεύματος αναφοράς από το μετρούμενο εκφρασμένα στο dq πλαίσιο του PLL. Επειδή και εδώ το ρεύμα χρησιμοποιείται σαν μεταβλητή ελέγχου, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι και με αυτή την τεχνική ο μετατροπέας στην ουσία συμπεριφέρεται σαν μια ελεγχόμενη πηγή ρεύματος με υψηλή ταχύτητα απόκρισης. Μια άλλη σημαντική διαφορά σε σχέση με τον έλεγχο υστέρησης είναι πως η μεταγωγή των διακοπτικών στοιχείων από αγωγή σε σβέση καθορίζεται από εκ των προτέρων από το σύστημα ελέγχου του μετατροπέα. Αντίθετα στον έλεγχο υστέρησης η μεταγωγή από αγωγή σε σβέση θα γίνει μόνο όταν το εγχεόμενο ρεύμα βρεθεί εκτός της ζώνης υστέρησης.

Επίσης συγκριτικά με την προηγούμενη τεχνική το ρεύμα έχει διακριτό φάσμα, χωρίς δηλαδή την παρουσία ενδιάμεσων αρμονικών και υφαρμονικών στη περιοχή από 0 έως 50 Hz (υπό την προϋπόθεση βέβαια ότι σήμα ελέγχου και φέρον σήμα είναι συγχρονισμένα) ενώ οι αρμονικές με τα μεγαλύτερα πλάτη συγκεντρώνονται κοντά στη διακοπτική συχνότητα και σε πολλαπλάσια αυτής, με αποτέλεσμα να μπορούν εύκολα να φιλτραριστούν. Βέβαια η τεχνική αυτή είναι σαφώς πολυπλοκότερη και πιο ακριβή από την τεχνική ελέγχου υστέρησης ρεύματος που είναι απλούστερη στην υλοποίηση.

3.3.2 Επίδραση σφάλματος μέτρησης φάσης

Όσον αφορά στο σφάλμα εκτίμησης της φάσης που δίνει το PLL, πάλι δεν επηρεάζει το ρεύμα εξόδου του και αυτό γιατί η σύγκριση των ρευμάτων αναφοράς με τα μετρούμενα γίνεται στο ίδιο πλαίσιο, με αποτέλεσμα να δίνονται τα κατάλληλα σήματα εκφρασμένα στο dq πλαίσιο του PLL ώστε το ρεύμα εξόδου να βρεθεί στην σωστή διαφορά φάσης από την τερματική τάση.

Έστω ότι η τάση και το ρεύμα της φάσης a δίνονται από τις σχέσεις :

$$V_{t,a} = V_{t,\max} \cos \theta(t) \quad (3.8)$$

$$I_a = I_{\max} \cos(\theta(t) - \varphi) \quad (3.9)$$

Παρακάτω γίνεται η προσέγγιση ότι τα μετρούμενα μεγέθη είναι ίσα με τα πραγματικά λόγω της μικρής χρονικής σταθεράς των χρησιμοποιούμενων φίλτρων.

Τα ρεύματα αναφοράς που δίνονται από τις σχέσεις (3.5), (3.6) μπορούν να γραφούν και ως εξής :

$$I_{dref} = \frac{2S_{ref}}{3V_{t,\max}} \cdot (\cos \varphi_{ref} \cos \tilde{\theta} - \sin \varphi_{ref} \cdot \sin \tilde{\theta}) = I_{\max} \cos(\tilde{\theta} + \varphi_{ref}) \quad (3.10)$$

$$I_{qref} = \frac{2S_{ref}}{3V_{t,\max}} \cdot (-\cos \varphi_{ref} \cdot \sin \tilde{\theta} - \sin \varphi_{ref} \cdot \cos \tilde{\theta}) = -I_{\max} \sin(\tilde{\theta} + \varphi_{ref}) \quad (3.11)$$

Όπου :

$$I_{\max} = \frac{2S_{ref}}{3V_{t,\max}} \quad (3.12)$$

Τα μετρούμενα ρεύματα που μετασχηματίζονται στο dq πλαίσιο του PLL προκύπτουν ως εξής :

$$I_{dmeas} = \frac{2I_{\max}}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_{PLL} & \cos(\theta_{PLL} - 2\pi/3) & \cos(\theta_{PLL} + 2\pi/3) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta - \varphi) \\ \cos(\theta - \varphi - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - \varphi + 2\pi/3) \end{bmatrix}$$

$$\dot{\eta} \quad I_{dmeas} = I_{\max} \cos(\theta_{PLL} - (\theta - \varphi)) = I_{\max} \cos(\tilde{\theta} + \varphi) \quad (3.13)$$

$$I_{qmeas} = \frac{2I_{\max}}{3} \begin{bmatrix} -\sin \theta_{PLL} & -\sin(\theta_{PLL} - 2\pi/3) & -\sin(\theta_{PLL} + 2\pi/3) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta - \varphi) \\ \cos(\theta - \varphi - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - \varphi + 2\pi/3) \end{bmatrix}$$

$$\dot{\eta} \quad I_{qmeas} = -I_{\max} \sin(\theta_{PLL} - (\theta - \varphi)) = -I_{\max} \sin(\tilde{\theta} + \varphi) \quad (3.14)$$

Έτσι από τα ζεύγη των σχέσεων (3.10)-(3.13) και (3.11)-(3.14), βλέπουμε πως η μόνη διαφορά τους έγκειται στο αν $\varphi_{ref} \neq \varphi$, το οποίο αποτελεί και την αναγκαία συνθήκη για να λειτουργήσει ο μετατροπέας σωστά. Προφανώς όλες οι σχέσεις εμπεριέχουν το σφάλμα εκτίμησης της φάσης, πράγμα που κάνει τις dq συνιστώσες να μετασχηματιστούν σωστά στο πλαίσιο του PLL. Οπότε αν πχ είναι $\varphi_{ref} = \varphi$ τότε από τις σχέσεις (3.10), (3.11), (3.13), (3.14) προκύπτει ότι $I_{dref} = I_{dmeas}$ και $I_{qref} = I_{qmeas}$. Δηλαδή ο ελεγκτής βλέπει πως στο δικό του πλαίσιο οι συνιστώσες του ρεύματος σε κάθε άξονα είναι ίδιες, οπότε δεν χρειάζεται να δράσει. Οπότε το σφάλμα εκτίμησης της φάσης δεν είναι αυτό που θα επηρεάσει την απόκριση του

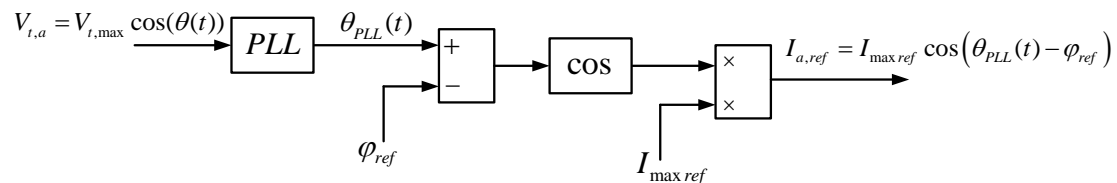
μετατροπέα. Το σφάλμα απλώς προκαλεί τον σωστό μετασχηματισμό των ρευμάτων στο dq πλαίσιο του PLL.

Συμπερασματικά λοιπόν μπορούμε να πούμε πως όταν ο μετατροπέας λειτουργεί είτε με έλεγχο υστέρησης ρεύματος είτε με τον έλεγχο με την τεχνική σύγκρισης ράμπας, το σφάλμα εκτίμησης της φάσης που δίνει το PLL αποτελεί εσωτερική μεταβλητή του ελεγκτή και δεν είναι αυτό που επηρεάζει την απόκριση του DC/AC μετατροπέα.

Απλώς στην τεχνική ελέγχου αυτής της παραγράφου η χρήση του PLL είναι αναγκαία για να είναι αποδοτικός ο χρησιμοποιούμενος PI έλεγχος.

3.3 Άλλες τεχνικές ελέγχου του DC/AC μετατροπέα

Πέραν των προηγούμενων τεχνικών, μια άλλη απλούστερη τεχνική στην οποία όμως το PLL επηρεάζει την απόκριση του μετατροπέα φαίνεται στο Σχ. 3.12.

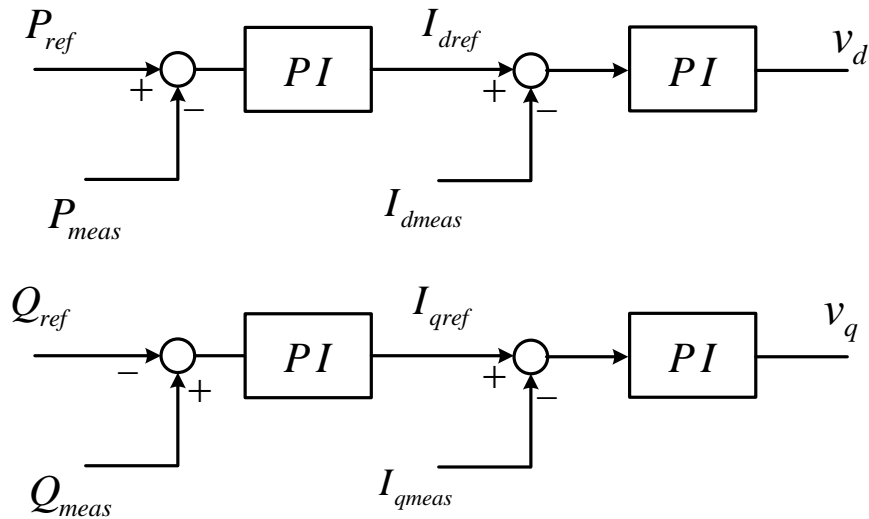


Σχήμα 3.12 : Εναλλακτικός τρόπος παραγωγής των ρευμάτων αναφοράς [38]

Στην περίπτωση αυτή η εκτιμώμενη φάση εμφανίζεται στην φάση που έχει το ρεύμα αναφοράς, οπότε τα σφάλματα στην εκτίμηση θα εμφανίζονται και στο ρεύμα αναφοράς. Έτσι αν χρησιμοποιηθεί έλεγχος υστέρησης στο τελικό στάδιο της οδήγησης των διακοπτικών στοιχείων, το ρεύμα εξόδου του θα ρυθμιζόταν στο λανθασμένο ρεύμα αναφοράς. Συνεπώς εδώ ο μετατροπέας θα εμφάνιζε μια μεγαλύτερη καθυστέρηση στην απόκρισή του σε σχέση με τις δύο άλλες τεχνικές και η οποία θα εξαρτάται από την ταχύτητα με την οποία το PLL θα επανασυγχρονιστεί με την τερματική τάση του δικτύου, ώστε τελικά η ενεργός και η άεργος ισχύς εξόδου να είναι οι επιθυμητές.

Τέλος, μια άλλη τεχνική ελέγχου η οποία χρησιμοποιείται ευρέως [15], [16], [18] φαίνεται στο Σχ. 3.13. Σύμφωνα με το σχήμα αυτό, χρησιμοποιείται ένας πολύ γρήγορος εσωτερικός βρόχος ελέγχου ο οποίος ρυθμίζει τα ρεύματα εξόδου του μετατροπέα στα ρεύματα αναφοράς. Όσον αφορά τα ρεύματα αναφοράς, αυτά διαμορφώνονται από έναν βραδύτερο εξωτερικό βρόχο ελέγχου με τον οποίο ρυθμίζεται η ενεργός και η άεργος ισχύς που εγχέεται στο δίκτυο. Η τεχνική αυτή μοιάζει αρκετά με αυτή της τεχνικής του Σχ. 3.9, μόνο που εδώ χρησιμοποιούνται βρόχοι ελέγχου και σε επίπεδο ισχύος. Οπότε και εδώ τα ρεύματα που συνθέτει ο μετατροπέας είναι εκφρασμένα στο πλαίσιο του PLL, το οποίο όπως έχει αναφερθεί δεν είναι πάντα ακριβώς συγχρονισμένο με την τερματική τάση του δικτύου. Στην τεχνική του Σχ. 3.9 ο μετασχηματισμός των ρευμάτων αναφοράς γίνεται στο πλαίσιο του PLL, στο οποίο είναι εκφρασμένα και τα ρεύματα αναφοράς, με αποτέλεσμα ο μετατροπέας να μην επηρεάζεται από το σφάλμα εκτίμησης της φάσης. Όμως και με αυτή την τεχνική, επειδή χρησιμοποιούνται οι εξωτερικοί βρόχοι ελέγχου για την ενεργό και άεργο ισχύ (Σχ. 3.13), τα ρεύματα αναφοράς dq άξονα διαμορφώνονται κατά τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να τείνουν να μηδενίσουν το σφάλμα μεταξύ ισχύος αναφοράς και μετρούμενης ισχύος. Οπότε ακόμα και αν υπάρξει κάποιο σφάλμα στο

PLL, η προσωρινή εσφαλμένη φάση που θα αποκτήσει το ρεύμα εξόδου, θα ‘ανιχνευτεί’ εμμέσως από την μετρούμενη ενεργό και άεργο ισχύ οι οποίες σε αυτή τη χρονική στιγμή θα είναι διαφορετικές από τις ισχύεις αναφοράς. Έτσι αυτομάτως τα προκύπτοντα σφάλματα που οδηγούν τους PI ελεγκτές θα αναπροσαρμόσουν κατάλληλα τα ρεύματα αναφοράς έτσι ώστε η μετρούμενη ενεργός και άεργος ισχύς να ξαναγίνουν ίσες με τις τιμές αναφοράς. Βέβαια στο ενδιαμέσο χρονικό διάστημα θα υπάρξει μια απόκλιση μεταξύ της ισχύος αναφοράς και της ισχύος που εγγέεται στο δίκτυο, αλλά δεν θα διαρκέσει τόσο όσο χρειάζεται το PLL για να επανασυγχρονιστεί.



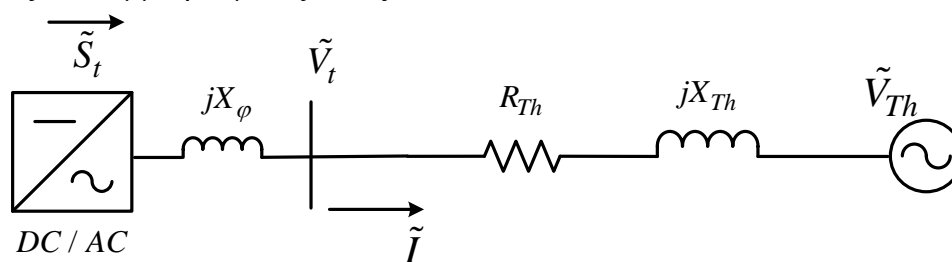
Σχήμα 3.13 : Εναλλακτική τεχνική ελέγχου του μετατροπέα [15].

Συμπερασματικά λοιπόν με την συγκεκριμένη τεχνική ελέγχου το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα θα ρυθμίζεται ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος. Επίσης ο εξωτερικός βρόχος ελέγχου αναδιαμορφώνει τα ρεύματα αναφοράς σε περίπτωση όπου εμφανιστεί κάποιο σφάλμα στην εκτίμηση της φάσης που δίνει το PLL. Οπότε εδώ η ταχύτητα απόκρισης του μετατροπέα εξαρτάται κυρίως από τα χαρακτηριστικά των PI ελεγκτών του Σχ. 3.13, καθώς και από τις χρονικές καθυστερήσεις που εισάγουν οι μετρήσεις των μεγεθών που ανατροφοδοτούνται στους βρόχους ελέγχου. Ο εσωτερικός βρόχος ελέγχου εμφανίζει μια μικρή καθυστέρηση η οποία οφείλεται στην επαγωγική αντίδραση που παρεμβάλλεται μεταξύ του μετατροπέα και του δικτύου [57]. Έτσι με μια μεταβολή της τάσης του μετατροπέα (που προκύπτει από τα σήματα v_d , v_q), το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα δεν θα μεταβληθεί με τον ίδιο ρυθμό. Επιπρόσθετα η απόκριση του μετατροπέα εξαρτάται από την ταχύτητα με την οποία διαμορφώνονται τα ρεύματα αναφοράς από τους βραδύτερους εξωτερικούς βρόχους της ενεργού και αέργου ισχύος.

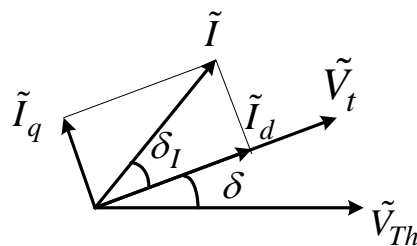
3.4 Διερεύνηση δυνατότητας ανεξάρτητου ελέγχου ενεργού και αέργου συνιστώσας του ρεύματος εξόδου συναρτήσει των συνθηκών του δικτύου

Στόχος της συγκεκριμένης παραγράφου είναι να διερευνηθεί κατά πόσο τα ρεύματα αναφοράς που διαμορφώνονται από τους ελεγκτές του DC/AC μετατροπέα μπορούν όντως να απορροφηθούν από το δίκτυο στο οποίο είναι συνδεδεμένη η διάταξη. Εμείς γνωρίζουμε ότι ο μετατροπέας χρησιμοποιεί ως διάνυσμα αναφοράς την τάση μετά το φίλτρο που χρησιμοποιείται στην έξοδό του και βάσει αυτής συνθέτει το ρεύμα εξόδου του, έτσι ώστε αυτό να έχει την κατάλληλη διαφορά φάσης και να επιτευχθεί έτσι η επιθυμητή ροή ενεργού και αέργου ισχύος.

Η ανάλυση που ακολουθεί ισχύει στην περίπτωση όπου οι τρεις φάσεις εμφανίζουν συμμετρία μεταξύ τους.



(α)



(β)

Σχήμα 3.14 : (α) κυκλωματική αναπαράσταση του ισοδύναμου κυκλώματος (ανά φάση) κατά Thevenin που βλέπει ο μετατροπέας (β) διανυσματικό διάγραμμα τάσεων και ρευμάτων του προηγούμενου κυκλώματος

Στο Σχ. 3.14.α έχει σχεδιαστεί η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση κατά Thevenin του δικτύου έτσι όπως την βλέπει ο μετατροπέας και επίσης φαίνεται και η ισοδύναμη τάση κατά Thevenin του δικτύου. Η σύνθετη αντίσταση δίνεται από τη παρακάτω σχέση :

$$Z_{Th} = R_{Th} + jX_{Th} = |Z_{Th}| \angle \delta_Z \quad (3.15)$$

Επίσης φαίνεται και το διανυσματικό διάγραμμα τάσεων και ρευμάτων, όπου δ είναι η διαφορά φάσης μεταξύ των \tilde{V}_t και \tilde{V}_{Th} , και δ_I είναι η γωνία η οποία συνθέτει ο μετατροπέας μεταξύ του ρεύματος εξόδου και της τερματικής τάσης.

Το ερώτημα είναι αν υπάρχει λύση για την τάση \tilde{V}_t , ρυθμίζοντας το ρεύμα \tilde{I} ελεύθερα χωρίς περιορισμούς. Η παρακάτω ανάλυση ισχύει σε ανά μονάδα τιμές.

Θεωρώντας ως διάνυσμα αναφοράς το \tilde{V}_t ισχύει :

$$S_t = V_t \cdot I_d - jV_t \cdot I_q \quad (3.16)$$

Όπου :

$$I_d = I \cdot \cos \delta_I \quad (3.17)$$

$$I_q = I \cdot \sin \delta_I \quad (3.18)$$

Αντικαθιστώντας τις (3.17), (3.18) στην (3.16) προκύπτει :

$$S_t = V_t \cdot I \cos \delta_I - jV_t \cdot I \sin \delta_I \quad (3.19)$$

Θεωρώντας ως διάνυσμα αναφοράς το \tilde{V}_{Th} ισχύει :

$$S_t = \tilde{V}_t \cdot \tilde{I}^* \quad (3.20)$$

Όπου :

$$\tilde{I}^* = \left(\frac{\tilde{V}_t - V_{Th}}{Z_{Th}} \right)^* = \frac{V_t}{|Z_{Th}|} \angle (-\delta + \delta_Z) - \frac{V_{Th}}{|Z_{Th}|} \angle (\delta_Z) \quad (3.21)$$

Αντικαθιστώντας την (3.21) στην (3.20) προκύπτει :

$$S_t = \frac{V_t^2}{|Z_{Th}|} \cos \delta_Z - \frac{V_t \cdot V_{Th}}{|Z_{Th}|} \cos(\delta + \delta_Z) + j \left(\frac{V_t^2}{|Z_{Th}|} \sin \delta_Z - \frac{V_t \cdot V_{Th}}{|Z_{Th}|} \sin(\delta + \delta_Z) \right) \quad (3.22)$$

Εξισώνοντας πραγματικά και φανταστικά μέρη των σχέσεων (3.19) και (3.22) προκύπτει :

$$\begin{aligned} V_t \cdot I \cos \delta_I &= \frac{V_t^2}{|Z_{Th}|} \cos \delta_Z - \frac{V_t \cdot V_{Th}}{|Z_{Th}|} \cos(\delta + \delta_Z) \\ \eta \cos(\delta + \delta_Z) &= \frac{V_t \cos \delta_Z - |Z_{Th}| \cdot I \cos \delta_I}{V_{Th}} \end{aligned} \quad (3.23)$$

Και

$$\begin{aligned} -V_t \cdot I \sin \delta_I &= \frac{V_t^2}{|Z_{Th}|} \sin \delta_Z - \frac{V_t \cdot V_{Th}}{|Z_{Th}|} \sin(\delta + \delta_Z) \\ \eta \sin(\delta + \delta_Z) &= \frac{V_t \sin \delta_Z + |Z_{Th}| \cdot I \sin \delta_I}{V_{Th}} \end{aligned} \quad (3.24)$$

Από τις (3.23), (3.24) προκύπτει, απαλείφοντας τη γωνία $\delta + \delta_Z$:

$$\cos^2(\delta + \delta_Z) + \sin^2(\delta + \delta_Z) = 1$$

Απ' όπου τελικά προκύπτει :

$$V_t^2 - 2|Z_{Th}| \cdot I \cos(\delta_I + \delta_Z) \cdot V_t + (|Z_{Th}| \cdot I)^2 - V_{Th}^2 = 0 \quad (3.25)$$

Βλέπουμε λοιπόν πως η (3.25) είναι μια δευτεροβάθμια εξίσωση η οποία δίνει την λύση για την τερματική τάση V_t . Η διακρίνουσα της εξίσωσης (3.25) είναι η ακόλουθη :

$$\Delta = -4|Z_{Th}|^2 \cdot I^2 \sin^2(\delta_I + \delta_Z) + 4V_{Th}^2 \quad (3.26)$$

Συνεπώς για να υπάρχει λύση στο πρόβλημα θα πρέπει :

$$-4|Z_{Th}|^2 \cdot I^2 \sin^2(\delta_I + \delta_Z) + 4V_{Th}^2 \geq 0$$

Απ' όπου τελικά προκύπτει :

$$I |\sin(\delta_I + \delta_Z)| \leq \frac{V_{Th}}{|Z_{Th}|} \quad (3.27)$$

Η συνθήκη (3.27) μας δείχνει πότε υπάρχει λύση για την τερματική τάση. Όμως αν υπάρχει λύση αυτό σημαίνει πως τα ρεύματα αναφοράς που έχει συνθέσει ο μετατροπέας μπορούν όντως να εγχυθούν στο δίκτυο, ενώ στην αντίθετη περίπτωση αυτό δεν ισχύει.

Αν κατά τη διάρκεια σοβαρών σφαλμάτων, στα οποία η ισοδύναμη τάση κατά Thevenin θα έχει πολύ μικρή τιμή, ο μετατροπέας συνθέσει ρεύματα αναφοράς σε κάθε φάση τέτοια ώστε να παραβιάζεται η (3.27) τότε δεν θα μπορούν να εγχυθούν τα ρεύματα αυτά στο δίκτυο με αποτέλεσμα ο μετατροπέας να οδηγηθεί σε ασταθή συμπεριφορά, γιατί θα προσπαθεί συνεχώς να συνθέσει ρεύματα τα οποία στην πραγματικότητα δεν θα μπορούν να εγχυθούν στο δίκτυο.

Το σημαντικό πρόβλημα είναι πως δεν γνωρίζουμε τα V_{Th} , Z_{Th} που ισχύουν κάθε στιγμή στο δίκτυο [7], οπότε ο μετατροπέας θα πρέπει να διαθέτει κατάλληλη τεχνική ελέγχου σε περίπτωση όπου ανιχνεύσει ότι οδηγείται σε ασταθή συμπεριφορά λόγω των παραπάνω αιτιών και να αναπροσαρμόσει την στρατηγική με την οποία εγχέει ενεργό και άεργο ισχύ στο δίκτυο [7]. Σύμφωνα και με την αναφορά [9], υπάρχει η δυσκολία στο να ορίσουμε κατάλληλα την ενεργό και άεργο ισχύ του μετατροπέα όταν η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης είναι 0.

Για παράδειγμα έστω ότι γίνεται ένα στερεό τριφασικό σφάλμα στο σημείο κοινής σύνδεσης (ΣΚΣ). Τότε για το ισοδύναμο κατά Thevenin του δικτύου ισχύει ότι $V_{Th} = 0$, $R_{Th} = R_l$ και $X_{Th} = X_l$, όπου R_l , X_l είναι η αντίσταση και αντίδραση που παρεμβάλλεται μεταξύ μετατροπέα και σημείου κοινής σύνδεσης.

Σε αυτή την περίπτωση, σύμφωνα με την συνθήκη (3.27) ο μετατροπέας δεν θα οδηγηθεί σε ασταθή λειτουργία αν και μόνο αν ισχύει :

$$\begin{aligned} I |\sin(\delta_I + \delta_Z)| &\leq 0 \\ \text{ή} \quad \sin(\delta_I + \delta_Z) &= 0 \\ \text{ή} \quad \delta_I &= -\delta_Z \end{aligned} \quad (3.28)$$

Η σχέση (3.28) δείχνει το προφανές, ότι δηλαδή ο μετατροπέας θα τροφοδοτεί μόνο την σύνθετη αντίσταση που παρεμβάλλεται μεταξύ αυτού και του ΣΚΣ. Δηλαδή υπάρχει μοναδική λύση στην περίπτωση αυτή, οπότε η ενεργός και άεργος συνιστώσα του ρεύματος εξόδου έχουν συγκεκριμένη εξάρτηση μεταξύ τους (εξάρτηση από το όρισμα της σύνθετης αντίστασης) και δεν μπορούν να ρυθμιστούν ελεύθερα. Οπότε σε κώδικες όπου απαιτείται η Α/Γ να παραμένει σε λειτουργία και να τροφοδοτεί το δίκτυο ακόμα και όταν η τάση είναι μηδέν (Zero Voltage Ride Through) θα πρέπει ο μετατροπέας πλευράς δικτύου να ανιχνεύει πόση ενεργό και άεργο ισχύ μπορεί να εγχύσει στο δίκτυο έτσι ώστε να παραμείνει σε ευσταθή λειτουργία.

Επίσης μια απλούστερη λύση στο πρόβλημα αυτό είναι μόλις η βύθιση τάσης υπερβεί κάποιο όριο, τότε να δοθεί μια προκαθορισμένη τιμή για την ενεργό και άεργο ισχύ αναφοράς [7]. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η προαναφερθείσα λύση για την περίπτωση μεγάλης βύθισης τάσης. Συγκεκριμένα, μόλις η τερματική τάση της ανεμογεννήτριας μειωθεί κάτω από ένα όριο, το οποίο θα υποδηλώνει ότι η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης είναι πολύ κοντά στο μηδέν, η προκαθορισμένη τιμή που θα δοθεί στο ενεργό και άεργο ρεύμα του μετατροπέα εξάγεται από το όρισμα της σύνθετης αντίστασης που παρεμβάλλεται μεταξύ μετατροπέα – σημείου κοινής σύνδεσης. Με άλλα λόγια θα χρησιμοποιηθεί η σχέση (3.28), προκειμένου να ικανοποιείται η συνθήκη (3.27). Επίσης θεωρούμε ότι η παραπάνω ρύθμιση γίνεται ακαριαία μόλις η τερματική τάση μειωθεί κάτω του ορίου, παρακάμπτοντας δηλαδή τους όποιους βρόχους ελέγχου χρησιμοποιεί ο μετατροπέας στην προκαθορισμένη λειτουργία του, όπως για παράδειγμα αυτούς του Σχ. 3.13. Αυτή η θεώρηση γίνεται προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι σε μια ενδεχόμενη απότομη και μεγάλη βύθιση της τάσης του δικτύου, δεν θα υπάρξει κάποια καθυστέρηση στην υλοποίηση του ρεύματος εξόδου στην προκαθορισμένη τιμή, διότι σε διαφορετική περίπτωση κατά την διάρκεια αυτής της καθυστέρησης δεν θα ικανοποιείται η συνθήκη (3.27), με αποτέλεσμα ο μετατροπέας να μην προλάβει να ρυθμιστεί σωστά και να οδηγηθεί σε αστάθεια.

Βέβαια η παραπάνω ρύθμιση δεν αποκλείει την πιθανότητα ο μετατροπέας να οδηγηθεί σε αστάθεια γιατί μπορεί να συμβεί κάποιο σφάλμα πιο μακριά από το σημείο κοινής σύνδεσης με αποτέλεσμα το όρισμα της σύνθετης αντίστασης που βλέπει ο μετατροπέας να είναι διαφορετικό από το όρισμα της σύνθετης αντίστασης μεταξύ μετατροπέα – ΣΚΣ, βάσει του οποίου θα ρυθμιστεί το ρεύμα εξόδου του. Σε αυτή την περίπτωση αν το σφάλμα είναι σοβαρό υπάρχει πάλι η πιθανότητα να παραβιαστεί η συνθήκη (3.27). Η λύση που αναφέρθηκε αποτελεί μια πρώτη προσέγγιση στο εξεταζόμενο πρόβλημα που τουλάχιστον μειώνει τη πιθανότητα ο μετατροπέας να οδηγηθεί σε αστάθεια, ή με άλλα λόγια το ρεύμα αναφοράς που θα διαμορφώσει να μπορεί όντως να απορροφηθεί από το δίκτυο.

Η ανάλυση των παραπάνω γίνεται ακόμα πολυπλοκότερη σε συνθήκες ασυμμετρίας του δικτύου, ασύμμετρων σφαλμάτων κλπ. Σε αυτές τις περιπτώσεις θα πρέπει να γίνεται ανάλυση σε συνιστώσες θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΕ ΠΛΗΡΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ

4.1 Παραδοχές

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί το μοντέλο που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία για μελέτες ευστάθειας. Στην συνέχεια αναφέρονται οι παραδοχές που γίνονται στα επιμέρους συστήματα.

Οι βασικές παραδοχές είναι οι ακόλουθες:

- Η dc τάση του πυκνωτή μεταξύ του DC/DC μετατροπέα και του DC/AC μετατροπέα θεωρείται πρακτικά σταθερή. Είτε η dc τάση ελέγχεται από τον DC/DC μετατροπέα είτε από τον DC/AC μετατροπέα, ο πολύ γρήγορος ρυθμός προσαρμογής της (ο οποίος εξαρτάται από την χωρητικότητα C) σε συνδυασμό με την ακόμα γρηγορότερη απόκριση των μετατροπέων, οι οποίοι λειτουργούν σε διακοπτικές συχνότητες της τάξης των kHz, έχει ως αποτέλεσμα η τάση αυτή να ρυθμίζεται σε λίγα msec μετά από μια διαταραχή, με αποτέλεσμα να εμφανίζει μόνο μικρές διακυμάνσεις. Το παραπάνω επιβεβαιώνεται και από προσομοιώσεις που παρουσιάζονται στα [24], [33], [54]. Έτσι μπορούμε να αμελήσουμε την δυναμική συμπεριφορά του πυκνωτή για μελέτες ευστάθειας όπου όπως αναφέρθηκε στο Κεφ. 1 ενδιαφέρουν μεταβατικά φαινόμενα στην κλίμακα 0.1-10sec.
- Αμελείται η δυναμική συμπεριφορά των διακοπτικών στοιχείων του DC/AC μετατροπέα. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να μελετηθεί η ενεργός τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας του ρεύματος εξόδου του μετατροπέα. Η προσομοίωση των συστημάτων οδήγησης των διακοπτικών στοιχείων θα ήταν αναγκαία κυρίως για την μελέτη των αρμονικών εκπομπών του μετατροπέα, πράγμα που εδώ δεν εξετάζεται. Όπως εξηγήθηκε και στο Κεφ. 3, η ταχύτητα απόκρισης του μετατροπέα είναι πολύ υψηλή, οπότε στην ουσία ως προς το δίκτυο συμπεριφέρεται σαν μια ελεγχόμενη πηγή ρεύματος. Συμπερασματικά λοιπόν για την μοντελοποίηση του μετατροπέα θα ληφθεί υπόψη μόνο μια μικρή χρονική καθυστέρηση [5], [13], [28] η οποία αναπαριστά την απόκριση των χρησιμοποιούμενων βρόχων ελέγχου του, όπως για παράδειγμα τους βρόχους του Σχ. 3.13.
- Αμελείται η δυναμική συμπεριφορά για τον καθορισμό της φάσης της τερματικής τάσης. Όπως εξηγήθηκε στο κεφάλαιο 3, στην πλειοψηφία των χρησιμοποιούμενων τεχνικών ελέγχου, τα ρεύματα αναφοράς καθορίζονται με

τέτοιο τρόπο ώστε το εγγεόμενο ρεύμα εξόδου του μετατροπέα δεν επηρεάζεται από το σφάλμα στην εκτίμηση της φάσης. Δηλαδή ως προς το δίκτυο η εκτιμώμενη φάση που PLL αποτελεί εσωτερική μεταβλητή του μετατροπέα, οπότε η μοντελοποίησή του εδώ δεν είναι αναγκαία.

- Αμελείται η ελαστικότητα του κοινού άξονα που συνδέει την πτερωτή με τον δρομέα της γεννήτριας. Θεωρούμε ότι υπάρχει κατάλληλη διάταξη η οποία αποσβένει τις στρεπτικές ταλαντώσεις που δημιουργούνται στην γωνιακή ταχύτητα της Α/Γ μετά από μια διαταραχή, όπως περιγράφεται και στην παράγραφο 2.5. Επίσης όταν μελετάται ένα αιολικό πάρκο που αποτελείται από πολλές ανεμογεννήτριες (όπως θα γίνει στην παρούσα εργασία), τότε οι προκύπτουσες ταλαντώσεις μεταξύ των Α/Γ έχουν στατιστικό χαρακτήρα, με αποτέλεσμα η ισχύς εξόδου του Α/Π να εξομαλύνεται [29].

- Δεν μοντελοποιείται το ηλεκτρικό μέρος της γεννήτριας [29]. Η τοπολογία που μελετάται στην παρούσα εργασία (full converter unit) είναι τέτοια που αποδεσμεύει πλήρως τα ηλεκτρικά μεταβατικά της γεννήτριας από το δίκτυο. Συνεπώς η ηλεκτρική δυναμική συμπεριφορά της γεννήτριας δεν γίνεται ‘αντιληπτή’ από πλευράς δικτύου, γιατί αυτός που εγγχεί ενεργό και άεργο ισχύ είναι ο DC/AC μετατροπέας ο οποίος ελέγχεται ανεξάρτητα από την δυναμική συμπεριφορά της γεννήτριας. Η μόνη σύνδεση που υπάρχει μεταξύ μετατροπέα – γεννήτριας είναι στην ενεργό ισχύ που μεταφέρεται μέσω της dc σύνδεσης που υπάρχει στην διάταξη. Δεδομένης της πρώτης παραδοχής, δεν υπάρχει αποθήκευση ενέργειας στον πυκνωτή, οπότε η ενεργός ισχύς της γεννήτριας είναι ίση με την εγγεόμενη ενεργό ισχύ στο δίκτυο. Άρα αυτό που είναι αναγκαίο στην μοντελοποίηση είναι το μηχανικό μέρος της διάταξης, καθώς η ενεργός ισχύς εξαρτάται αποκλειστικά από τις στροφές της Α/Γ (στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος).

Συμπερασματικά λοιπόν τα υποσυστήματα που θα παρασταθούν στο συγκεκριμένο μοντέλο είναι τα ακόλουθα :

- Αεροδυναμικό Μέρος – Ανεμοκινητήρας
- Μηχανικό Μέρος – Αδράνεια, επιτάχυνση άξονα
- Ρυθμιστής Γωνίας Βήματος Πτερυγίων
- Στρατηγική μεγιστοποίησης της αεροδυναμικής ισχύος
- DC/AC μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου (έγχυση ενεργού και αέργου ρεύματος)

4.2 Παράσταση αεροδυναμικού και μηχανικού μέρους

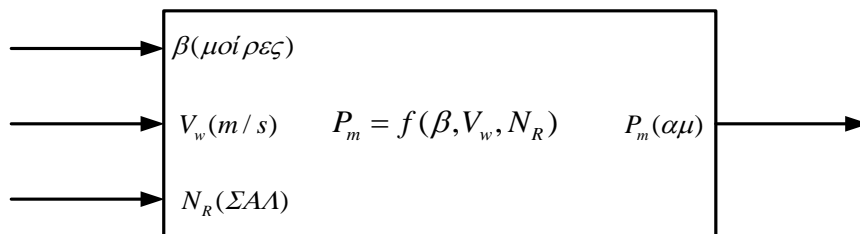
Καταρχάς σε αυτό το στάδιο θα πρέπει να γίνεται ο υπολογισμός της εκάστοτε παραγόμενης αεροδυναμικής ισχύος. Οπότε θα γίνεται χρήση της σχέσης (2.3), η οποία παρατίθεται και εδώ για ευκολία :

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot V_w^3 \quad (4.1)$$

Συνεπώς το διάγραμμα βαθμίδων το οποίο θα μοντελοποιεί το αεροδυναμικό μέρος θα πρέπει να έχει τρεις εισόδους οι οποίες είναι οι εξής :

- η τιμή της ταχύτητας ανέμου V_w (m/sec).
- η τιμή της ταχύτητας περιστροφής του άξονα της ανεμογεννήτριας N_R (ΣΑΛ).
- η τιμή της γωνίας βήματος έλικας β (σε μοίρες).

Το διάγραμμα της υλοποίησης των παραπάνω φαίνεται απλοποιημένα στο Σχ. 4.1. Σημειώνεται πως επειδή οι τιμές των ηλεκτρικών μεγεθών που θα χρησιμοποιηθούν θα είναι κανονικοποιημένες, στην έξοδο της βαθμίδας αυτής η μηχανική ισχύς θα είναι επίσης κανονικοποιημένη (ανά μονάδα).



Σχήμα 4.1 : Διάγραμμα υπολογισμού αεροδυναμικής ισχύος

Για την παράσταση του μηχανικού μέρους χρησιμοποιείται η εξίσωση επιταχύνσεως της μηχανής η οποία σε φυσικές μονάδες είναι η ακόλουθη :

$$T_M - T_E = J \frac{d\omega_M}{dt} \quad (4.2)$$

όπου ω_M : η μηχανική γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα (σε rad/sec)

J : η ροπή αδράνειας του στρεφόμενου μηχανικού μέρους της διάταξης (γεννήτριας και πτερωτής) σε $\text{Kg}\cdot\text{m}^2$

Η ανηγμένη σταθερά αδρανείας σε sec ορίζεται ως :

$$H = \frac{1}{2} \frac{J \cdot \omega_{Mnom}^2}{S_b} \quad (4.3)$$

όπου ω_{Mnom} : η ονομαστική τιμή της μηχανικής γωνιακής ταχύτητας περιστροφής του δρομέα (σε rad/sec)

S_b : η θεωρούμενη βασική ισχύς (σε MVA)

Δηλαδή η σταθερά αυτή εκφράζει την κινητική ενέργεια της διάταξης υπό ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας, διαιρεμένη με την βασική ισχύ.

Εύκολα συμπεραίνεται ότι ως βασική ροπή επιλέγεται η ακόλουθη :

$$T_b = \frac{S_b}{\omega_{Mnom}} \quad (4.4)$$

Διαιρώντας την εξίσωση κίνησης (4.2) με την βασική ροπή T_b από την (4.4) προκύπτει :

$$\frac{T_M - T_E}{T_b} = \frac{J \cdot \frac{d\omega_M}{dt}}{T_b}$$

$$\text{ή } T_m - T_e = \frac{1}{T_b} J \frac{d\omega_M}{dt} \quad (4.5)$$

Από την σχέση (4.3) της σταθεράς αδρανείας προκύπτει :

$$J = \frac{2HS_b}{\omega_{Mnom}^2} \quad (4.6)$$

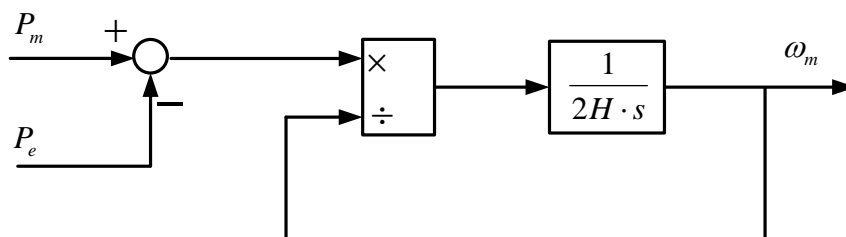
Επομένως αντικαθιστώντας την (4.6) στην (4.5) προκύπτει :

$$T_m - T_e = 2H \frac{d\left(\frac{\omega_M}{\omega_{Mnom}}\right)}{dt}$$

Συνεπώς η εξίσωση κίνησης στο ανά μονάδα σύστημα γίνεται :

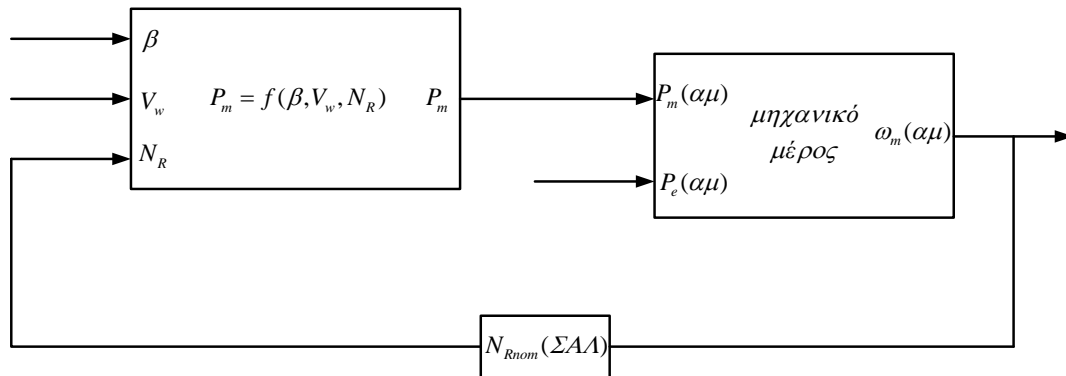
$$T_m - T_e = 2H \frac{d\omega_m}{dt} \quad (4.7)$$

Το διάγραμμα που περιγράφει το μηχανικό μέρος έχει σαν εισόδους την μηχανική ισχύ της γεννήτριας και την ηλεκτρική της ισχύ, και σαν έξοδο τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας. Όπως έχει ειπωθεί, αγνοείται η ελαστικότητα του κοινού άξονα που συνδέει την περωτή της Α/Γ με την ίδια την γεννήτρια. Το διάγραμμα αυτό φαίνεται στο Σχ. 4.2. Στο σχήμα αυτό γίνεται η κατάλληλη μετατροπή από τιμές ισχύος σε τιμές ροπής οι οποίες καθορίζουν τον ρυθμό μεταβολής των στροφών της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 4.2 : Διάγραμμα βαθμίδων μηχανικού μέρους

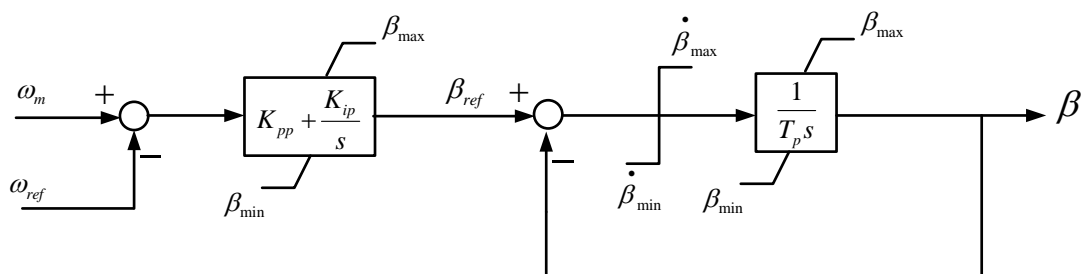
Συμπερασματικά η σύνδεση του αεροδυναμικού μέρους με το μηχανικό φαίνεται στο διάγραμμα βαθμίδων του Σχ. 4.3. Σημειώνεται πως επειδή στην έξοδο του μηχανικού μέρους η γωνιακή ταχύτητα είναι σε ανά μονάδα τιμή, γίνεται πολλαπλασιασμός με ονομαστικές στροφές της Α/Γ ώστε στο αεροδυναμικό μέρος η είσοδος να είναι σε ΣΑΛ.



Σχήμα 4.3 : Σύνδεση αεροδυναμικού με μηχανικό μέρος

4.3 Παράσταση ρυθμιστή γωνίας βήματος πτερυγίων

Στόχος του ρυθμιστή γωνίας βήματος των πτερυγίων είναι να διατηρεί την ταχύτητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας σε μια μέγιστη τιμή για υψηλές ταχύτητες ανέμου (πέραν της ονομαστικής), μέσω κατάλληλης ρύθμισης της γωνίας βήματος. Οπότε η καταλληλότερη στρατηγική ελέγχου έγκειται στην παρακολούθηση της ταχύτητας περιστροφής της ανεμογεννήτριας και μόλις αυτή υπερβεί μια ονομαστική τιμή (μέγιστη τιμή) τότε το σφάλμα αυτό τροφοδοτείται σε έναν αναλογικό-ολοκληρωτικό ελεγκτή ο οποίος δρα στον σερβομηχανισμό της διάταξης. Η έξοδος του ελεγκτή δίνει την επιθυμητή τιμή της γωνίας βήματος, με τον σερβομηχανισμό της διάταξης να δρα κατάλληλα ώστε η πραγματική τιμή της γωνίας να γίνει ίση με την γωνία που του δίνεται σαν αναφορά. Συμπερασματικά η μοντελοποίηση του ρυθμιστή αυτού φαίνεται στο Σχ. 4.4.



Σχήμα 4.4 : Διάγραμμα βαθμίδων του ρυθμιστή γωνίας βήματος

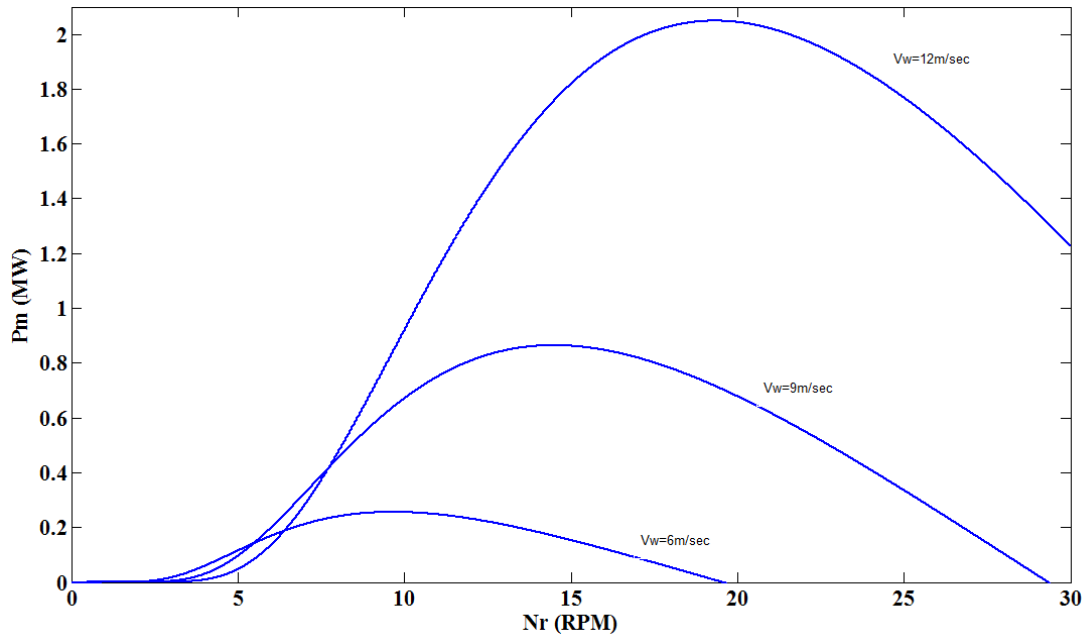
Όσον αφορά τον σερβομηχανισμό της διάταξης, χρησιμοποιείται ένας ολοκληρωτής με σταθερά χρόνου T_p , ο οποίος αναπαριστά την ταχύτητα απόκρισης του μηχανισμού αυτού. Τέλος, χρησιμοποιείται και ένας περιοριστής με όρια ρυθμού μεταβολής πριν από τον ολοκληρωτή, ο οποίος αναπαριστά τον μέγιστο ρυθμό μεταβολής με τον οποίο ο σερβομηχανισμός μπορεί να μεταβάλλει την γωνία βήματος β . Γενικότερα, το μέγιστο όριο αλλαγής εξαρτάται από το μέγεθος των πτερυγίων της πτερωτής και την τεχνολογία (και άρα το ανάλογο κόστος) του μηχανισμού αυτού, οπότε η επίτευξη ενός ορίου είναι θέμα βελτιστοποίησης.

4.4 Παράσταση ρυθμιστή στροφών της A/Γ

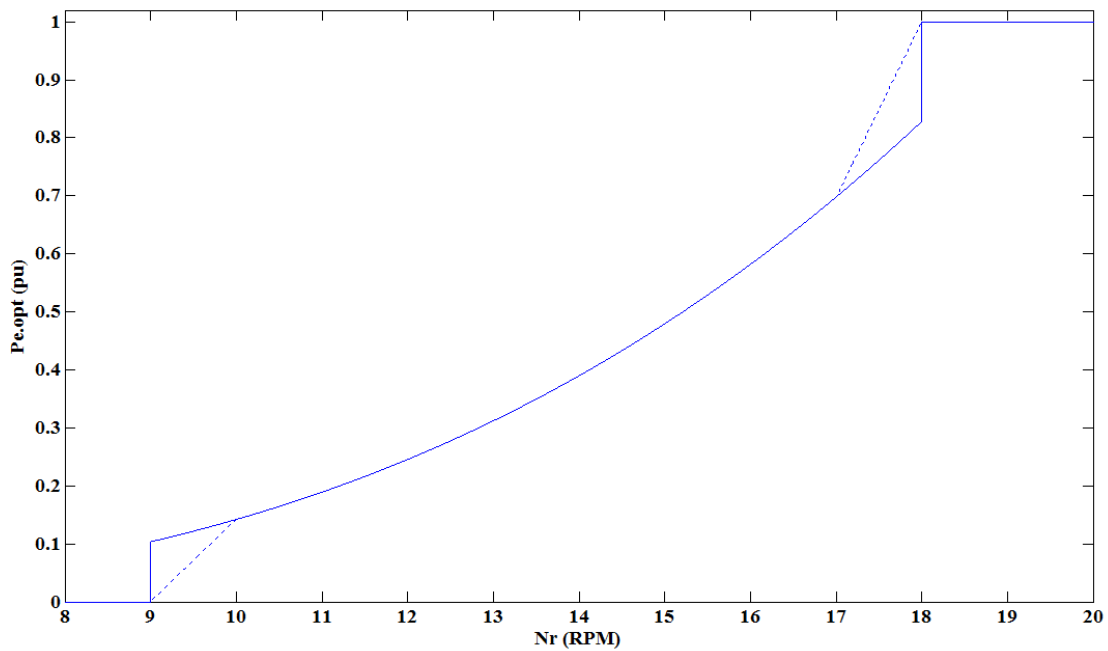
Σε αυτό το τμήμα της διάταξης εφαρμόζεται η στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος (Maximum Power Point Tracking strategy). Συγκεκριμένα, για κάθε ταχύτητα ανέμου, υπάρχει μια μοναδική ταχύτητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας, για την οποία η αεροδυναμική ισχύς που εξάγεται από τον άνεμο γίνεται μέγιστη, όπως φαίνεται και στο Σχ. 4.5. Έτσι, συλλέγοντας όλα αυτά τα ζεύγη τιμών (P_{\max}, N_R) σχηματίζεται μια καμπύλη η οποία δίνει τη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής της ανεμογεννήτριας. Η καμπύλη μέγιστης ισχύος φαίνεται στο Σχ. 4.6. Προφανώς κάθε ζεύγος ($P_{e\max}, N_R$) αντιστοιχεί σε διαφορετική ταχύτητα ανέμου. Η καμπύλη αυτή χρησιμοποιείται σε κατάλληλο ελεγκτή ο οποίος δίνει σήμα για το ποια πρέπει να είναι η ηλεκτρική ισχύς της A/Γ ανάλογα με το ποιες είναι οι στροφές της. Με την στρατηγική αυτή εξασφαλίζεται ότι στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας η ταχύτητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας θα είναι τέτοια ώστε η αεροδυναμική ισχύς να έχει την μέγιστη δυνατή τιμή, χωρίς να χρειαζόμαστε σύστημα μέτρησης της ταχύτητας ανέμου.

Το παραπάνω εξηγείται ως εξής: ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας περιστροφής της ανεμογεννήτριας εξαρτάται από την αεροδυναμική ροπή και την ηλεκτρική ροπή. Έτσι, για μια ορισμένη ταχύτητα ανέμου έχουμε δύο καμπύλες, μια καμπύλη που δίνει την αεροδυναμική ροπή συναρτήσει των στροφών της A/Γ (όπως οι καμπύλες του Σχ. 4.5) και την καμπύλη που δίνει την ηλεκτρική ροπή συναρτήσει των στροφών της A/Γ (Σχ. 4.6). Όμως η δεύτερη καμπύλη είναι σχεδιασμένη με τέτοιο τρόπο ώστε να έχει ένα και μοναδικό σημείο τομής με την καμπύλη αεροδυναμικής ροπής και αυτό είναι το σημείο όπου έχουμε τη μέγιστη δυνατή αεροδυναμική ροπή. Συνεπώς, όποια και αν είναι τα μεταβατικά που ακολουθούν μετά από μια μεταβολή στην ταχύτητα ανέμου, γνωρίζουμε ότι στην μόνιμη κατάσταση το σύστημα θα ισοροπήσει στο σημείο μεγιστοποίησης της αεροδυναμικής ισχύος.

Ο έλεγχος της ισχύος με βάση τη συνεχή γραμμή του Σχ. 4.6 δημιουργεί ορισμένα προβλήματα, διότι η επιθυμητή ισχύς δεν ορίζεται μονοσήμαντα στην μέγιστη και την ελάχιστη ταχύτητα δρομέα και επειδή αν η ταχύτητα δρομέα μειωθεί από λίγο πάνω της ονομαστικής σε λίγο κάτω, ή από λίγο κάτω της ελάχιστης σε λίγο πάνω, η αλλαγή στην παραγόμενη ισχύ θα προέκυπτε πολύ απότομη. Αυτό με τη σειρά του οδηγεί σε σημαντικές διακυμάνσεις ισχύος όταν η ταχύτητα του δρομέα είναι γύρω από την ονομαστική ή την ελάχιστη τιμή. Για την επίλυση των δυσκολιών αυτών, ακολουθήθηκε μία χαρακτηριστική ελέγχου παρόμοια με την προηγούμενη η οποία οδηγεί μεν σε υποβέλτιστη απόδοση, αλλά επιλύει τα προαναφερθέντα προβλήματα. Αυτή η χαρακτηριστική ελέγχου διακρίνεται με τη διακεκομμένη γραμμή του Σχ. 4.6.

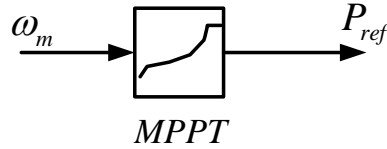


Σχήμα 4.5 : Καμπύλες μηχανικής ισχύος P_m – ταχύτητας δρομέα N_r , για διάφορες ταχύτητες ανέμου



Σχήμα 4.6 : Χαρακτηριστική ελέγχου στροφών

Τελικά η προκύπτουσα ισχύς αναφοράς P_{ref} που δίνεται είτε στον DC/DC μετατροπέα (αν αυτός υλοποιεί την στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος) είτε στον DC/AC μετατροπέα συναρτίζεται των στροφών της ανεμογεννήτριας φαίνεται απλοποιημένα στο Σχ. 4.7.



Σχήμα 4.7 : Απλοποιημένη αναπαράσταση υλοποίησης στρατηγικής MPPT

4.5 Παράσταση DC/AC μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου (grid side converter)

Η απόκριση του DC/AC μετατροπέα είναι αυτή που καθορίζει την συμπεριφορά της όλης διάταξης έτσι όπως αυτή φαίνεται από την πλευρά του δικτύου. Συνεπώς η μεγαλύτερη βαρύτητα στην μοντελοποίηση της διάταξης είναι στην κατάλληλη μοντελοποίηση του μετατροπέα αυτού.

Για την μοντελοποίησή του μετατροπέα πλευράς δικτύου θα χρησιμοποιηθεί ένα dq πλαίσιο αναφοράς το οποίο περιστρέφεται με την συχνότητα του δικτύου, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.8. Επίσης θεωρούμε ότι ο d άξονας του πλαισίου ταυτίζεται με το διάνυσμα της τερματικής τάσης. Αυτό σημαίνει πως η d συνιστώσα του πλαισίου αυτού συνδέεται με την ενεργό ισχύ που εγχέεται στο δίκτυο και η q συνιστώσα συνδέεται με την άεργο ισχύ. Εμείς μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το πλαίσιο αυτό γιατί γνωρίζουμε ότι οι αναμενόμενες τιμές (εκφρασμένες στο πλαίσιο του Σχ. 4.8) για την ενεργό και άεργο συνιστώσα του ρεύματος εξόδου, θα διαμορφωθούν από το μετατροπέα παρά το όποιο σφάλμα υπάρχει στην εκτίμηση της φάσης. Συνεπώς ο μετατροπέας πλευράς δικτύου μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μια ελεγχόμενη πηγή ρεύματος.

Άρα ο μετατροπέας στην ουσία θα εγχύσει στο δίκτυο τα ισοδύναμα ρεύματα I_{dref} , I_{qref} του πλαισίου του Σχ. 4.8.

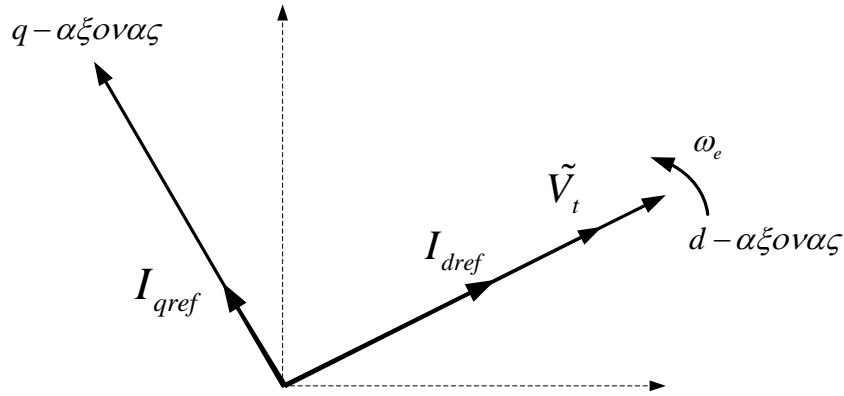
Όλα τα μεγέθη θα μελετηθούν σε ανά μονάδα τιμές. Έτσι για την τερματική τάση εκφρασμένη στο θεωρούμενο dq πλαίσιο ισχύει :

$$\begin{aligned} V_d &= V_t \\ V_q &= 0 \end{aligned}$$

Επομένως αντικαθιστώντας στις σχέσεις (2.31), (2.32) του 2^{ου} Κεφ., για τα επιθυμητά ρεύματα αναφοράς προκύπτει :

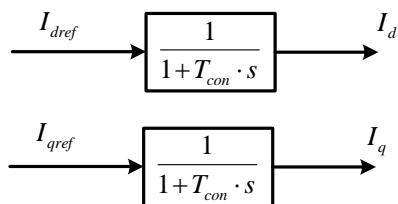
$$I_{dref} = \frac{P_{ref} V_d}{V_d^2} = \frac{P_{ref}}{V_t} \quad (4.8)$$

$$I_{qref} = \frac{-Q_{ref} V_d}{V_d^2} = -\frac{Q_{ref}}{V_t} \quad (4.9)$$



Σχήμα 4.8 : dq πλαίσιο που χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση του μετατροπέα

Στην συνολική δράση του μετατροπέα εμφανίζεται μια μικρή χρονική καθυστέρηση που έχει να κάνει με τους χρησιμοποιούμενους βρόχους ελέγχου, και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των ελεγκτών, καθώς και από τις καθυστερήσεις που εισάγουν οι μετρήσεις (χρησιμοποιούμενα φίλτρα για καταστολή αρμονικών κλπ), και οι οποίες ανατροφοδοτούνται σε αυτούς τους βρόχους ελέγχου. Για παράδειγμα, με την τεχνική ελέγχου που φαίνεται στο Σχ. 3.13, η καθυστέρηση εμφανίζεται κυρίως στην διαμόρφωση των ρευμάτων αναφοράς, τα οποία διαμορφώνονται από τους εξωτερικούς βραδύτερους βρόχους ελέγχου της ενεργού και άεργου ισχύος. Συνεπώς ο μετατροπέας πλευράς δικτύου μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μια βαθμίδα καθυστέρησης πρώτης τάξης [13], [17], [28], [29] όπως φαίνεται στο Σχ. 4.9. Ως I_{dref} , I_{qref} συμβολίζουμε τις τιμές της ενεργού και άεργου συνιστώσας που θα πρέπει να έχει το εγγεόμενο ρεύμα του μετατροπέα, ώστε τελικά η ενεργός και άεργος ισχύς που εγγέονται στο δίκτυο να είναι ίσες με τις επιθυμητές τιμές P_{ref} , Q_{ref} . Έτσι με μια μεταβολή των P_{ref} , Q_{ref} , η ενεργός και η άεργος συνιστώσα του ρεύματος εξόδου του μετατροπέα συγκλίνουν στις τιμές των σχέσεων (4.8), (4.9) με μια καθυστέρηση που εξαρτάται από την χρονική σταθερά του μετατροπέα T_{con} . Μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τιμή για την σταθερά αυτή είναι $T_{con} = 20msec$ [13], [17], [28].



Σχήμα 4.9 : Μοντελοποίηση DC/AC μετατροπέα πλευράς δικτύου

Αξίζει να σημειωθεί πως με την παραπάνω μοντελοποίηση, καθυστέρηση στην απόκριση του μετατροπέα θα εμφανιστεί ακόμα και όταν συμβεί μια μεταβολή στην τάση του δικτύου. Η συμπεριφορά αυτή συμβαδίζει περισσότερο με την τεχνική ελέγχου που έχει παρουσιαστεί στο Σχ. 3.13, όπου προκειμένου να μεταβληθεί το ρεύμα αναφοράς, θα πρέπει να προκύψει κάποιο σφάλμα μεταξύ μετρούμενης ισχύος

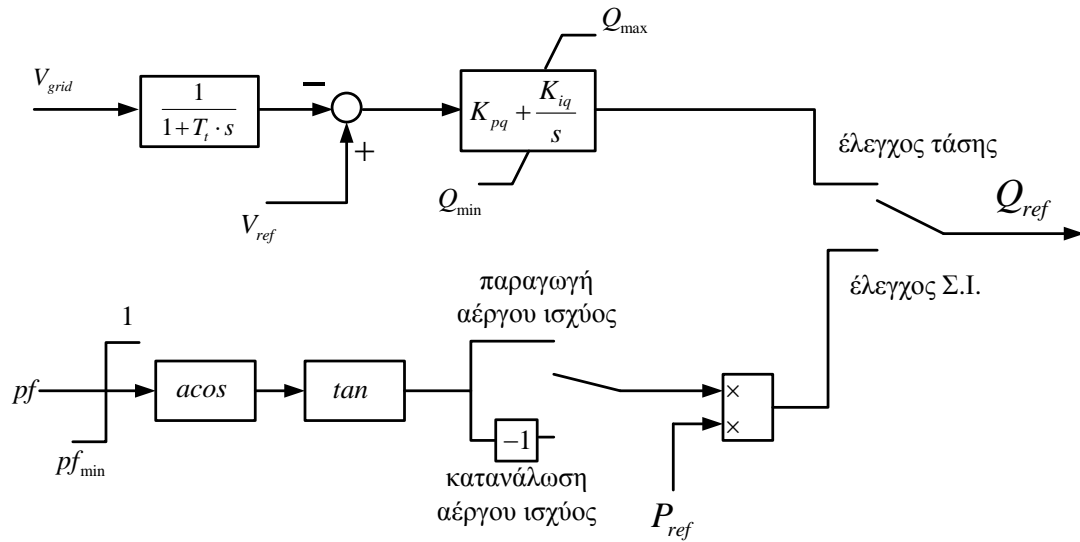
και ισχύος αναφοράς. Για παράδειγμα, με μια ξαφνική πτώση της τάσης του δικτύου, η προσωρινά μικρότερη παραγόμενη ενεργός ισχύς θα προκαλέσει αντίστοιχη αύξηση στο ενεργό ρεύμα αναφοράς προκειμένου η ισχύς αυτή να επανέλθει στην αρχική της τιμή. Αντίθετα στις τεχνικές ελέγχου που παρουσιάστηκαν στις παραγράφους 3.2 και 3.3 το ρεύμα αναφοράς προκύπτει απευθείας από αλγεβρικό υπολογισμό μεταξύ της ισχύος αναφοράς και της τάσης του δικτύου (βλέπε Σχ. 3.3, 3.4), οπότε με μια πτώση της τάσης θα προκληθεί αμέσως αύξηση στο ρεύμα αναφοράς, οπότε δεν θα παρατηρηθεί η προαναφερθείσα καθυστέρηση στη ρύθμιση του ρεύματος του μετατροπέα. Συμπερασματικά λοιπόν η μοντελοποίηση του μετατροπέα που έχει παρουσιαστεί στην ενότητα αυτή συμβαδίζει περισσότερο με την τεχνική ελέγχου που φαίνεται στο Σχ. 3.13.

Όπως φαίνεται από την σχέση (4.8), η επιθυμητή ενεργός συνιστώσα του ρεύματος του μετατροπέα διαμορφώνεται από την ενεργό ισχύ αναφοράς που προκύπτει από την στρατηγική η οποία φαίνεται στο Σχ. 4.7.

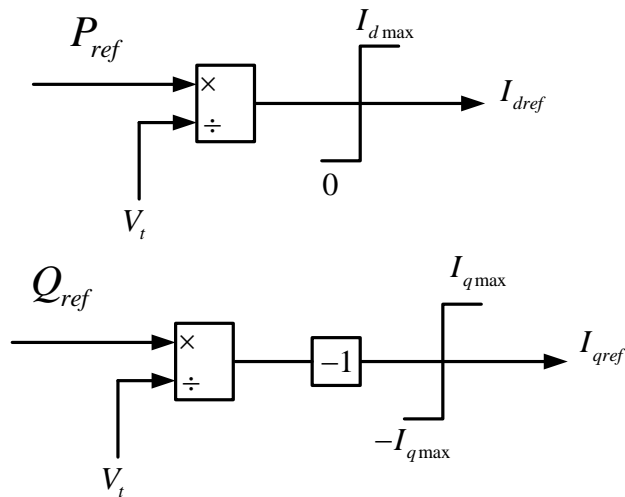
Όσον αφορά την άεργο ισχύ αναφοράς, αυτή μπορεί να καθοριστεί με δύο τρόπους, όπως φαίνεται και στο Σχ. 4.10 :

- Με έλεγχο της τάσης του ζυγού στον οποίο είναι συνδεδεμένη η ανεμογεννήτρια. Συνήθως επιλέγεται η τάση του ζυγού αμέσως μετά τον μετασχηματιστή ανύψωσης. Συνεπώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας αναλογικός-ολοκληρωτικός ελεγκτής ο οποίος στην είσοδό του δέχεται σαν σήμα την διαφορά της μετρούμενης τιμής της τάσης από μια επιθυμητή τιμή που καθορίζεται ανάλογα με τις συνθήκες του δικτύου. Στην έξοδό του ο ελεγκτής θα διαμορφώνει ένα σήμα το οποίο και θα αποτελεί την τιμή αναφοράς για την άεργο ισχύ.
- Με έλεγχο του συντελεστή ισχύος. Εδώ αντί να γίνεται μέτρηση της τερματικής τάσης, ανάλογα με το ποια είναι η τιμή αναφοράς για την ενεργό ισχύ και με μια επιθυμητή τιμή συντελεστή ισχύος (συνήθως κυμαίνεται από 0.95 επαγωγικό – 0.95 χωρητικό, ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες λειτουργίας του δικτύου, όπως πχ ζήτηση φορτίου), μέσω της σχέσης $Q = P \tan \varphi$ διαμορφώνεται μια τιμή αναφοράς για την άεργο ισχύ.

Τέλος, η μετάβαση από τις τιμές ενεργού και άεργου ισχύος αναφοράς στις επιθυμητές τιμές της ενεργού και άεργου συνιστώσας του ρεύματος εξόδου του μετατροπέα γίνεται μέσω των σχέσεων (4.8), (4.9) και φαίνεται στο Σχ. 4.11. Σημειώνεται πως στην άεργο συνιστώσα γίνεται ο πολλαπλασιασμός με -1 λόγω της σχέσης (4.8).



Σχήμα 4.10 : Εναλλακτικοί τρόποι διαμόρφωσης αέργου ισχύος αναφοράς



Σχήμα 4.11 : Καθορισμός επιθυμητών ρευμάτων d, q άξονα βάσει των τιμών ενεργού και αέργου ισχύος αναφοράς.

4.6 Μοντελοποίηση στρατηγικής αδιάλειπτης λειτουργίας (LVRT)

4.6.1 Χρήση περιοριστών ρεύματος

Οι σύγχρονοι κώδικες για την σύνδεση αιολικών πάρκων στο δίκτυο προβλέπουν την αδιάλειπτη παροχή ισχύος από αυτά κατά την διάρκεια βυθίσεων τάσης. Επιπρόσθετα θα πρέπει να αναδιαμορφώνουν την στρατηγική με την οποία εγχέουν ενεργό και άεργο ισχύ στο δίκτυο, ανάλογα βέβαια και με το επίπεδο της τάσης. Τυπικό παράδειγμα τέτοιας απαίτησης (του ισπανικού κώδικα) φαίνεται στο Σχ. 1.9 του Κεφ. 1. Αξίζει να σημειωθεί πως η απαίτηση για την συμπεριφορά των ανεμογεννητριών δίνεται ως συνάρτηση της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης.

Στο μοντέλο που έχει αναπτυχθεί στην παρούσα εργασία, η στρατηγική LVRT έχει υλοποιηθεί εισάγοντας τους περιοριστές ρεύματος που φαίνονται στο Σχ. 4.11. Οι περιοριστές αυτοί επιδρούν στα επιθυμητά ρεύματα d, q άξονα και αλλάζουν την στρατηγική με την οποία ο μετατροπέας εγχέει ενεργό και άεργο ισχύ στο δίκτυο. Αξίζει να σημειωθεί πως στο πραγματικό σύστημα ο τρόπος με τον οποίο θα υλοποιηθεί η στρατηγική αυτή εξαρτάται από την τεχνική ελέγχου του μετατροπέα. Συνεπώς σωστότερο θα ήταν οι περιοριστές στο πραγματικό σύστημα να τοποθετηθούν στις ισχείς αναφοράς P_{ref}, Q_{ref} . Έτσι ο μετατροπέας θα συνέθετε κατάλληλα τα δικά του ρεύματα αναφοράς (με την καθυστέρηση που εισάγουν οι βρόχοι ελέγχου), ώστε η ενεργός και άεργος ισχύς εξόδου να είναι η επιθυμητή.

Συμπερασματικά αν η στρατηγική LVRT εφαρμοστεί κατάλληλα στο πραγματικό σύστημα ανάλογα με την χρησιμοποιούμενη τεχνική ελέγχου του, είναι ισοδύναμο στην δική μας μοντελοποίηση με το να τοποθετήσουμε τους ισοδύναμους περιοριστές ρεύματος όπως φαίνεται στο Σχ. 4.11. Συνεπώς, αναφερόμενοι εμείς στις τιμές που θα πρέπει να έχουν οι περιοριστές αυτοί, εμμέσως υποδεικνύεται πώς θα πρέπει να γίνεται η κατάλληλη ρύθμιση στο πραγματικό σύστημα.

Καταρχάς, οι περιοριστές αυτοί θα πρέπει να ρυθμίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζουν ότι η ενεργός τιμή του ρεύματος εξόδου του μετατροπέα δεν θα πρέπει να υπερβαίνει μια μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή βάσει της οποίας είναι σχεδιασμένος. Έπειτα αφού εξασφαλιστεί αυτό, θα πρέπει να γίνεται κατάλληλη αναπροσαρμογή της ενεργού και άεργου συνιστώσας του ρεύματος, έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις για LVRT. Είναι προφανές λοιπόν πως η τιμή τους θα πρέπει να δίνεται συναρτήσει της τάσης του δικτύου στο σημείο κοινής σύνδεσης.

Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί η χαρακτηριστική του Σχ. 1.9, η οποία αναπαράγεται στο Σχ. 4.12 για ευκολότερη αναφορά. Σύμφωνα με το σχήμα αυτό, όταν η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης είναι μικρότερη από 85%, η τιμή της άεργου συνιστώσας του ρεύματος εξόδου πρέπει να βρίσκεται εντός της χρωματισμένης περιοχής, το κάτω όριο της οποίας είναι μια ευθεία, πράγμα που υποδηλώνει την αναλογική αύξηση της άεργου συνιστώσας του ρεύματος εξόδου καθώς η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης μειώνεται. Επίσης, σύμφωνα με το ίδιο σχήμα, όταν η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης είναι μικρότερη του 50%, η άεργος συνιστώσα του ρεύματος εξόδου δεν επιτρέπεται να είναι μικρότερη από το 90% του μέγιστου ρεύματος του μετατροπέα. Τα παραπάνω μπορούν να εκφραστούν ισοδύναμα στο παρόν μοντέλο μέσω κατάλληλης ρύθμισης του περιοριστή του επιθυμητού ενεργού ρεύματος I_{dmax} . Εδώ, η τιμή του περιοριστή αυτού θα είναι ίση με την μέγιστη τιμή του ρεύματος εξόδου μόνο όταν η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης είναι μεγαλύτερη του 85%. Όταν η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης είναι

50% η ελάχιστη επιτρεπτή τιμή για την άεργο συνιστώσα του ρεύματος εξόδου είναι το 90% του μέγιστου ρεύματος του μετατροπέα. Αυτό σημαίνει πως η μέγιστη επιτρεπτή τιμή για το ενεργό ρεύμα είναι:

$$I_{d_{\max}} = \sqrt{I_{\max}^2 - I_q^2} = \sqrt{1 - 0.9^2} I_{\max} = 0.44 I_{\max}$$

Η τιμή αυτή είναι και η τιμή που θα πρέπει να έχει ο περιοριστής $I_{d_{\max}}$ όταν η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης είναι 50%. Τα προαναφερθέντα ορίζουν τα δύο παρακάτω ζεύγη τιμών:

$$\begin{aligned} (V_{PCC}, I_{d_{\max}})_1 &= (85\%, I_{\max}) \\ (V_{PCC}, I_{d_{\max}})_2 &= (50\%, 0.44 I_{\max}) \end{aligned}$$

Με τα παραπάνω ζεύγη τιμών ορίζεται η ευθεία που φαίνεται στο Σχ. 4.12, έτσι ώστε να ικανοποιείται η αναλογική αύξηση του άεργου ρεύματος με την μείωση της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης. Όταν η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης είναι πολύ μικρή, όπως έχει εξηγηθεί και στην παράγραφο 3.4, ο μετατροπέας κινδυνεύει να οδηγηθεί σε αστάθεια αν δεν γίνει κατάλληλη ρύθμιση της τιμής του ρεύματος εξόδου του. Η τιμή που θα οριστεί στο παρόν μοντέλο εξάγεται από την περίπτωση όπου η τάση στο ΣΚΣ είναι 0. Σε αυτή την περίπτωση η φάση του ρεύματος εξόδου δίνεται από το όρισμα της σύνθετης αντίστασης μεταξύ αιολικού πάρκου – σημείου κοινής σύνδεσης.

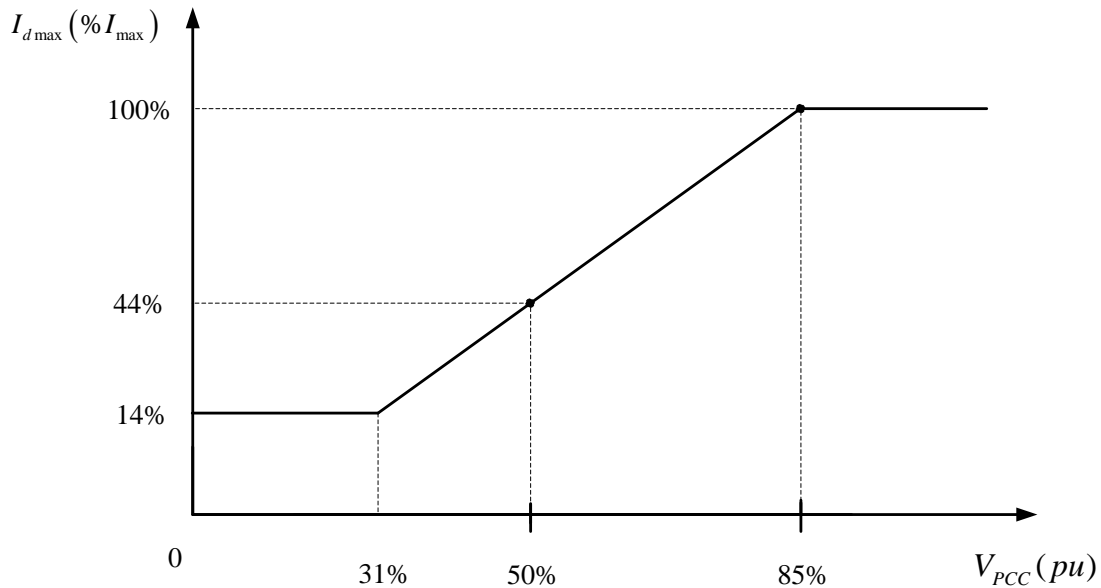
Στις προσομοιώσεις του συγκεκριμένου μοντέλου που θα παρουσιαστούν στο κεφάλαιο 5, η συνολική σύνθετη αντίσταση που παρεμβάλλεται μεταξύ πάρκου – σημείου κοινής σύνδεσης είναι (ανηγγμένα στην ονομαστική ισχύ του Α/Π) :

$$Z_l = R_l + jX_l = 0.02 + j0.14 = |Z_l| \angle 81.87^\circ$$

Συνεπώς για ένα στερεό τριφασικό σφάλμα στο ΣΚΣ, ο μετατροπέας θα λειτουργεί ευσταθώς σαν πηγή ρεύματος αν η ενεργός συνιστώσα του ρεύματος εξόδου είναι (με χρήση της εξίσωσης (3.28) του Κεφ. 3) :

$$I_d = I_{\max} \cos \delta_l = I_{\max} \cos 81.87^\circ = 0.14 I_{\max} \quad (4.10)$$

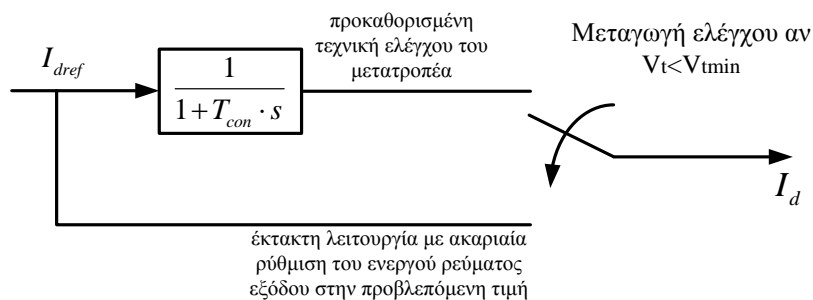
Άρα η τιμή που θα πρέπει να έχει ο περιοριστής σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να είναι ίση με το 14% του μέγιστου ρεύματος του μετατροπέα. Η τεταγμένη της ευθείας που έχει οριστεί στο Σχ. 4.12 γίνεται ίση με το 14% του I_{\max} όταν η τάση στο ΣΚΣ είναι 31.25%. Οπότε για αυτή τη τιμή και κάτω η τιμή του περιοριστή παραμένει στο 14% του μέγιστου ρεύματος. Έτσι η χαρακτηριστική του περιοριστή του ενεργού ρεύματος του μετατροπέα συναρτήσει της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης προκύπτει έτσι όπως φαίνεται στο Σχ. 4.12.



Σχ. 4.12 : Τιμή του περιοριστή του επιθυμητού ενεργού ρεύματος συναρτήσει της τάσης στο ΣΚΣ

Εδώ όμως πρέπει να σημειωθεί πως όταν η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης βρεθεί πολύ κοντά στο μηδέν, ο μετατροπέας θα πρέπει να παρακάμψει την προκαθορισμένη τεχνική διαμόρφωσης του ρεύματος εξόδου του και να λειτουργήσει με απευθείας έλεγχο ρεύματος έτσι ώστε να δοθεί ακαριαία η σωστή τιμή στο ρεύμα εξόδου του, όπως εξηγήθηκε και στην παράγραφο 3.4.

Η μεταγωγή αυτή ελέγχου θα πρέπει να γίνει όταν η τερματική τάση θα μειωθεί κάτω από ένα όριο V_{tmin} , το οποίο πρέπει να υπολογιστεί κατάλληλα. Η μοντελοποίηση της παραπάνω έκτακτης λειτουργίας φαίνεται απλοποιημένα στο Σχ. 4.13.



Σχήμα 4.13 : Μεταγωγή ελέγχου του μετατροπέα

Όπως φαίνεται στο Σχ. 4.13, όταν η τερματική τάση γίνει μικρότερη του ορίου V_{tmin} τότε θεωρούμε ότι ο μετατροπέας παρακάμπτει τους όποιους βρόχους ελέγχου χρησιμοποιεί (οι οποίοι εισάγουν μια χρονική καθυστέρηση), έτσι ώστε να διαμορφώσει το ενεργό ρεύμα εξόδου του ακαριαία στην τιμή I_{dmax} . Στο παρόν μοντέλο, αυτό είναι ισοδύναμο με το παρακαμφθεί η βαθμίδα του Σχ. 4.9 και το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα να ρυθμιστεί ακαριαία στην τιμή που προκύπτει βάσει

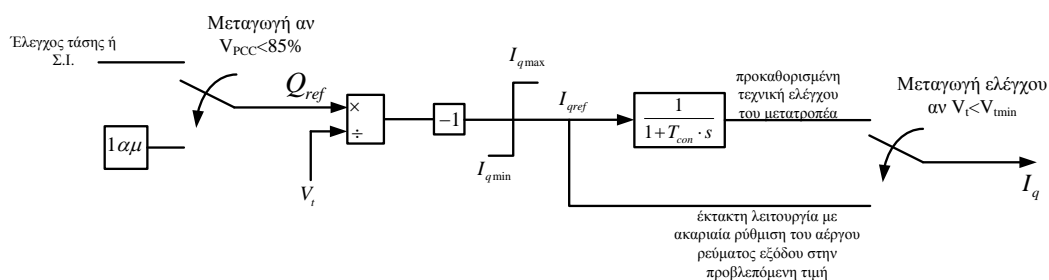
του Σχ. 4.12, δηλαδή στην τιμή $I_{d\max}$ (λόγω της πολύ χαμηλής τερματικής τάσης), την οποία θα δώσει ο αντίστοιχος περιοριστής του Σχ. 4.11.

Η τιμή του περιοριστή του αέργου ρεύματος του μετατροπέα δίνεται από τη σχέση :

$$I_{q\max} = \sqrt{I_{\max}^2 - I_{dref}^2} \quad (4.11)$$

Έτσι εξασφαλίζεται πως το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα δεν θα υπερβεί την μέγιστη τιμή του.

Όταν η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης είναι μικρότερη από 85%, τότε το άεργο ρεύμα I_{dref} πρέπει να είναι ίσο με την τιμή που δίνει ο περιοριστής $I_{q\min}$, ο οποίος έχει σχεδιαστεί βάσει της χαρακτηριστικής του Σχ. 1.9 του 1^{ου} Κεφ. Οπότε, για να εξασφαλιστεί ότι θα γίνει η ρύθμιση αυτή ανεξαρτήτως της προκαθορισμένης τεχνικής ελέγχου της αέργου ισχύος (έλεγχος τάσης, συντελεστή ισχύος), θα πρέπει να δοθεί κατάλληλο σήμα στην άεργο ισχύ αναφοράς Q_{ref} . Οπότε όταν η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης γίνει μικρότερη του 85%, θα πρέπει να γίνει μεταγωγή και για το σήμα αναφοράς Q_{ref} . Η μεταγωγή αυτή, μαζί με την μεταγωγή ελέγχου στην περίπτωση πολύ χαμηλής τάσης φαίνονται στο Σχ. 4.14.



Σχήμα 4.14 : Μεταγωγή ελέγχου του μετατροπέα

Η μεταγωγή σε περίπτωση πολύ χαμηλής τάσης αποτελεί μια θεώρηση που γίνεται έτσι ώστε να μπορεί να μελετηθεί η απόκριση της εξεταζόμενης διάταξης κυρίως μετά την εκκαθάριση σοβαρών σφαλμάτων, πράγμα που αποτελεί πρωταρχικό στόχο της υλοποίησης του συγκεκριμένου μοντέλου, δηλαδή για μελέτες ευστάθειας.

Μια εναλλακτική λύση στην ρύθμιση του μετατροπέα κατά την διάρκεια μεγάλων βυθίσεων της τάσης του δικτύου θα μπορούσε να είναι μόλις η τερματική τάση μειωθεί κάτω από ένα όριο ο μετατροπέας να λειτουργεί με έλεγχο του μέτρου και της φάσης της τάσης στην έξοδό του, να συμπεριφέρεται δηλαδή ως πηγή τάσης. Έτσι το εγγερόμενο ρεύμα στο δίκτυο θα προέκυπτε από μόνο του ανάλογα με τις συνθήκες του δικτύου. Η συγκεκριμένη τεχνική δεν εξετάζεται στην παρούσα εργασία.

4.6.2 Εύρεση μέγιστου ρεύματος DC/AC μετατροπέα και κρίσιμης τάσης V_{tmin} για μεταγωγή ελέγχου

Θεωρούμε ένα αιολικό πάρκο ονομαστικής ισχύος P_{nom} . Αν υποθέσουμε ότι θα πρέπει να έχει την δυνατότητα να λειτουργεί με συντελεστή ισχύος από 0.95 επαγωγικό έως 0.95 χωρητικό στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, τότε η μέγιστη άεργος ισχύς που θα μπορεί να ανταλλάσσει με το δίκτυο στην ονομαστική κατάσταση λειτουργίας είναι :

$$Q_{rated} = P_{nom} \cdot \tan(\cos^{-1}(PF)) = P_{nom} \cdot \tan(\cos^{-1}(0.95)) = 0.3287P_{nom}$$

Συνεπώς η ονομαστική φαινόμενη ισχύς του αιολικού πάρκου είναι :

$$S_{nom} = \sqrt{P_{nom}^2 + Q_{max}^2} = \sqrt{1 + 0.3287^2} P_{nom} = 1.053P_{nom}$$

Στο ανά μονάδα σύστημα η μέγιστη τιμή του ρεύματος εξόδου του Α/Π θα είναι :

$$I_{max} = \frac{S_{nom}}{S_{base}} = 1.053 \frac{P_{nom}}{S_{base}} \quad (4.12)$$

Όπου S_{base} : η βάση ισχύος του συστήματος.

Όσον αφορά την τιμή της κρίσιμης τερματικής τάσης V_{tmin} , πρώτα θα υπολογιστεί η τερματική τάση στην περίπτωση όπου η τάση στο ΣΚΣ είναι 0. Σε αυτή την περίπτωση το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα θα ρυθμιστεί στην μέγιστη τιμή του, οπότε η τερματική τάση θα είναι :

$$V_t = \sqrt{R_l^2 + X_l^2} \cdot I_{max} \quad (4.13)$$

Όπου R_l, X_l είναι η αντίσταση και αντίδραση μεταξύ αιολικού πάρκου – σημείου κοινής σύνδεσης. Οπότε η κρίσιμη τιμή της τερματικής τάσης θα πρέπει να επιλεγεί λίγο μεγαλύτερη από το αποτέλεσμα που δίνει η σχέση (4.13) (μεγαλύτερη κατά ένα ποσοστό ασφαλείας).

4.6.3 Στρατηγική ελέγχου του DC/DC μετατροπέα και του DC/AC μετατροπέα κατά την διάρκεια βυθίσεων τάσης του δικτύου

Στο συγκεκριμένο μοντέλο έχει θεωρηθεί η dc τάση του πυκνωτή σταθερή. Αυτό σημαίνει πως η ηλεκτρική ισχύς της Α/Γ θεωρείται ίση με την εγχεόμενη ενεργό ισχύ του μετατροπέα. Όταν η τάση του δικτύου είναι σε κανονικά επίπεδα, τότε είτε ο DC/DC μετατροπέας ρυθμίζει την ηλεκτρική ισχύ της Α/Γ (με τον DC/AC μετατροπέα να ακολουθεί διατηρώντας την dc τάση σταθερή), είτε ο DC/DC μετατροπέας ρυθμίζει την dc τάση του πυκνωτή (με τον DC/AC μετατροπέα να υλοποιεί την στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος), η dc τάση είναι βέβαιο πως θα

διατηρείται κατά το δυνατόν σταθερή (εννοείται με μια μικρή διακύμανση λόγω της λειτουργίας των μετατροπέων).

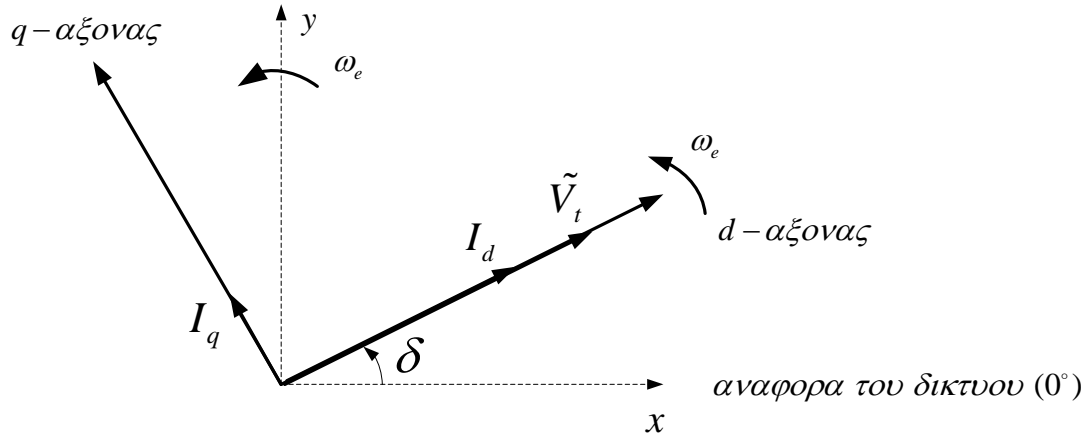
Στην περίπτωση όμως όπου υπάρξει μια σημαντική βύθιση τάσης του δικτύου, ως αποτέλεσμα θα έχουμε την αναπόφευκτη μείωση της ενεργού ισχύος του DC/AC μετατροπέα. Έτσι, αν ο DC/DC μετατροπέας λειτουργεί ελέγχοντας ανεξάρτητα την ηλεκτρική ισχύ της γεννήτριας, αυτό σημαίνει πως προκειμένου να αποφευχθεί ανεξέλεγκτη αύξηση της dc τάσης, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί κατάλληλη διάταξη η οποία θα απορροφά την περίσσεια ηλεκτρικής ισχύος της ανεμογεννήτριας, έτσι ώστε να μην απορροφηθεί από τον πυκνωτή. Τέτοια διάταξη μπορεί να είναι μια αντίσταση οδηγούμενη από διακοπτικό στοιχείο [7], [29] και η οποία θα ενεργοποιείται μόλις η dc τάση υπερβεί κάποιο όριο.

Μια άλλη στρατηγική ελέγχου είναι μόλις η τάση του δικτύου μειωθεί κάτω από κάποιο όριο, μπορεί να δοθεί κατάλληλο σήμα το οποίο θα προκαλέσει αντιστροφή των τεχνικών ελέγχου των δύο μετατροπέων [29]. Έτσι σε αυτή την περίπτωση ο DC/AC μετατροπέας θα ρυθμίζει την έγχυση ενεργού ισχύος βάσει της στρατηγικής μέγιστης απολαβής ισχύος αλλά και βάσει του επιπέδου της τάσης του δικτύου, και ο DC/DC μετατροπέας θα ακολουθεί διατηρώντας την dc τάση του πυκνωτή σταθερή. Στη συνέχεια, μόλις η τάση αποκτήσει τέτοιες τιμές όπου η ενεργός ισχύς αναφοράς προερχόμενη από την στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος μπορεί να δοθεί και στο δίκτυο, αναιρείται το σήμα που δόθηκε και επανέρχονται οι αρχικές τεχνικές ελέγχου στους δύο μετατροπείς. Έτσι σε αυτή την περίπτωση η ηλεκτρική ισχύς της ανεμογεννήτριας θα γίνει ίση με την ενεργό ισχύ που μπορεί να εγχυθεί από τον μετατροπέα στο δίκτυο. Βέβαια, αν η προκαθορισμένη τεχνική ελέγχου του DC/DC μετατροπέα είναι να ελέγχει την dc τάση του πυκνωτή, τότε έτσι και αλλιώς δεν θα προκύψει κάποιο πρόβλημα με την dc τάση, γιατί ο DC/DC μετατροπέας εμμέσως θα προσαρμόζεται στην ενεργό ισχύ που θα μπορεί κάθε φορά να εγχυθεί από τον μετατροπέα πλευράς δικτύου.

Στο συγκεκριμένο μοντέλο θεωρείται πως είτε η προκαθορισμένη τεχνική ελέγχου του DC/DC μετατροπέα είναι να ελέγχει την dc τάση του πυκνωτή, είτε σε συνθήκες βύθισης της τάσης του δικτύου ο μετατροπέας αποκτά αυτήν την στρατηγική. Έτσι η ηλεκτρική ισχύς της ανεμογεννήτριας είναι ίση με την ενεργό ισχύ που εγχέεται στο δίκτυο ακόμα και σε συνθήκες σφάλματος.

4.7 Αναγωγή μεγεθών στην αναφορά του δικτύου

Όπως εξηγήθηκε στην παράγραφο 4.5 για την μοντελοποίηση του DC/AC μετατροπέα χρησιμοποιείται ένα dq πλαίσιο αναφοράς του οποίου ο d άξονας συμπίπτει με την τερματική τάση. Η τερματική όμως τάση έχει μια διαφορά φάσης σε σχέση με την αναφορά του δικτύου. Έτσι για τον υπολογισμό της ενεργού και αέργου συνιστώσας του ρεύματος που εγχέεται από τον αντιστροφέα ως προς την αναφορά του δικτύου χρειάζεται να γίνει κατάλληλος μετασχηματισμός των συνιστωσών που είναι εκφρασμένες στο dq πλαίσιο που ταυτίζεται με την τάση.



Σχήμα 4.15 : Πλαίσιο αναφοράς μετατροπέα και δικτύου

Βάσει του Σχ. 4.15 τα ρεύματα και οι τάσεις του dq πλαισίου μετασχηματίζονται στο xy πλαίσιο ως εξής :

$$I_x = I_d \cos \delta - I_q \sin \delta \quad (4.14)$$

$$I_y = I_d \sin \delta + I_q \cos \delta \quad (4.15)$$

$$V_x = V_t \cos \delta \quad (4.16)$$

$$V_y = V_t \sin \delta \quad (4.17)$$

Ο μετασχηματισμός των ρευμάτων μπορεί να γραφεί σε μητρική μορφή ως εξής :

$$\begin{bmatrix} I_x \\ I_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & -\sin \delta \\ \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Η φαινόμενη ισχύς εκφρασμένη σε xy συνιστώσες είναι (σε ανά μονάδα):

$$S = \tilde{V}_t \cdot \tilde{I}^* = (V_x + jV_y) \cdot (I_x - jI_y) \quad (4.19)$$

$$P = V_x I_x + V_y I_y \quad (4.20)$$

$$Q = -V_x I_y + V_y I_x \quad (4.21)$$

Αξίζει να σημειωθεί πως η γωνία δ που χρησιμοποιείται στον μετασχηματισμό είναι η ίδια η γωνία της τερματικής τάσης και όχι κάποια εκτιμώμενη φάση. Στο Κεφ. 3 αποδείχθηκε πως η εκτιμώμενη φάση αποτελεί εσωτερική μεταβλητή του μετατροπέα, με αποτέλεσμα να μην επηρεάζει την φάση του ρεύματος εξόδου.

Τέλος γνωρίζοντας την τερματική τάση και το ρεύμα εξόδου στο xy πλαίσιο, η ενεργός και η άεργος ισχύς που εγχέονται στο δίκτυο υπολογίζονται από τις σχέσεις (4.20), (4.21). Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 4.6.3 η διάταξη ρυθμίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε η ηλεκτρική ισχύς της A/Γ να είναι ίση με την ενεργό ισχύ εξόδου της ακόμα και σε συνθήκες σφάλματος. Έτσι, στην ουσία σαν είσοδος για την ηλεκτρική ισχύ στο διάγραμμα του μηχανικού μέρους του Σχ. 4.2, μπαίνει το αποτέλεσμα της σχέσης (4.20).

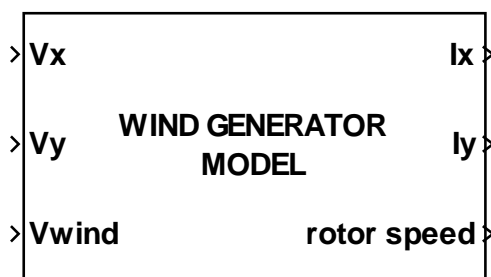
4.8 Ανάπτυξη μοντέλου στο περιβάλλον simulink

Όπως έχει ήδη εξηγηθεί, η διάταξη που μοντελοποιήθηκε στην παρούσα εργασία στην ουσία συμπεριφέρεται ως προς το δίκτυο σαν μια ελεγχόμενη πηγή ρεύματος. Συνεπώς το μοντέλο αυτό, ανάλογα με το ποιες είναι οι επιθυμητές εγχύσεις ενεργού και αέργου ισχύος, και ανάλογα με την τιμή της τερματικής τάσης, εγχέει στο δίκτυο τα αντίστοιχα ενεργά και άεργα ρεύματα.

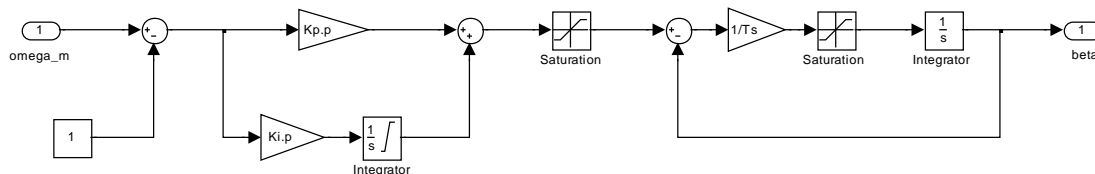
Στο Σχ. 4.16 φαίνεται η εξωτερική όψη του μοντέλου που έχει αναπτυχθεί σε περιβάλλον Simulink. Σαν εισόδους έχει την τερματική τάση της ανεμογεννήτριας εκφρασμένη στο xy πλαίσιο αναφοράς του δικτύου, οι συνιστώσες της οποίας μας δίνουν την πληροφορία για το μέτρο και τη γωνία του διανύσματος της τάσης. Επίσης σαν είσοδο έχει και την ταχύτητα ανέμου για τον καθορισμό της αναπτυσσόμενης αεροδυναμικής ροπής. Σαν έξοδο το μοντέλο δίνει το ρεύμα εξόδου εκφρασμένο στο xy πλαίσιο αναφοράς του δικτύου και επίσης σαν έξοδος δίνεται και η ταχύτητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας. Όλοι οι υπολογισμοί γίνονται σε ανά μονάδα τιμές.

Όσον αφορά την υλοποίηση του ρυθμιστή γωνίας βήματος των πτερυγίων, πρέπει να δοθεί προσοχή στον ολοκληρωτικό όρο του PI ελεγκτή ο οποίος ρυθμίζει την γωνία βήματος αναφοράς. Για την σωστή λειτουργία του λοιπόν χρησιμοποιείται ένας ολοκληρωτής με άνω και κάτω όριο στις τιμές που μπορεί να πάρει. Ο εσωτερικός αυτός περιοριστής φαίνεται και στο Σχ. 4.17.

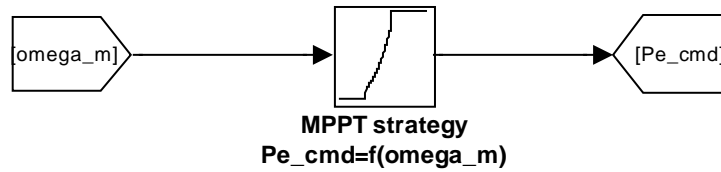
Όσον αφορά την υλοποίηση της στρατηγικής μέγιστης απολαβής ισχύος, μπορεί πολύ απλά να υλοποιηθεί στο simulink με την χρήση ενός πίνακα τιμών, όπως φαίνεται και στο Σχ. 4.18. Σε αυτή τη βαθμίδα ορίζεται από πριν ένα πλήθος τιμών για το ζεύγος $(\omega_m, P_{e,opt})$, και στην προσομοίωση ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας, υπολογίζεται η ενεργός ισχύς αναφοράς με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των πλησιέστερων σημείων.



Σχήμα 4.16 : Εξωτερική δομή μοντέλου στο simulink

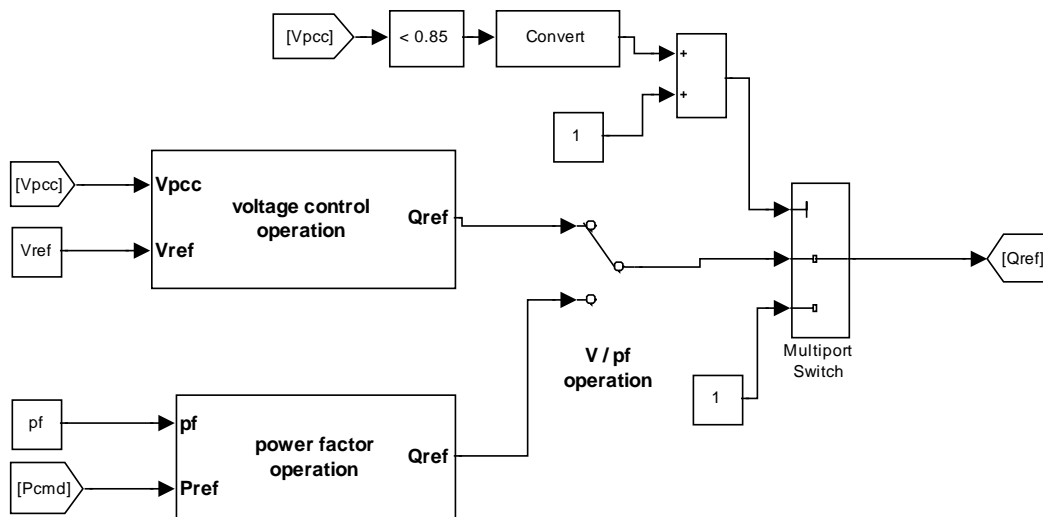


Σχήμα 4.17 : Υλοποίηση ρυθμιστή γωνίας πτερυγίων στο simulink



Σχήμα 4.18: Υλοποίηση στρατηγικής MPPT στο simulink

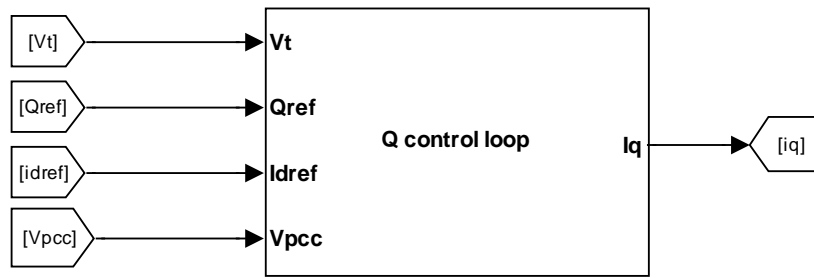
Στο Σχ. 4.19 φαίνεται η υλοποίηση της διαμόρφωσης της αέργου ισχύος αναφοράς που δίνεται στον μετατροπέα. Στην ουσία έχει υλοποιηθεί το διάγραμμα βαθμίδων του Σχ. 4.10 μόνο που έχει ενσωματωθεί και η μεταγωγή που γίνεται στην αέργο ισχύ αναφοράς όταν η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης είναι μικρότερη του 85%. Έτσι εξασφαλίζεται ότι το αέργο ρεύμα που θα εγχυθεί στο δίκτυο θα διαμορφωθεί από τον περιοριστή του αέργου ρεύματος εξόδου I_{qmin} .



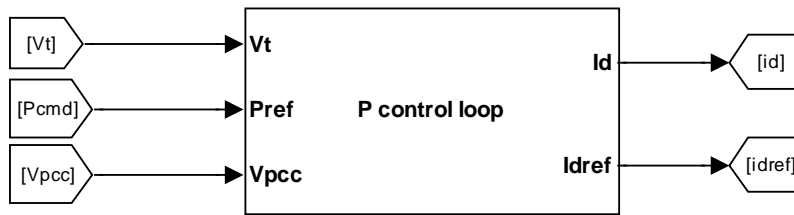
Σχήμα 4.19: Διαμόρφωση αέργου ισχύος αναφοράς στο simulink

Στο Σχ. 4.20 φαίνεται η εξωτερική δομή των βαθμίδων που υλοποιήθηκαν στο simulink και καθορίζουν την ενεργό και αέργο συνιστώσα του ρεύματος του μετατροπέα που εγχέεται στο δίκτυο.

Στο Σχ. 4.21 παρουσιάζεται το εσωτερικό του υποσυστήματος “P control loop”, στο οποίο γίνεται η διαμόρφωση του ενεργού ρεύματος εξόδου του μετατροπέα. Για την υλοποίηση του περιοριστή I_{dmax} χρησιμοποιήθηκε ένας δυναμικός περιοριστής οι τιμές του οποίου καθορίζονται βάσει ενός πίνακα τιμών, ο οποίος πίνακας στην ουσία υλοποιεί την χαρακτηριστική του Σχ. 4.12. Επίσης χρησιμοποιείται μια βαθμίδα καθυστέρησης πρώτης τάξης η οποία αναπαριστά την αντίστοιχη καθυστέρηση στους βρόχους ελέγχου του μετατροπέα. Τέλος φαίνεται και η μεταγωγή ελέγχου όταν η τερματική τάση πέσει κάτω από 20%, ώστε ο μετατροπέας να ρυθμίζει ακαριαία το ενεργό ρεύμα εξόδου στην τιμή που δίνεται από τη σχέση (4.10).

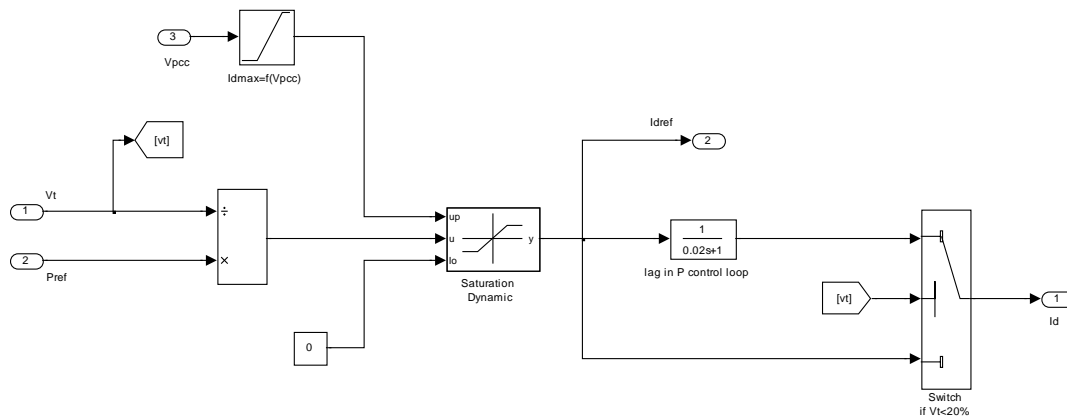


Άεργο ρεύμα που εγχέεται από τον μετατροπέα στο δίκτυο



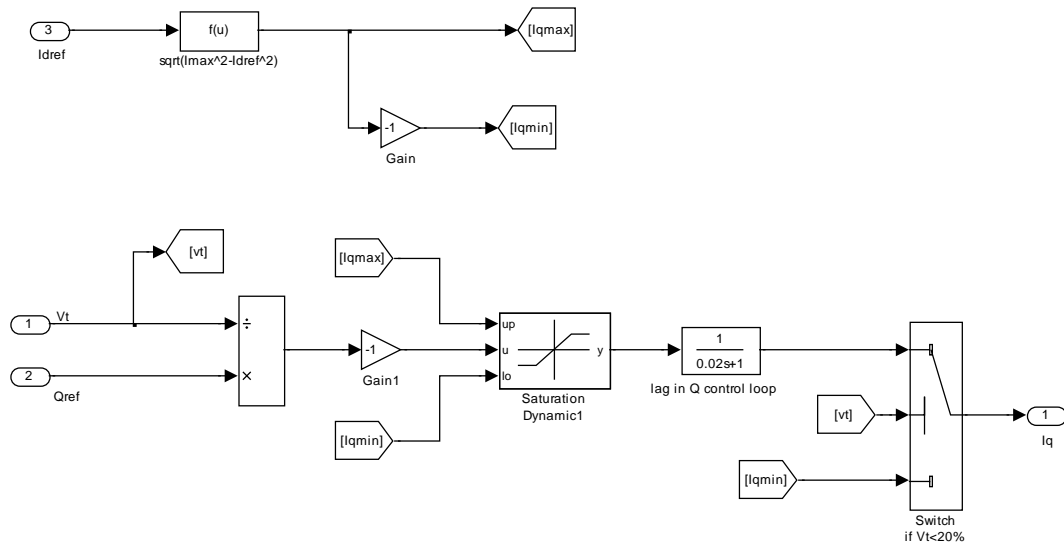
Ενεργό ρεύμα που εγχέεται από τον μετατροπέα στο δίκτυο

Σχήμα 4.20: Διάγραμμα βαθμίδων για τους βρόχους ελέγχου της ενεργού και αέργου ισχύος εξόδου του μετατροπέα πλευράς δικτύου στο simulink



Σχήμα 4.21: Διαμόρφωση του ενεργού ρεύματος εξόδου του μετατροπέα πλευράς δικτύου στο simulink

Τέλος, στο Σχ. 4.22 φαίνεται το εσωτερικό του υποσυστήματος “Q control loop” στο οποίο διαμορφώνεται το άεργο ρεύμα εξόδου του μετατροπέα. Στην ουσία υλοποιείται το διάγραμμα βαθμίδων του Σχ. 4.14, χρησιμοποιώντας και εδώ τις αντίστοιχες βαθμίδες με αυτές του Σχ. 4.21.



Σχήμα 4.22: Διαμόρφωση του αέργου ρεύματος εξόδου του μετατροπέα πλευράς δικτύου στο simulink

Το λογισμικό προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε βασίζεται σε εκπαιδευτικό λογισμικό προσομοίωσης που έχει αναπτυχθεί σε περιβάλλον Matlab/Simulink στο πακέτο WHSSP [43], που είναι κατάλληλο για προσομοιώσεις θεμελιώδους συχνότητας αιολικών ή υβριδικών Σ.Η.Ε. [49]. Ο τρόπος υπολογισμού των τάσεων και ρευμάτων σε όλους τους ζυγούς του δικτύου κατά την διάρκεια της προσομοίωσης γίνεται με την χρήση ενός αλγεβρικού βρόχου, η λειτουργία του οποίου παρουσιάζεται στο [50]. Σε γενικές γραμμές, τα μοντέλα των γεννητριών και φορτίων υπολογίζουν το ρεύμα που πρέπει να δοθεί στην έξοδό τους βάσει της τιμής της τάσης του ζυγού στον οποίο συνδέονται και της επιθυμητής παραγωγής ή κατανάλωσης ενεργού και άεργου ισχύος. Από την άλλη, βάσει των τάσεων στους ζυγούς του δικτύου και της μήτρας αγωγιμότητάς του υπολογίζονται τα προκύπτοντα ρεύματα που διαρρέουν το δίκτυο. Προφανώς οι τιμές των ρευμάτων που προκύπτουν από τις δύο αυτές ομάδες εξισώσεων θα πρέπει να είναι οι ίδιες καθώς αναφέρονται στα ίδια μεγέθη. Η χρήση λοιπόν του αλγεβρικού βρόχου εξασφαλίζει την προαναφερθείσα σύγκλιση των τιμών.

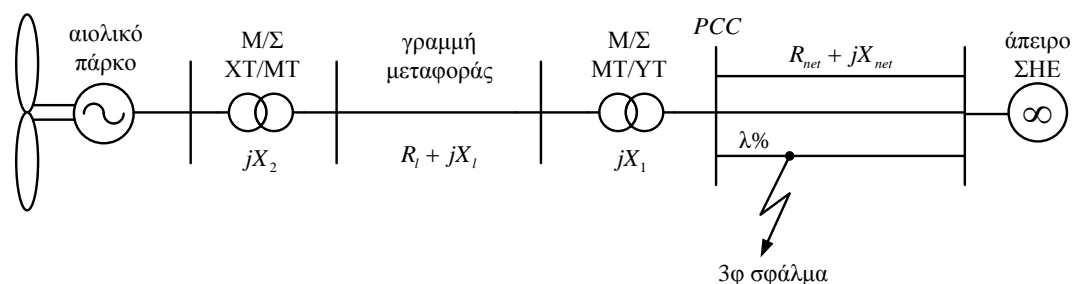
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

5.1 Αιολικό πάρκο συνδεδεμένο σε άπειρο δίκτυο

5.1.1 Περιγραφή τοπολογίας

Στη συγκεκριμένη παράγραφο θα μελετηθεί η απόκριση του μοντέλου που αναπτύχθηκε, όταν αυτό είναι συνδεδεμένο σε ένα άπειρο ΣΗΕ μέσω μιας τριπλής γραμμής μεταφοράς. Η τοπολογία του συστήματος αυτού φαίνεται στο Σχ. 5.1. Το αιολικό πάρκο αναπαρίσταται από μια ισοδύναμη ανεμογεννήτρια με έναν ισοδύναμο μετασχηματιστή ανύψωσης ΧΤ/ΜΤ. Στην συνέχεια παρεμβάλλεται μια γραμμή διανομής μέσης τάσης και έπειτα χρησιμοποιείται ένας μετασχηματιστής ΜΤ/ΥΤ για την σύνδεση στο δίκτυο. Η εγκατεστημένη ισχύς του Α/Π θεωρείται ίση με 100ΜW. Τα χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών που απαρτίζουν το αιολικό πάρκο φαίνονται στον Πίνακα 5.1. Στον Πίνακα 5.2 φαίνονται τα ονομαστικά μεγέθη του αιολικού πάρκου και στον Πίνακα 5.3 φαίνονται οι ανά μονάδα τιμές των αντιστάσεων και αντιδράσεων του δικτύου του Σχ. 5.1.



Σχήμα 5.1 : Αιολικό πάρκο συνδεδεμένο σε άπειρο δίκτυο

Το μέγιστο ρεύμα I_{\max} στον Πίνακα 5.2 υπολογίστηκε με εφαρμογή της σχέσης (4.12). Δηλαδή είναι :

$$I_{\max} = 1.053 \frac{100}{100} = 1.053 \text{ αμ}$$

Όσον αφορά την κρίσιμη τιμή V_{\min} για την μεταγωγή ελέγχου, αυτή υπολογίζεται με εφαρμογή της σχέσης (4.13). Γνωρίζοντας την τιμή της σύνθετης αντίστασης μεταξύ πάρκου – σημείου κοινής σύνδεσης, που δίνεται στον Πίνακα 5.3, καθώς και την τιμή του μέγιστου ρεύματος που υπολογίστηκε πριν, προκύπτει:

$$V_t = \sqrt{0.02^2 + 0.14^2} \cdot 1.053 = 0.149 \text{ αμ}$$

Συνεπώς σαν κρίσιμη τάση για την μεταγωγή του ελέγχου του μετατροπέα επιλέγεται $V_{tmin} = 20\%$.

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά των Α/Γ που απαρτίζουν το αιολικό πάρκο

Διάμετρος δρομέα	75 m	$\dot{\beta}_{max}$	$8^\circ / s$
Ταχύτητα δρομέα	9-21 ΣΑΛ	$\dot{\beta}_{min}$	$-8^\circ / s$
Ονομαστική ισχύς	2 MW	pf_{min}	0.95
Ονομαστική ταχύτητα ανέμου	12 m/s	T_t	0.05 s
Ονομαστική ταχύτητα δρομέα	18 ΣΑΛ	K_{pq}	5
Σταθερά αδρανείας H	3.64 s	K_{iq}	0.2
K_{pp}	200	Q_{max}	1 αμ
K_{ip}	60	T_{con}	0.02 s
T_p	0.25 s	V_{tmin}	20%
β_{max}	30°		
β_{min}	0°		

Πίνακας 5.2: Ονομαστικά μεγέθη αιολικού πάρκου

Ονομαστική ενεργός ισχύς	100MW
Ονομαστική φαινόμενη ισχύς	105.3MVA
Ονομαστική άεργος ισχύς	33MVAr
S_{base}	100MVA
I_{max} (αμ)	1.053

Πίνακας 5.3: Αντιστάσεις και αντιδράσεις δικτύου (ανά μονάδα στα 100MVA)

X_2	0.0552
$R_l + jX_l$	0.02+j0.0248
X_1	0.06
$R_{net} + jX_{net}$	0.05+j0.5

5.1.2 Απόκριση μοντέλου σε τριφασικό βραχυκύκλωμα

Στην παράγραφο αυτή εξετάζονται τα εξής σφάλματα :

α. Τριφασικό σφάλμα στο 1% της γραμμής, διάρκειας 100msec, με αρχική ενεργό ισχύ εξόδου του αιολικού πάρκου ίση με 0.9αμ και μηδενική άεργο ισχύ.

β. Τριφασικό σφάλμα στο 30% της γραμμής, διάρκειας 100msec, με αρχική ενεργό ισχύ εξόδου του αιολικού πάρκου ίση με 0.9αμ και μηδενική άεργο ισχύ.

γ. Τριφασικό σφάλμα στο 70% της γραμμής, διάρκειας 100msec, με αρχική ενεργό ισχύ εξόδου του αιολικού πάρκου ίση με 0.9αμ και μηδενική άεργο ισχύ.

α. Σφάλμα στο 1% της γραμμής

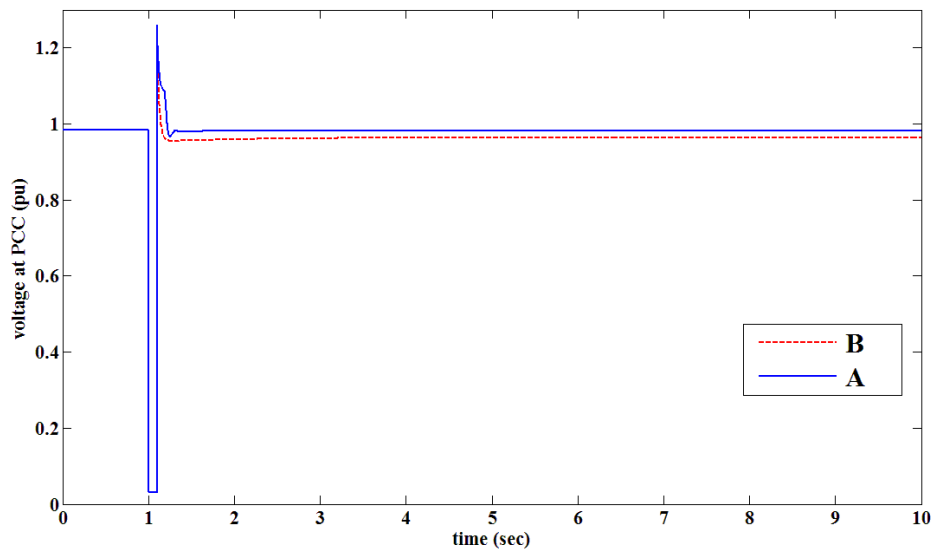
Στην συγκεκριμένη παράγραφο μελετάται η απόκριση του εξεταζόμενου μοντέλου της ανεμογεννήτριας σε περίπτωση που συμβεί ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα πολύ κοντά στο σημείο κοινής σύνδεσης (στο 1% της γραμμής του Σχ. 5.1). Η διάρκεια του σφάλματος είναι 100msec με αντίσταση σφάλματος 0.1% επαγωγική. Η αρχική παραγωγή ενεργού ισχύος από το αιολικό πάρκο θεωρείται ίση με 90MW (90% της ονομαστικής του ενεργού ισχύος) και της αέργου ισχύος θεωρείται μηδενική ($\Sigma.I.=1$). Το σφάλμα θεωρείται ότι εμφανίζεται τη χρονική στιγμή $t=1s$.

Στο Σχ. 5.2 φαίνεται η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης για το εξεταζόμενο σφάλμα πριν και μετά τη διαταραχή. Καταρχάς λόγω της πολύ μικρής αντίστασης σφάλματος η τάση στο ΣΚΣ είναι σχεδόν μηδενική κατά την διάρκεια του σφάλματος, με οποιαδήποτε από τις δύο στρατηγικές λειτουργεί ο μετατροπέας. Μετά την εκκαθάριση του σφάλματος, με την λειτουργία μοναδιαίου συντελεστή ισχύος (καμπύλη B του Σχ. 5.2), δημιουργείται μια μικρή μόνιμη βύθιση τάσης της τάξης του 2% από την αρχική τιμή, λόγω της απώλειας της γραμμής στην οποία συνέβη το σφάλμα.

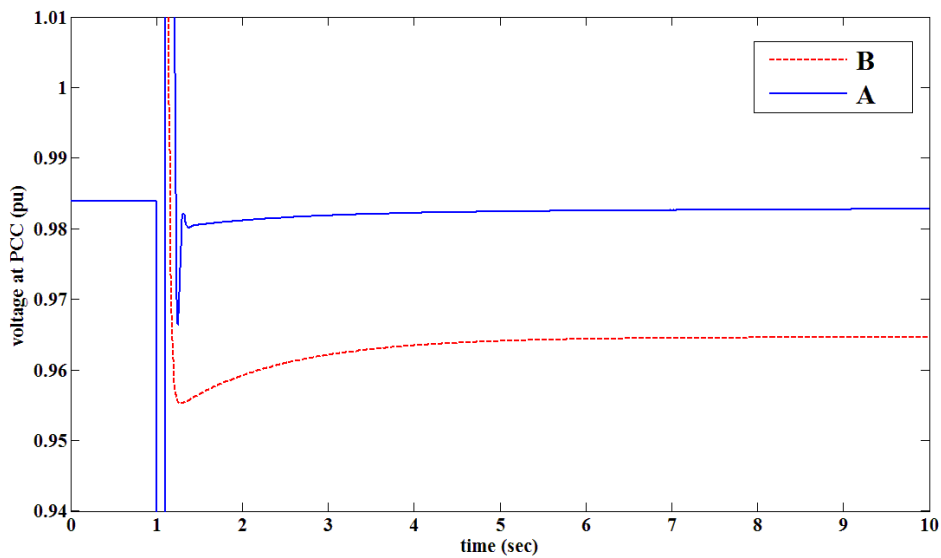
Αντίθετα, στην καμπύλη A του Σχ. 5.2 βλέπουμε πως μετά την εκκαθάριση του σφάλματος, επειδή η τιμή της τάσης μειώνεται κάτω από την αρχική τιμή, το σύστημα ελέγχου της τάσης αρχίζει να δίνει μια άεργο ισχύ αναφοράς. Έτσι ο μετατροπέας αρχίζει να εγγχεί το ανάλογο άεργο ρεύμα, με αποτέλεσμα να διορθωθεί η πτώση τάσης λόγω της απώλειας της γραμμής.

Στο Σχ. 5.3 φαίνεται η άεργος ισχύς εξόδου του αιολικού πάρκου για τις δύο περιπτώσεις λειτουργίας. Καταρχάς και στις δύο περιπτώσεις, κατά την διάρκεια του σφάλματος η άεργος ισχύς είναι η ίδια και αυτό επειδή η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης είναι σχεδόν μηδενική, με αποτέλεσμα να γίνεται η μεταγωγή ελέγχου που έχει αναφερθεί στην παράγραφο 4.6.1. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ακαριαία μείωση του ενεργού ρεύματος εξόδου στην προκαθορισμένη τιμή και την αντίστοιχη αύξηση της αέργου συνιστώσας. Τα προηγούμενα φαίνονται χαρακτηριστικά και στα Σχ. 5.4, 5.5. Βέβαια η άεργος ισχύς είναι μικρή λόγω της πολύ χαμηλής τερματικής τάσης. Συγκεκριμένα η άεργος ισχύς στην διάρκεια του σφάλματος προκύπτει περίπου 0.19 αμ (19MVA_r). Μετά την εκκαθάριση του σφάλματος παρατηρείται μια αιχμή στην άεργο ισχύ εξόδου του Α/Π και αυτό γιατί η τάση επανέρχεται απότομα σε υψηλά επίπεδα, με αποτέλεσμα ο μετατροπέας να επανέλθει στην προκαθορισμένη στρατηγική ελέγχου του. Έτσι και μεν θα μειώσει το άεργο ρεύμα του, όμως αυτό θα γίνει με την μικρή καθυστέρηση που εισάγουν οι βρόχοι ελέγχου του. Συνεπώς ενώ η τάση θα έχει υψηλή τιμή, το άεργο ρεύμα εξόδου του μετατροπέα

δεν θα έχει μειωθεί με τον ίδιο ρυθμό, με αποτέλεσμα στο ενδιάμεσο αυτό χρονικό διάστημα η άεργος ισχύς να έχει υψηλή τιμή. Στην καμπύλη B του Σχ. 5.4, αφού παρέλθει η χρονική καθυστέρηση του μετατροπέα, το άεργο ρεύμα μηδενίζεται γιατί το A/Π λειτουργεί με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Αντίθετα στην καμπύλη A του Σχ. 5.4 το άεργο ρεύμα ισορροπεί σε μια τιμή κοντά στο 6% αμ, έτσι ώστε η τάση στο ΣΚΣ να διατηρηθεί στην αρχική της τιμή.

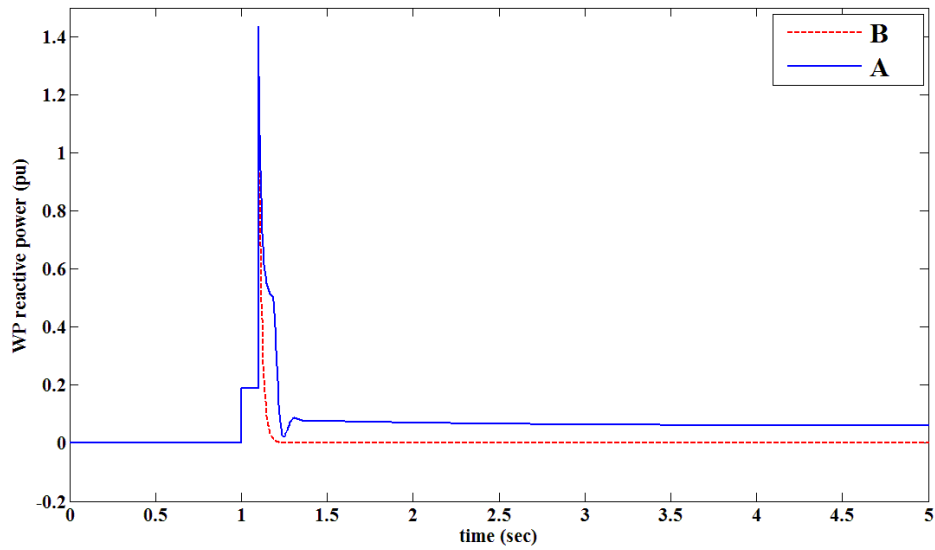


(α)



(β)

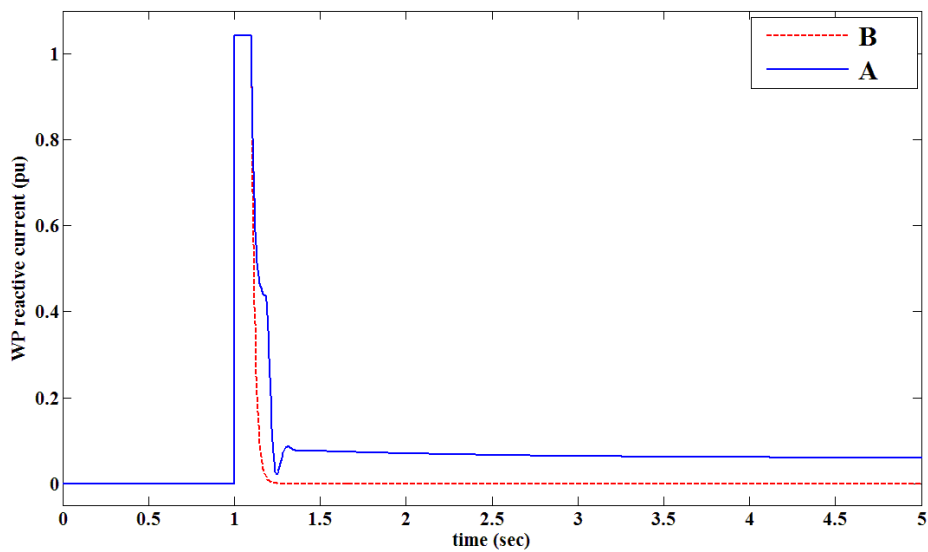
Σχήμα 5.2 : (α) Τάση στο ΣΚΣ για 3φ σφάλμα στο 1% της γραμμής του Σχ. 5.1.
 A : Λειτουργία με έλεγχο τάσης στο ΣΚΣ
 B : Λειτουργία μοναδιαίου συντελεστή ισχύος στην έξοδο του A/Π
 (β) Μεγέθυνση του Σχ. 5.2.α



Σχήμα 5.3 : Άεργος ισχύς εξόδου του Α/Π

A : Λειτουργία με έλεγχο τάσης στο ΣΚΣ

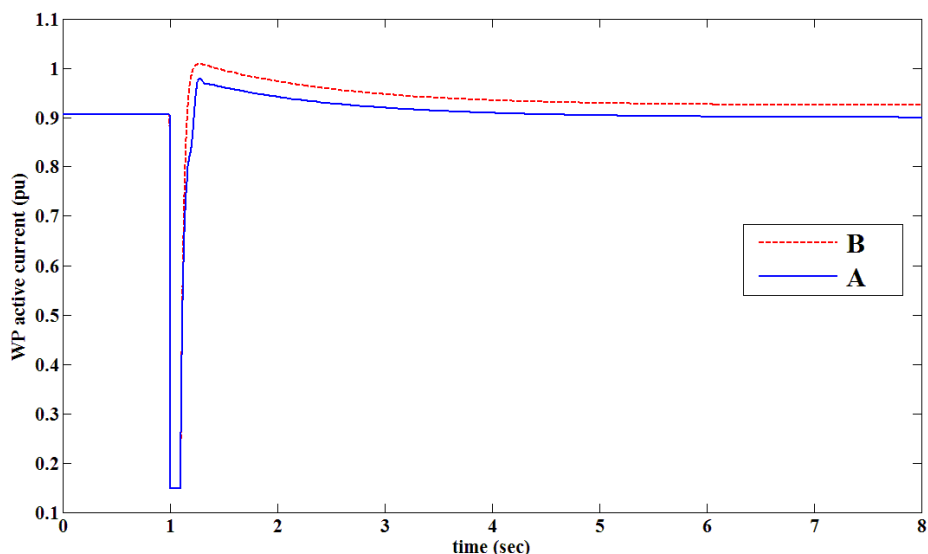
B : Λειτουργία μοναδιαίου συντελεστή ισχύος στην έξοδο του Α/Π



Σχήμα 5.4 : Άεργος συνιστώσα ρεύματος εξόδου του Α/Π

A : Λειτουργία με έλεγχο τάσης στο ΣΚΣ

B : Λειτουργία μοναδιαίου συντελεστή ισχύος στην έξοδο του Α/Π

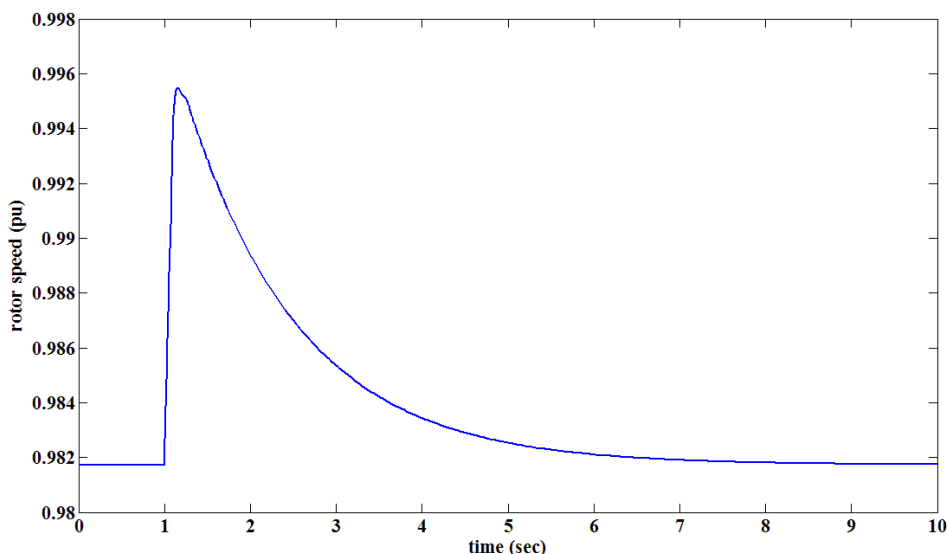


Σχήμα 5.5 : Ενεργός συνιστώσα ρεύματος εξόδου του Α/Π

A : Λειτουργία με έλεγχο τάσης στο ΣΚΣ

B : Λειτουργία μοναδιαίου συντελεστή ισχύος στην έξοδο του Α/Π

Στο Σχ. 5.6 φαίνεται η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της ισοδύναμης Α/Γ. Στο σχήμα αυτό παρατίθεται η ταχύτητα περιστροφής μόνο για την περίπτωση ελέγχου της τάσης στο ΣΚΣ γιατί και στην λειτουργία μοναδιαίου συντελεστή ισχύος προκύπτει σχεδόν η ίδια καμπύλη. Άλλωστε όπως φαίνεται και στο Σχ. 5.5, ο μετατροπέας δεν χρειάζεται να χρησιμοποιήσει το μέγιστο ρεύμα για την ενεργό συνιστώσα, έτσι εμμέσως συμπεραίνουμε ότι μπορεί να εγχύσει την ενεργό ισχύ που του δίνεται σαν αναφορά και στις δύο περιπτώσεις που είναι σχεδόν η ίδια. Σύμφωνα λοιπόν με το Σχ. 5.6, παρατηρείται η επιτάχυνση της μηχανής κατά την διάρκεια του σφάλματος λόγω της δραστηκής μείωσης της ενεργού ισχύος του μετατροπέα. Βέβαια η ενεργός ισχύς εξόδου είναι ίση με την ηλεκτρική ισχύ της Α/Γ σε συνθήκες σφάλματος μόνο όταν χρησιμοποιηθεί η κατάλληλη τεχνική ελέγχου που έχει αναπτυχθεί στην παράγραφο 4.6.3. Μετά το σφάλμα η μηχανή αρχίζει να επιβραδύνεται διότι οι υψηλές στροφές που απέκτησε κατά την διάρκειά του την απομάκρυναν από το αρχικό σημείο ισορροπίας, το οποίο αντιστοιχούσε στην μεγιστοποίηση της αεροδυναμικής ισχύος. Έτσι τώρα οι στροφές είναι τέτοιες που διαρκώς ισχύει $P_m < P_e$ (η ηλεκτρική ισχύς διαμορφώνεται βάσει της καμπύλης του Σχ. 4.6, οπότε αυξάνεται με αύξηση των στροφών), με αποτέλεσμα η μηχανή να επιβραδύνεται. Τελικά επιστρέφει στις κανονικές της στροφές περίπου 6s μετά το σφάλμα.



Σχήμα 5.6 : Ταχύτητα περιστροφής της ισοδύναμης Α/Γ. Λειτουργία με έλεγχο τάσης στο ΣΚΣ

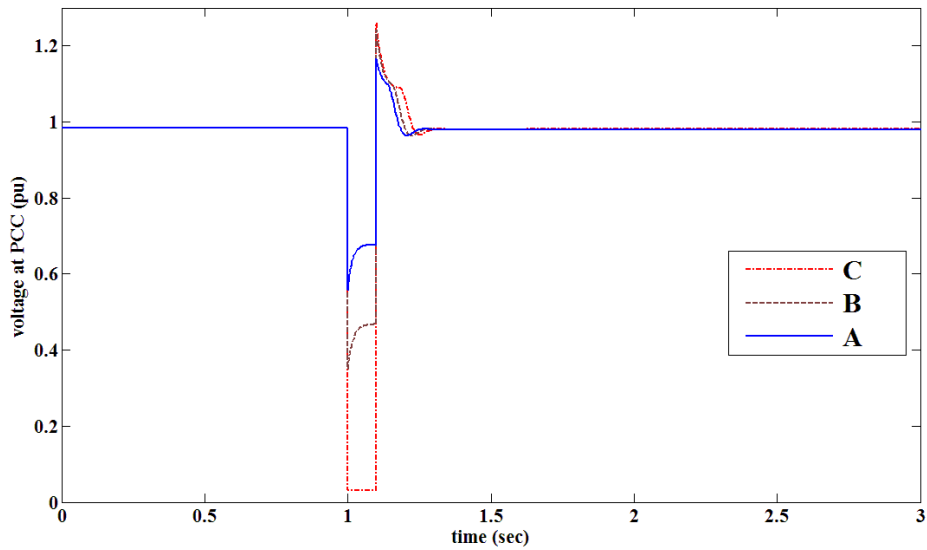
β. Σφάλμα στο 30% – 70% της γραμμής

Σε αυτή τη παράγραφο θα διερευνηθεί η επίδραση της θέσης του σφάλματος που φαίνεται στο Σχ. 5.1. Θεωρούμε και εδώ ότι το σφάλμα γίνεται με αντίσταση σφάλματος 0.1% επαγωγική, με αρχική ενεργό ισχύ εξόδου του αιολικού πάρκου 90% αμ (90MW) και αρχική άεργο ισχύ μηδενική. Επίσης θεωρούμε ότι το αιολικό πάρκο λειτουργεί με έλεγχο της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης. Εξετάζονται οι περιπτώσεις στο 30% και 70% της γραμμής και συγκρίνονται με την περίπτωση σφάλματος στο 1% της γραμμής.

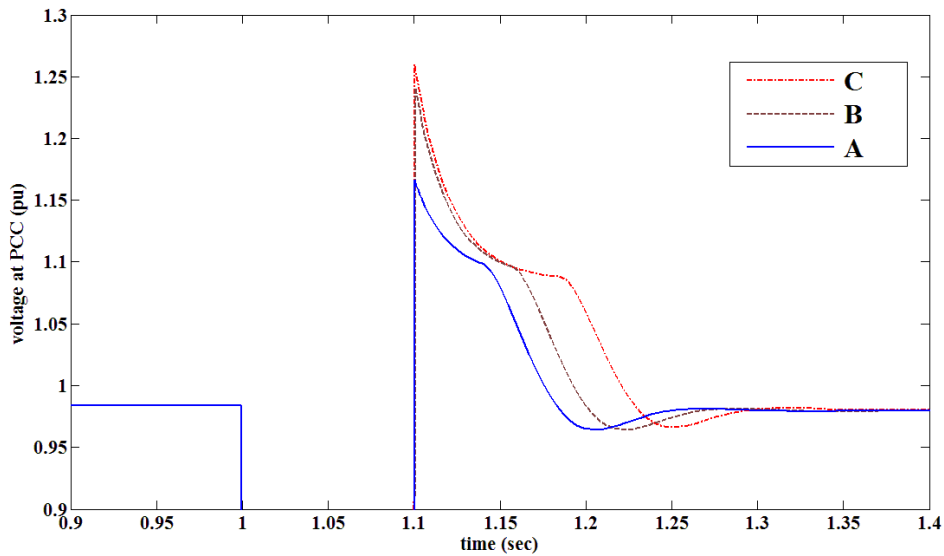
Στο Σχ. 5.7 φαίνεται η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης για τις τρεις περιπτώσεις σφαλμάτων. Σύμφωνα με το σχήμα αυτό, η σημαντική διαφορά εμφανίζεται κατά την διάρκεια του σφάλματος. Συγκεκριμένα, η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης κατά την διάρκεια του σφάλματος αυξάνει όσο πιο μακριά συμβαίνει το σφάλμα από το σημείο αυτό.

Το επίπεδο της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης επηρεάζει και την παραγωγή αέργου ισχύος από το αιολικό πάρκο. Όταν η τάση στο ΣΚΣ είναι μικρότερη από 85%, δρα ο περιοριστής του ενεργού ρεύματος του μετατροπέα έτσι ώστε να δοθεί το κατάλληλο περιθώριο για την έγχυση αέργου ρεύματος στο δίκτυο. Το άεργο ρεύμα που τελικά εγχέεται για τις τρεις περιπτώσεις σφαλμάτων φαίνεται στο Σχ. 5.8. Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, στις καμπύλες Α και Β η άεργος συνιστώσα του ρεύματος εξόδου αυξάνεται ομαλά πράγμα που οφείλεται στην καθυστέρηση που εισάγουν στην πραγματικότητα οι βρόχοι ελέγχου του μετατροπέα. Αντίθετα, στην καμπύλη C η τάση στο ΣΚΣ είναι σχεδόν μηδενική (αντίστοιχη καμπύλη C, Σχ. 5.7), επομένως προκειμένου να αποφευχθεί ασταθής λειτουργία του μετατροπέα γίνεται η μεταγωγή ελέγχου όπως φαίνεται στα Σχ. 4.13, 4.14, με την οποία θεωρούμε ότι ο μετατροπέας διαθέτει κατάλληλη τεχνική με την οποία ρυθμίζει ακαριαία το ρεύμα εξόδου του στην τιμή που είναι προκαθορισμένη για τις συνθήκες αυτές σφάλματος. Έτσι λοιπόν λόγω της εντόνως επαγωγικής φύσης της σύνθετης αντίστασης που παρεμβάλλεται μεταξύ πάρκου – σημείου κοινής σύνδεσης, το άεργο ρεύμα στην καμπύλη C του Σχ. 5.8 ρυθμίζεται κοντά στο μέγιστο ρεύμα του μετατροπέα (1.053 αμ), έτσι ώστε η προκύπτουσα διαφορά φάσης με την τερματική τάση να είναι κοντά στις 90 μοίρες.

Τέλος, είναι προφανές πως όσο μεγαλύτερη είναι η τάση στο ΣΚΣ, τόσο λιγότερο περιορίζεται το ενεργό ρεύμα του μετατροπέα από τον αντίστοιχο περιοριστή, ή ισοδύναμα, τόσο λιγότερο άεργο ρεύμα εγχέεται στο δίκτυο.

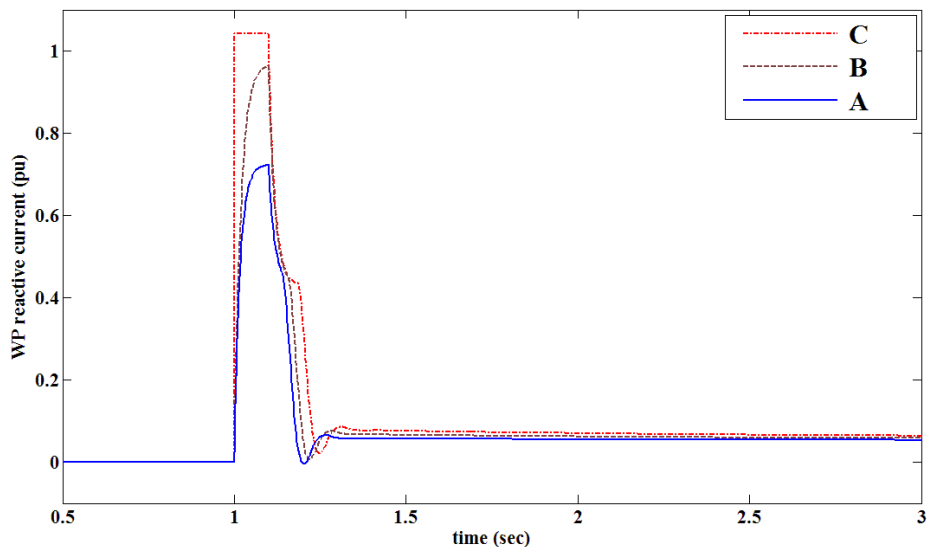


(α)



(β)

Σχήμα 5.7 : (α) Τάση στο ΣΚΣ για λειτουργία ελέγχου τάσης
 Α : 3φ σφάλμα στο 70% της γραμμής του Σχ. 5.1
 Β : 3φ σφάλμα στο 30% της γραμμής του Σχ. 5.1
 C : 3φ σφάλμα στο 1% της γραμμής του Σχ. 5.1
 (β) Μεγέθυνση στην στιγμή αμέσως μετά το σφάλμα



Σχήμα 5.8 : Άεργο ρεύμα εξόδου του A/Π

A : 3φ σφάλμα στο 70% της γραμμής του Σχ. 5.1

B : 3φ σφάλμα στο 30% της γραμμής του Σχ. 5.1

C : 3φ σφάλμα στο 1% της γραμμής του Σχ. 5.1

Από τα προαναφερθέντα γίνεται σαφές πως η άεργος ισχύς του A/Π λίγο πριν την εκκαθάριση του σφάλματος είναι μικρότερη όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ ΣΚΣ – σφάλματος. Αυτό σημαίνει πως και η μέγιστη υπερύψωση της τάσης, η οποία εμφανίζεται κυρίως λόγω της σταδιακής μείωσης του άεργου ρεύματος του μετατροπέα, θα είναι επίσης μικρότερη. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το Σχ. 5.7.β, όπου η μικρότερη υπερύψωση υπάρχει στην καμπύλη A, η οποία αντιστοιχεί σε σφάλμα στο 70% της γραμμής ($\lambda=70\%$ στο Σχ. 5.1).

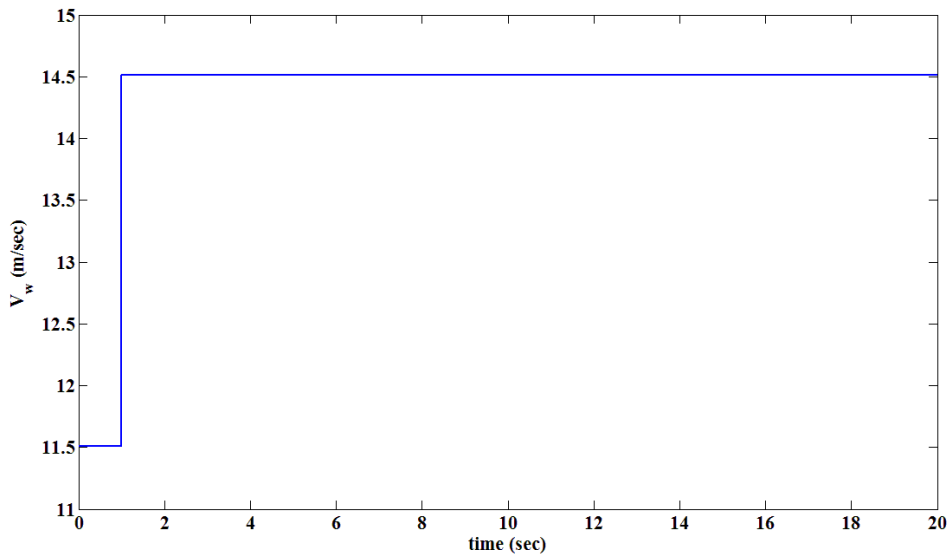
5.1.3 Απόκριση μοντέλου σε μεταβολές της ταχύτητας ανέμου

α. Βηματική αύξηση της ταχύτητας ανέμου

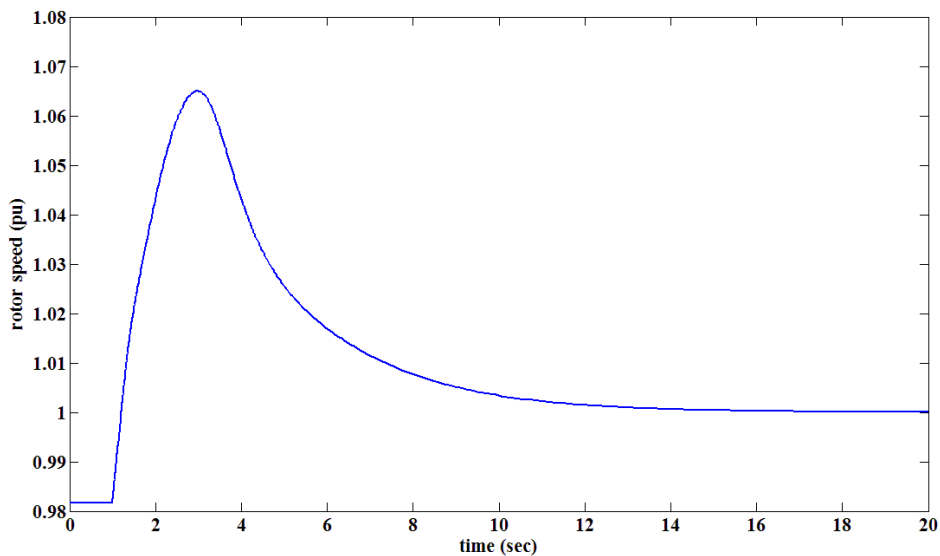
Στην συγκεκριμένη παράγραφο θα μελετηθεί η απόκριση του εξεταζόμενου μοντέλου για μια βηματική αύξηση της ταχύτητας ανέμου. Θεωρείται πως η αρχική ενεργός ισχύς του αιολικού πάρκου είναι 90MW και ότι η ταχύτητα ανέμου αυξάνει κατά 3m/sec. Η μεταβολή αυτή φαίνεται στο Σχ. 5.9.

Στο Σχ. 5.10 φαίνεται η απόκριση της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής της ανεμογεννήτριας για την εξεταζόμενη μεταβολή. Καταρχάς, λόγω της υψηλής αρχικής ενεργού ισχύος, οι στροφές της A/Γ είναι πολύ κοντά στις ονομαστικές. Με την αύξηση της ταχύτητας ανέμου αυξάνεται η εισερχόμενη αεροδυναμική ισχύς με αποτέλεσμα η μηχανή να επιταχύνεται. Ως αποτέλεσμα η ταχύτητα περιστροφής πολύ γρήγορα ξεπερνά την ονομαστική τιμή. Έτσι η ενεργός ισχύς αναφοράς φτάνει γρήγορα στο 1αμ χωρίς να το υπερβαίνει, όπως φαίνεται και στην καμπύλη του Σχ. 4.6. Αυτό σημαίνει πως πλέον η ταχύτητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας εξαρτάται από την ταχύτητα απόκρισης του ρυθμιστή της γωνίας βήματος, στην είσοδο του οποίου προκύπτει ένα θετικό σφάλμα (βλέπε Σχ. 4.4). Λόγω αυτού του σφάλματος, ο PI ελεγκτής του Σχ. 4.4 δίνει μια γωνία βήματος αναφοράς με

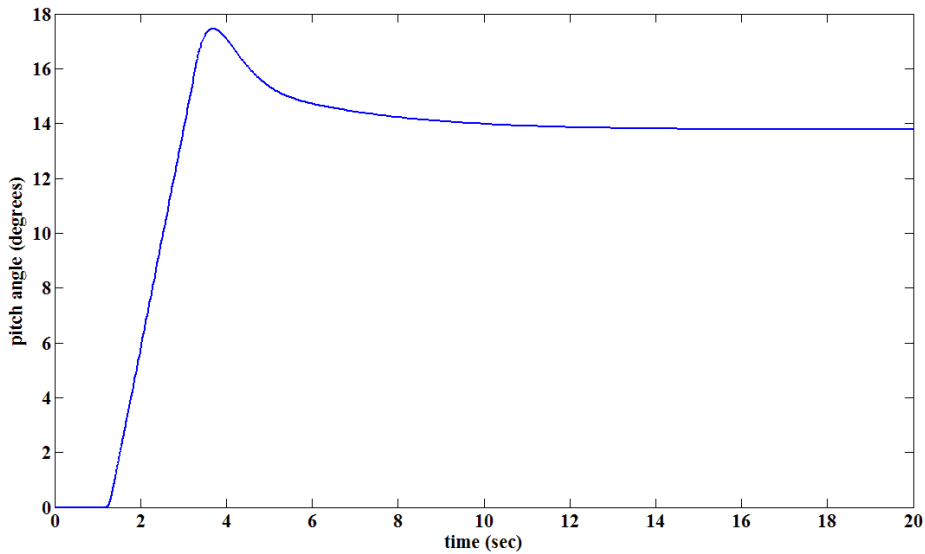
αποτέλεσμα να δρα ο σερβομηχανισμός της διάταξης και να αυξάνει την πραγματική γωνία βήματος των πτερυγίων, όπως φαίνεται και στο Σχ. 5.11. Η αύξηση της γωνίας βήματος μειώνει την μέγιστη αεροδυναμική ισχύ που μπορεί να εξαχθεί από τον άνεμο, με αποτέλεσμα η ισχύς αυτή να αρχίσει να μειώνεται και κάποια στιγμή να γίνει μικρότερη της ηλεκτρικής. Αυτό συμβαίνει τη στιγμή που παρατηρείται η μέγιστη τιμή της ταχύτητας περιστροφής της Α/Γ, δηλαδή περίπου όταν $t=3\text{sec}$, σύμφωνα με το Σχ. 5.10. Έτσι στην συνέχεια η μηχανή αρχίζει να επιβραδύνεται μέχρι τη στιγμή όπου η ταχύτητα περιστροφής θα γίνει ίση με την ονομαστική. Σε αυτή την ταχύτητα ο ρυθμιστής γωνίας βήματος σταματά να μεταβάλλει την γωνία βήματος αναφοράς με αποτέλεσμα το σύστημα να έρθει σε ισορροπία, καθώς διαμορφώθηκε εκείνη η γωνία βήματος η οποία έκανε την εισερχόμενη αεροδυναμική ισχύ ίση με την ηλεκτρική ισχύ της γεννήτριας.



Σχήμα 5.9 : Βηματική αύξηση της ταχύτητας ανέμου

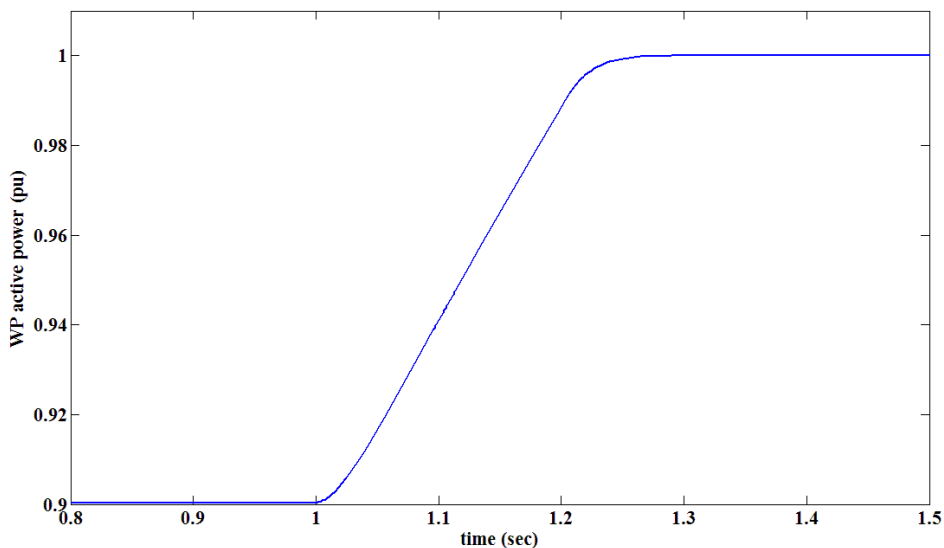


Σχήμα 5.10 : Γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της Α/Γ



Σχήμα 5.11 : Απόκριση γωνίας βήματος πτερυγίων

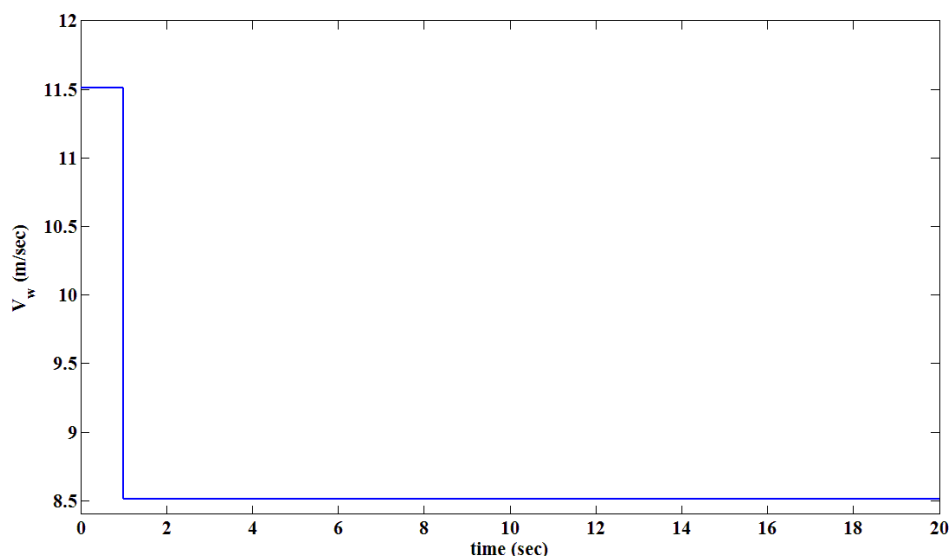
Τέλος, στο Σχ. 5.12 φαίνεται σε λεπτομέρεια η ενεργός ισχύς εξόδου του αιολικού πάρκου το οποίο αναπαρίσταται από μια ισοδύναμη ανεμογεννήτρια. Προφανώς η αύξηση της ενεργού ισχύος εξόδου του Α/Π διαμορφώνεται από την στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος, με την οποία καθυστέρηση εισάγουν οι βρόχοι ελέγχου του μετατροπέα. Αυτό επιβεβαιώνεται και παρατηρώντας την χρονική στιγμή όπου η ενεργός ισχύς γίνεται 1αμ, η οποία αντιστοιχεί στην στιγμή όπου η ταχύτητα περιστροφής της Α/Γ γίνεται ίση με 1αμ (λίγο μετά την χρονική στιγμή 1.2sec).



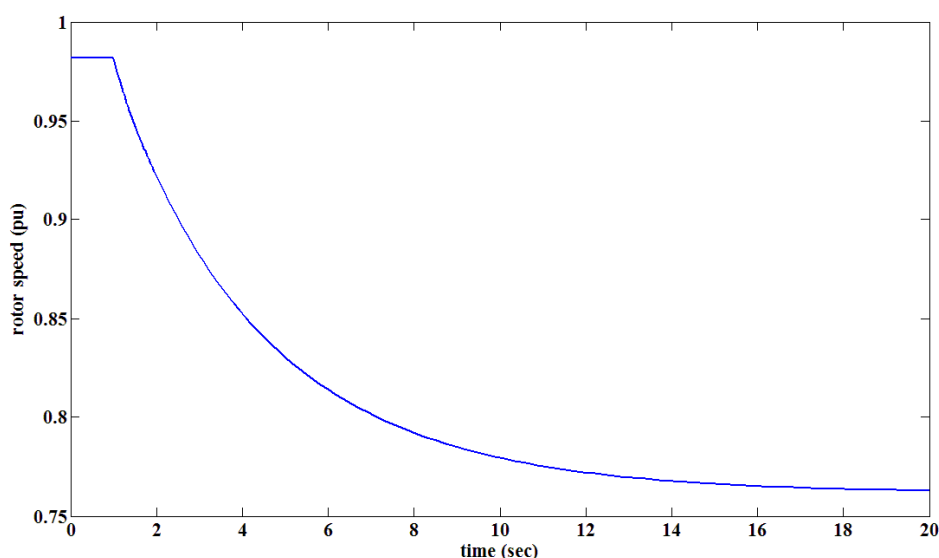
Σχήμα 5.12 : Ενεργός ισχύς εξόδου του Α/Π

β. Βηματική μείωση της ταχύτητας ανέμου

Σε αυτή τη παράγραφο μελετάται η απόκριση του μοντέλου της Α/Γ σε βηματική μείωση της ταχύτητας ανέμου κατά 3 m/sec. Και εδώ η αρχική ενεργός ισχύς του αιολικού πάρκου θεωρείται ίση με 0.9 αμ. Η μεταβολή αυτή φαίνεται στο Σχ. 5.13.



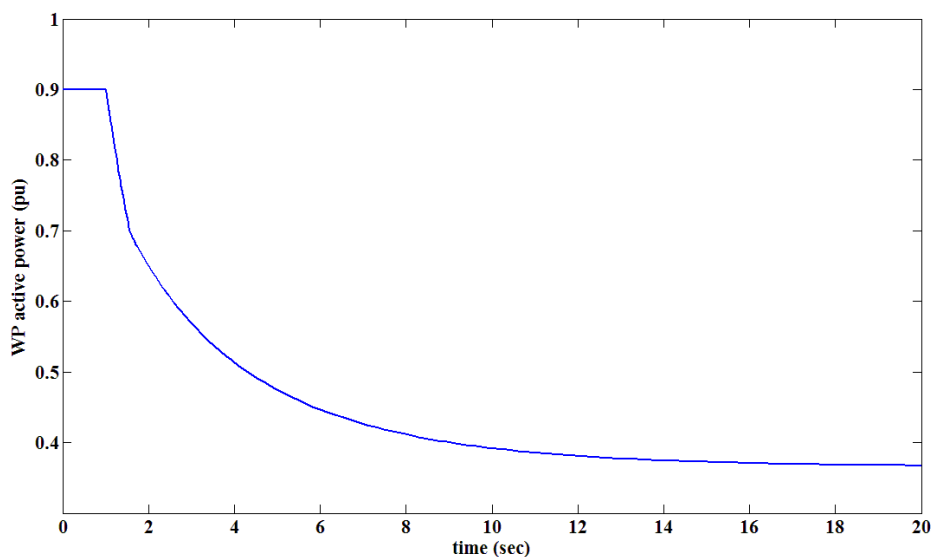
Σχήμα 5.13 : Βηματική αύξηση της ταχύτητας ανέμου



Σχήμα 5.14 : Γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της Α/Γ

Στο Σχ. 5.14 φαίνεται η απόκριση της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής της ανεμογεννήτριας. Συγκεκριμένα η μείωση της ταχύτητας ανέμου επιφέρει την μείωση της αεροδυναμικής ισχύος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την επιβράδυνση της μηχανής με ρυθμό που εξαρτάται καταρχάς από την αδράνεια της καθώς και από την επίδραση των στροφών της στην εισερχόμενη αεροδυναμική ισχύ και στην διαμορφούμενη ηλεκτρική ισχύ που προκύπτει από την στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος. Βλέπουμε πως επέρχεται η νέα μόνιμη κατάσταση σχεδόν μετά από 19sec από την στιγμή της μεταβολής.

Τέλος στο Σχ. 5.15 παρατίθεται και η ενεργός ισχύς εξόδου του πάρκου. Υπάρχει πλήρης συσχέτισή της με την απόκριση των στροφών της ανεμογεννήτριας λόγω της στρατηγικής μέγιστης απολαβής ισχύος. Αξίζει να σημειωθεί η αρχική πιο απότομη πτώση της ενεργού ισχύος της ανεμογεννήτριας μέχρι το 1.5sec περίπου που οφείλεται στο γεγονός ότι οι αρχικές στροφές της Α/Γ είναι πολύ κοντά στις ονομαστικές, οπότε σε εκείνη την περιοχή ταχύτητων δεν εφαρμόζεται η χαρακτηριστική ελέγχου του Σχ. 4.6 με την συνεχή γραμμή, αλλά αυτή με την διακεκομμένη.



Σχήμα 5.15 : Ενεργός ισχύς εξόδου του Α/Π

5.2 Αιολικό πάρκο συνδεδεμένο σε μικρό διασυνδεδεμένο σύστημα

5.2.1 Περιγραφή τοπολογίας

Στο Σχ. 5.16 παρουσιάζεται το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας στο οποίο είναι συνδεδεμένο το εξεταζόμενο αιολικό πάρκο (WP1). Στο δίκτυο θεωρούμε ότι υπάρχει και μια σύγχρονη γεννήτρια η οποία είναι συνδεδεμένη στον ζυγό 2. Επίσης στον ζυγό 1 υπάρχει και μια διασύνδεση με ένα άπειρο ΣΗΕ. Τα φορτία P_{L4} , P_{L6} θεωρούμε ότι είναι σταθερής αγωγιμότητας. Τα χαρακτηριστικά της σύνθετης αντίστασης που παρεμβάλλεται μεταξύ αιολικού πάρκου – σημείου κοινής σύνδεσης είναι τα ίδια με αυτά που έχουν δοθεί στον Πίνακα 5.3. Οι σύνθετες αντιστάσεις του υπόλοιπου συστήματος φαίνονται στο Σχ. 5.16. Το Α/Π θεωρούμε ότι είναι ονομαστικής ισχύος 100MW. Οι αρχικές συνθήκες λειτουργίας του συστήματος αυτού φαίνονται στον Πίνακα 5.4. Τέλος στον Πίνακα 5.5 παρατίθενται τα χαρακτηριστικά της σύγχρονης γεννήτριας που είναι συνδεδεμένη στον ζυγό 2 του δικτύου του Σχ. 5.16.

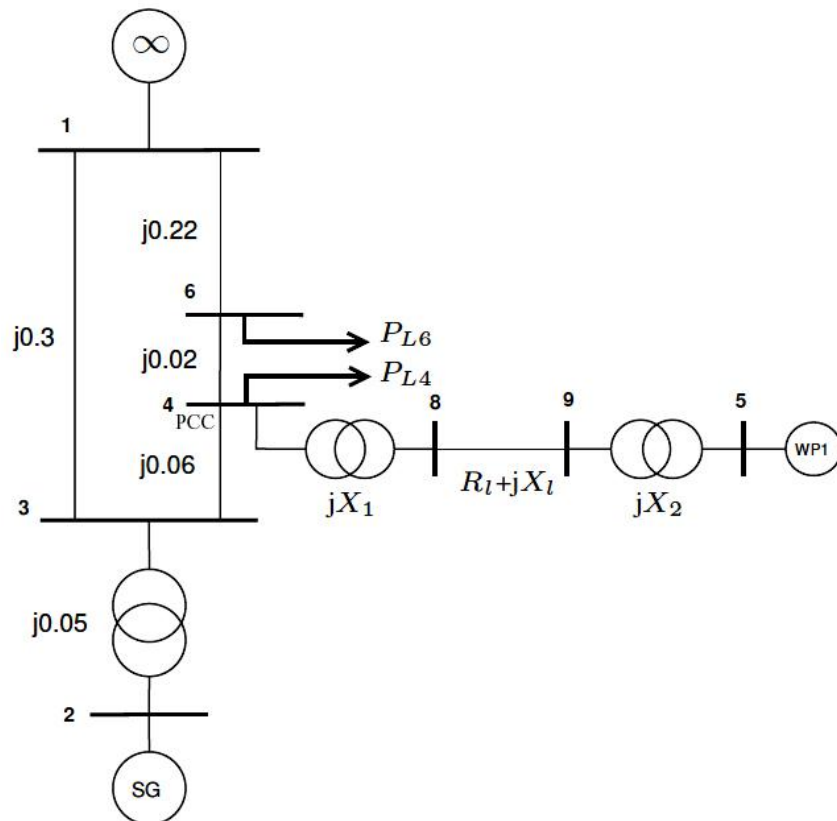
Πίνακας 5.4 : Αρχικές συνθήκες λειτουργίας του δικτύου

	Αρχική ενεργός ισχύς(MW)	Αρχική άεργος ισχύς(MVAr)
Αιολικό πάρκο	90	0
Σύγχρονη γεννήτρια	377.66	144.03
Φορτίο ζυγού 4	283	-
Φορτίο ζυγού 6	95	-

Πίνακας 5.5 : Χαρακτηριστικά σύγχρονης γεννήτριας του ζυγού 2

S_{nom} (MVA)	468
f_{nom} (Hz)	50
P_{nom} (MW)	377.66
R_s ($\alpha\mu$)	0.0
X_{ls} ($\alpha\mu$)	0.13
X_d ($\alpha\mu$)	2.3
X_q ($\alpha\mu$)	2.2

X'_d ($\alpha\mu$)	0.26
X'_q ($\alpha\mu$)	0.44
$T_{d0'}$ (sec)	6.54
$T_{q0'}$ (sec)	0.69
H(sec)	6.16
D	0.05
K_{PSS}	10
PSS_{max}, PSS_{min}	5%, -5%



Σχήμα 5.16 : Αιολικό πάρκο (WP1) συνδεδεμένο σε μικρό διασυνδεδεμένο σύστημα

5.2.2 Απόκριση δικτύου σε τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ΣΚΣ

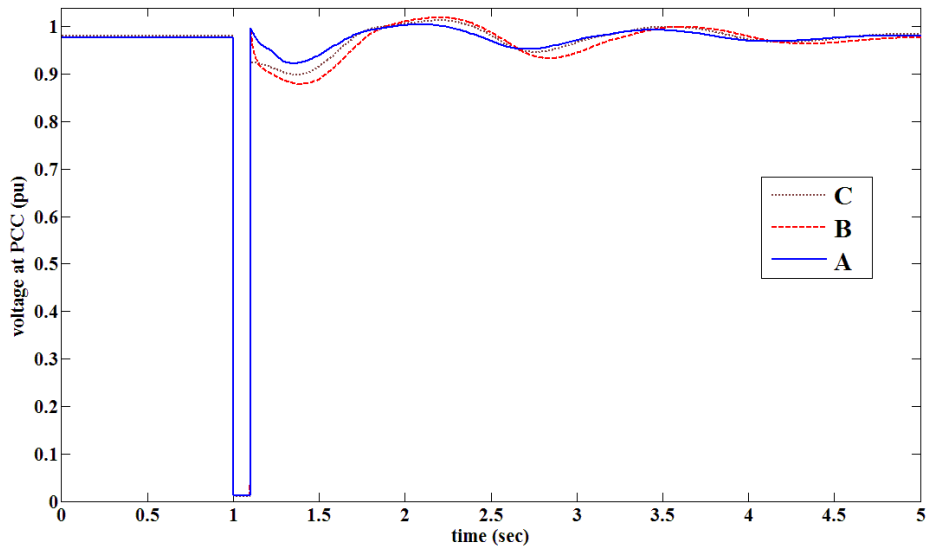
α. Αποτελέσματα προσομοιώσεων για αρχική τιμή ενεργού ισχύος 90MW

Στην συγκεκριμένη παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του μοντέλου για την περίπτωση όπου συμβεί ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα στο σημείο κοινής σύνδεσης (ζυγός 4 του Σχ. 5.16) με μια αντίσταση σφάλματος Z_f . Η αρχική ενεργός ισχύς εξόδου του πάρκου είναι 90MW. Επίσης θεωρούμε ότι στην σύγχρονη γεννήτρια του ζυγού 2 υπάρχει σταθεροποιητής (PSS), τα χαρακτηριστικά του οποίου δίνονται στον Πίνακα 5.5. Παρακάτω παρατίθενται όλα τα μεγέθη που είναι αναγκαία για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του εξεταζόμενου μοντέλου.

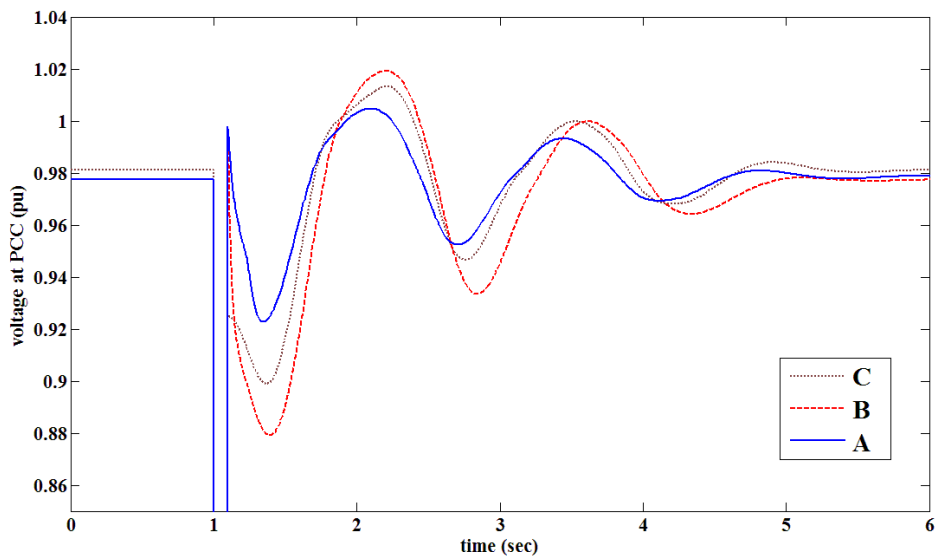
Στο Σχ. 5.17 φαίνεται η απόκριση της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις. Στην καμπύλη Α του Σχ. 5.17 φαίνεται η τάση για την περίπτωση όπου είναι συνδεδεμένο το αιολικό πάρκο και λειτουργεί με έλεγχο της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης. Η καμπύλη Β ισχύει όταν το Α/Π λειτουργεί με μοναδιαίο Σ.Ι. στην έξοδό του (για κανονικές συνθήκες λειτουργίας). Τέλος, η καμπύλη C ισχύει για την περίπτωση όπου δεν είναι συνδεδεμένο το Α/Π.

Όπως φαίνεται και στις τρεις περιπτώσεις η τάση στο ΣΚΣ κατά την διάρκεια του σφάλματος είναι σχεδόν μηδενική, λόγω του ότι το σφάλμα συμβαίνει στο ΣΚΣ με μια πολύ μικρή αντίσταση. Αυτή η μεγάλη βύθιση τάσης προκαλεί και την μεταγωγή ελέγχου του ρεύματος του μετατροπέα, όπως έχει εξηγηθεί στην παράγραφο 4.6.1. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τα Σχ. 5.18, 5.19, όπου η άεργος συνιστώσα αυξάνεται ακαριαία στην προκαθορισμένη της τιμή και αντίστοιχα η ενεργός συνιστώσα ρυθμίζεται ακαριαία στο 14% του μέγιστου ρεύματος του μετατροπέα.

Μετά την εκκαθάριση του σφάλματος υπάρχει εμφανής διαφοροποίηση στην απόκριση της τάσης για τις τρεις περιπτώσεις. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στο Σχ. 5.17.β οι μεγαλύτερες διακυμάνσεις στην τάση εμφανίζονται στην καμπύλη Β, όπου το Α/Π λειτουργεί με μοναδιαίο Σ.Ι. Εδώ πρέπει να ξεκαθαριστεί ότι η λειτουργία του μοναδιαίου Σ.Ι. ισχύει μόνο σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Αυτό φαίνεται και από το Σχ. 5.19 όπου το άεργο ρεύμα είχε ρυθμιστεί σε υψηλή τιμή κατά την διάρκεια του σφάλματος και μετά την εκκαθάρισή αυτού το ρεύμα επανέρχεται πολύ γρήγορα στο 0, με τη μικρή καθυστέρηση που εισάγουν οι βρόχοι ελέγχου του μετατροπέα. Συμπερασματικά λοιπόν, η έγχυση καθαρά ενεργού ισχύος από το Α/Π μετά από ένα σφάλμα επιδρά αρνητικά στην απόκριση του δικτύου διότι όπως φαίνεται και στην καμπύλη C του Σχ. 5.17 η τάση στο ΣΚΣ εμφανίζει μικρότερες διακυμάνσεις για το ίδιο σφάλμα όταν το Α/Π δεν είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο. Τέλος, οι μικρότερες διακυμάνσεις εμφανίζονται στην καμπύλη Α, όταν δηλαδή το Α/Π λειτουργεί με έλεγχο της τάσης στο ΣΚΣ. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς μέσω της δράσης του ελεγκτή τάσης του Σχ. 4.10 το Α/Π ρυθμίζει την άεργο ισχύ που εγχέει στο δίκτυο ώστε να επαναφέρει κατά το δυνατόν την τάση στην αρχική της τιμή. Στην καμπύλη Α του Σχ. 5.19 φαίνεται η άεργος συνιστώσα του ρεύματος εξόδου του μετατροπέα, ο οποίος και παράγει αλλά και καταναλώνει άεργο ισχύ, λόγω της προαναφερθείσας λειτουργίας.

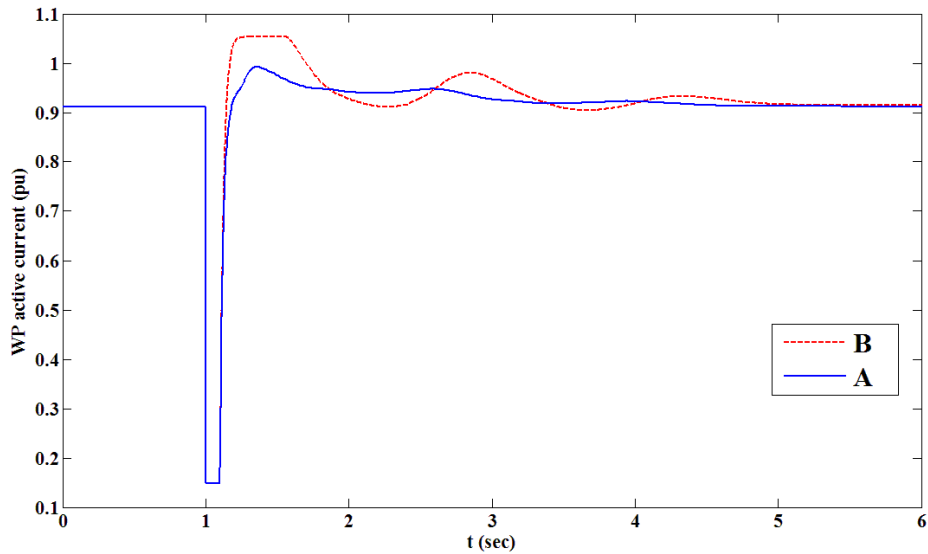


(α)

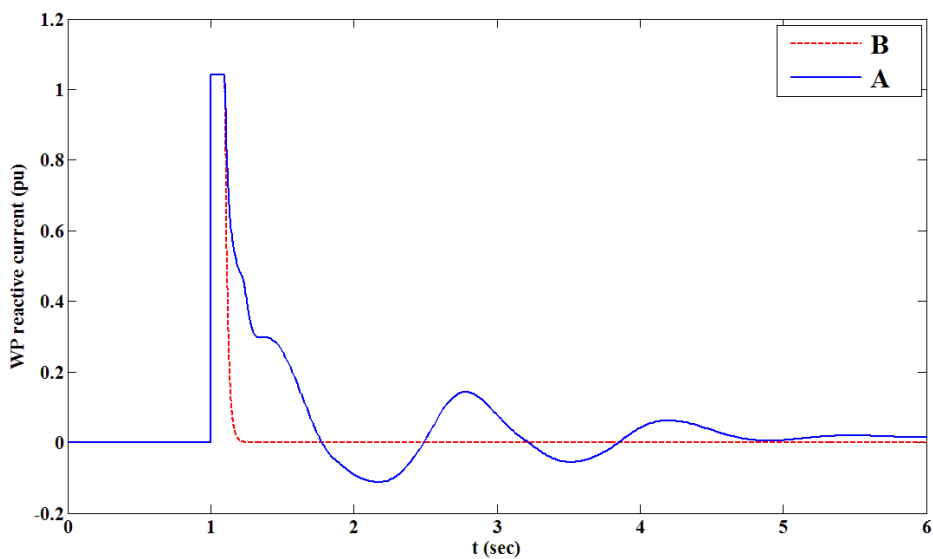


(β)

Σχήμα 5.17 : (α) Τάση στον ζυγό 4 για τριφασικό σφάλμα στο ΣΚΣ διάρκειας 100msec με αντίσταση σφάλματος 0.1% επαγωγική.
 Α : Αιολικό πάρκο με έλεγχο της τάσης στο ΣΚΣ
 Β : Αιολικό πάρκο με λειτουργία μοναδιαίου Σ.Ι. στην έξοδο του
 C : Απόκριση της τάσης χωρίς το αιολικό πάρκο
 (β) Μεγέθυνση του Σχ. 5.17.α



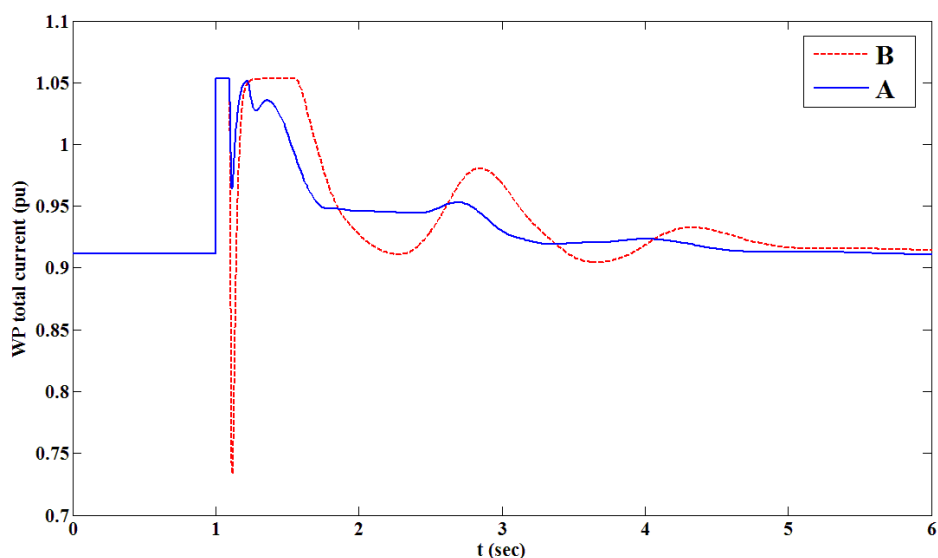
Σχήμα 5.18 : Ενεργός συνιστώσα του ρεύματος εξόδου του Α/Π
 Α : Αιολικό πάρκο με έλεγχο της τάσης στο ΣΚΣ
 Β : Αιολικό πάρκο με λειτουργία μοναδιαίου Σ.Ι. στην έξοδό του



Σχήμα 5.19 : Άεργος συνιστώσα του ρεύματος εξόδου του Α/Π
 Α : Αιολικό πάρκο με έλεγχο της τάσης στο ΣΚΣ
 Β : Αιολικό πάρκο με λειτουργία μοναδιαίου Σ.Ι. στην έξοδό του

Στο Σχ. 5.20 παρουσιάζεται η ενεργός τιμή (σε αμ) του συνολικού ρεύματος εξόδου του μετατροπέα για τις δύο περιπτώσεις ελέγχου της αέργου ισχύος. Όπως φαίνεται στην καμπύλη Β του σχήματος αυτού, ο μετατροπέας χρησιμοποιεί για περισσότερο χρονικό διάστημα την μέγιστη ικανότητά του και αυτό για να εγχύσει στο δίκτυο την ενεργό του ισχύ (αρχική τιμή στο 90% της ονομαστικής ισχύος του Α/Π) λόγω της χαμηλότερης τάσης που ισχύει στην περίπτωση αυτή. Αντίθετα, στην καμπύλη Α του Σχ. 5.20 η έγχυση αέργου ισχύος μειώνει την βύθιση τάσης στο ΣΚΣ

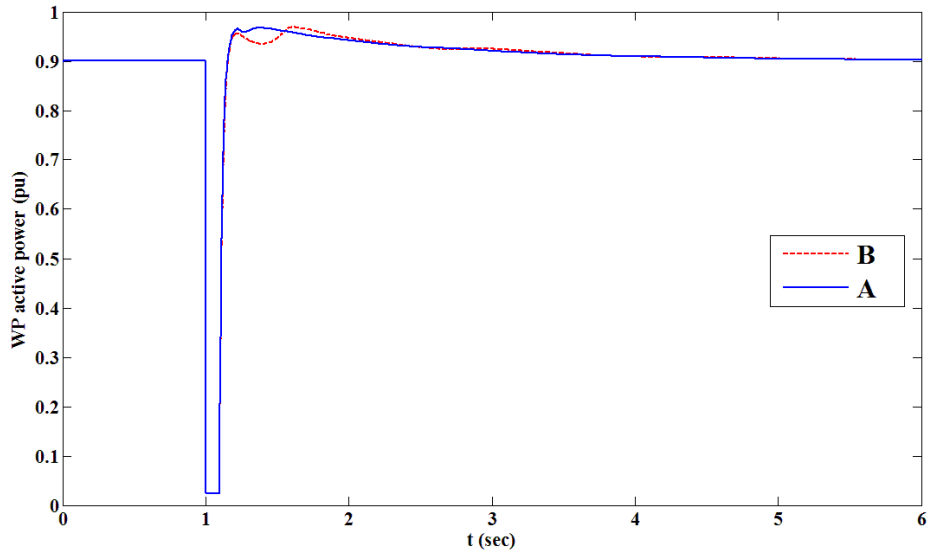
(άρα και της τερματικής) και έτσι εν τέλει δεν χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί όλο το μέγιστο ρεύμα του.



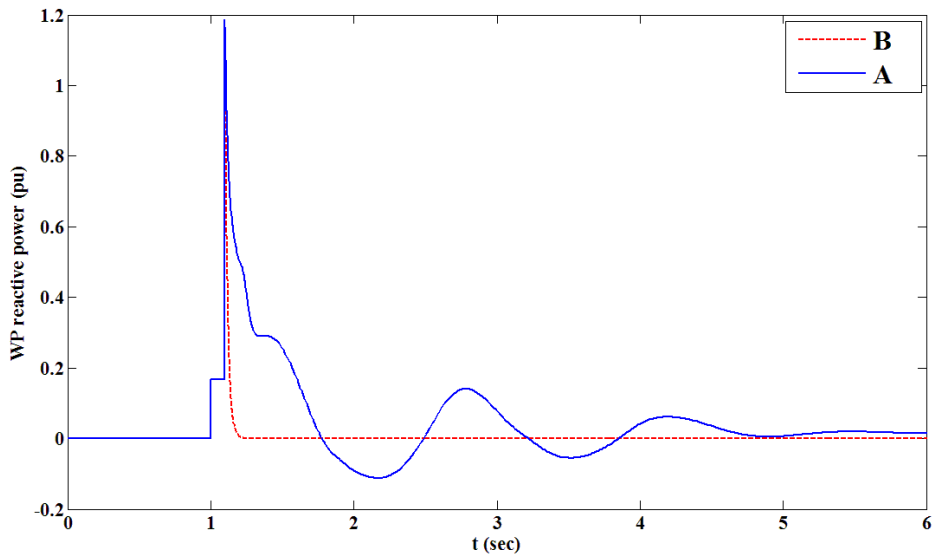
Σχήμα 5.20 : Κανονικοποιημένη ενεργός τιμή του ρεύματος εξόδου του Α/Π
Α : Αιολικό πάρκο με έλεγχο της τάσης στο ΣΚΣ
Β : Αιολικό πάρκο με λειτουργία μοναδιαίου Σ.Ι. στην έξοδό του

Στα Σχ. 5.21, 5.22 παρατίθενται οι αποκρίσεις της ενεργού και αέργου ισχύος του Α/Π. Όπως φαίνεται στο Σχ. 5.21, η ενεργός ισχύς στις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις λειτουργίας δεν διαφέρει ουσιαστικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην διαφοροποιείται ουσιαστικά η απόκριση της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής της Α/Γ, η οποία φαίνεται στο Σχ. 5.23. Βέβαια λόγω της εμφανούς διαφοράς στην πρώτη βύθιση της τάσης μεταξύ των δύο περιπτώσεων, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.17.β, παρατηρείται μια ελαφρά μείωση της ενεργού ισχύος στην λειτουργία μοναδιαίου Σ.Ι. Αυτή η ελαφρά μείωση προκαλεί μια λίγο πιο αργή επιβράδυνση της μηχανής, όπως φαίνεται και στην καμπύλη Β του Σχ. 5.23.

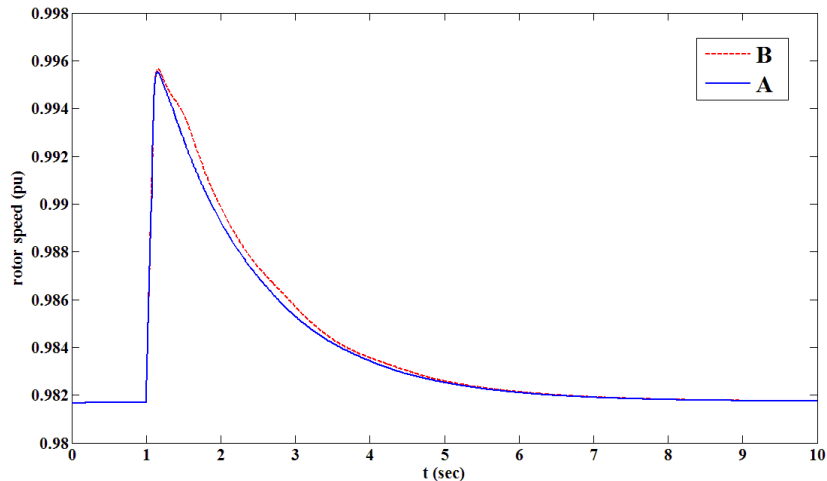
Τέλος, όσον αφορά την άεργο ισχύ του αιολικού πάρκου, παρατηρείται μια αιχμή στην τιμή της αμέσως μετά την εκκαθάριση του σφάλματος. Αυτό οφείλεται όπως έχει εξηγηθεί στο ότι μετά την εκκαθάριση το άεργο ρεύμα εξόδου δεν μειώνεται αμέσως, αλλά με μια μικρή καθυστέρηση η οποία οφείλεται στους βρόχους ελέγχου του μετατροπέα.



Σχήμα 5.21 : Ενεργός ισχύς εξόδου του Α/Π
 Α : Αιολικό πάρκο με έλεγχο της τάσης στο ΣΚΣ
 Β : Αιολικό πάρκο με λειτουργία μοναδιαίου Σ.Ι. στην έξοδό του



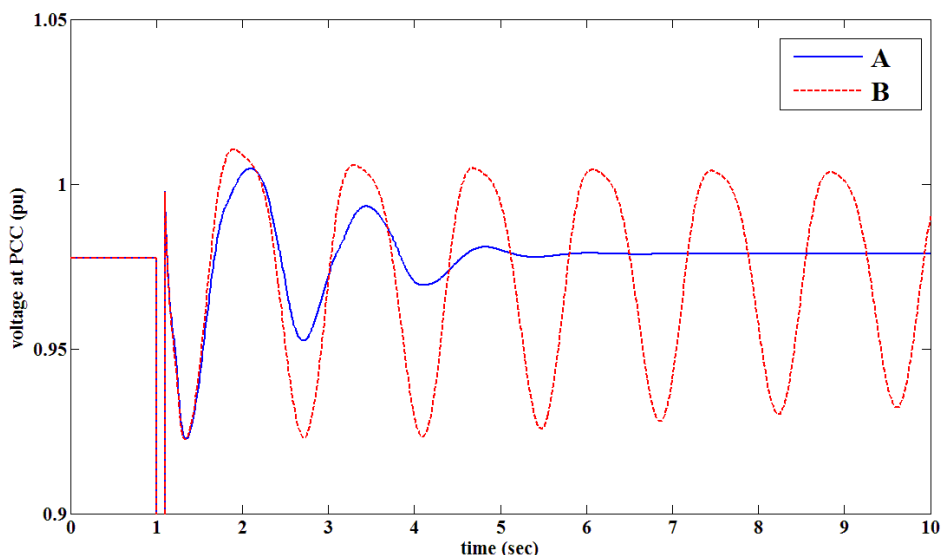
Σχήμα 5.22 : Άεργος ισχύς εξόδου του Α/Π
 Α : Αιολικό πάρκο με έλεγχο της τάσης στο ΣΚΣ
 Β : Αιολικό πάρκο με λειτουργία μοναδιαίου Σ.Ι. στην έξοδό του



Σχήμα 5.23 : Ταχύτητα περιστροφής της Α/Γ
 Α : Αιολικό πάρκο με έλεγχο της τάσης στο ΣΚΣ
 Β : Αιολικό πάρκο με λειτουργία μοναδιαίου Σ.Ι. στην έξοδό του

β. Επίδραση του σταθεροποιητή της σύγχρονης γεννήτριας

Όπως φαίνεται στο Σχ. 5.17 η τιμή της τάσης στο ΣΚΣ ισορροπεί μέσα σε λιγότερο από 5s μετά την εκκαθάριση του σφάλματος, και για τις τρεις περιπτώσεις. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην λειτουργία του σταθεροποιητή (PSS) που υπάρχει στην σύγχρονη γεννήτρια του εξεταζόμενου συστήματος (SG στο Σχ. 5.16). Όπως είναι γνωστό, ο σταθεροποιητής είναι σχεδιασμένος να λειτουργεί έτσι ώστε να αποσβένει τις ταλαντώσεις της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής της γεννήτριας, δίνοντας μια καθαρά θετική ροπή απόσβεσης. Η μη χρήση του οδηγεί σε παρατεταμένες ταλαντώσεις του δρομέα της γεννήτριας που εμφανίζονται μετά από μια διαταραχή, με αποτέλεσμα οι ταλαντώσεις αυτές να εμφανίζονται και στην ενεργό ισχύ που εγχέεται στο δίκτυο.



Σχήμα 5.24 : Τάση στο ΣΚΣ για 3φ σφάλμα σε αυτό, διάρκειας 100msec και αντίστασης σφάλματος 0.1% επαγωγική.
 Α : Απόκριση με σταθεροποιητή στην σύγχρονη γεννήτρια του ζυγού 2
 Β : Απόκριση χωρίς σταθεροποιητή στην σύγχρονη γεννήτρια του ζυγού 2

Θεωρώντας ότι το αιολικό πάρκο λειτουργεί με έλεγχο της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης, μελετήθηκε η απόκριση της τάσης στο ΣΚΣ για το ίδιο σφάλμα, όπου στην μια περίπτωση χρησιμοποιείται σταθεροποιητής στην σύγχρονη γεννήτρια του ζυγού 2 και στη άλλη περίπτωση δεν χρησιμοποιείται. Η απόκριση της τάσης στις δύο περιπτώσεις παρατίθεται στο Σχ. 5.24. Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό η μη χρήση του σταθεροποιητή οδηγεί σε παρατεταμένες ταλαντώσεις της τάσης, το πλάτος των οποίων φθίνει με πολύ αργό ρυθμό.

Συμπερασματικά λοιπόν η χρήση του σταθεροποιητή είναι αναγκαία και για την απόσβεση των ταλαντώσεων που υφίστανται οι τάσεις του εξεταζόμενου συστήματος μετά από μια διαταραχή. Αξίζει να σημειωθεί πως η δράση του δεν συμβάλλει στην μείωση της πρώτης βύθισης τάσης μετά την εκκαθάριση του σφάλματος, όπως φαίνεται και στο Σχ. 5.24 για $t=1.5\text{sec}$.

5.2.3 Απόκριση μοντέλου σε τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 3

α. Αποτελέσματα προσομοιώσεων για αρχική τιμή ενεργού ισχύος 90MW

Στην συγκεκριμένη παράγραφο θα εξεταστεί η απόκριση του μοντέλου για τριφασικό βραχυκύκλωμα διάρκειας 100msec με αντίσταση σφάλματος 0.5% στον ζυγό 3, που βρίσκεται πιο κοντά στην σύγχρονη γεννήτρια του εξεταζόμενου συστήματος (Σχ. 5.16).

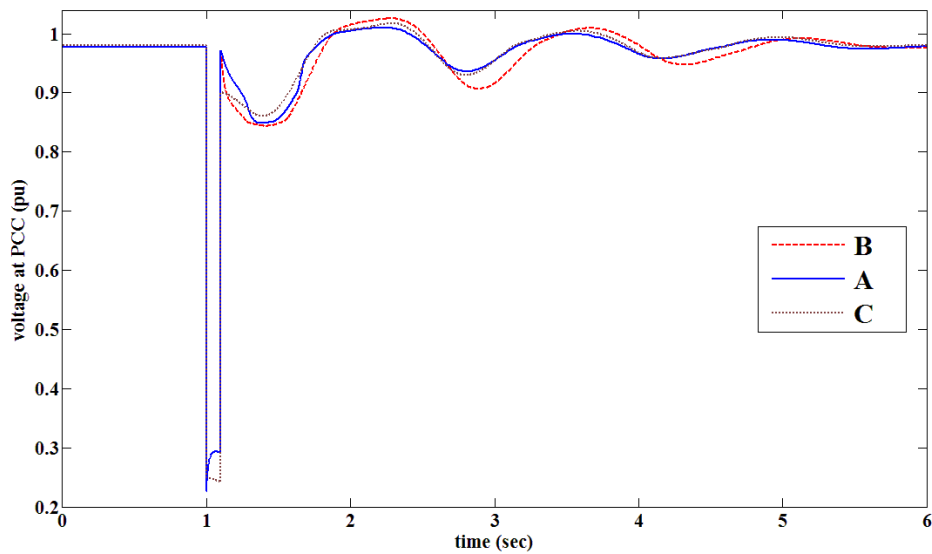
Στο Σχ. 5.25 παρατίθεται η απόκριση της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης για τις τρεις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Όπως φαίνεται στην καμπύλη Β του σχήματος αυτού, επιβεβαιώνεται ξανά το γεγονός ότι η έγχυση καθαρά ενεργού ισχύος από το Α/Π επιδρά αρνητικά στην απόκριση του δικτύου μετά από ένα σφάλμα. Αυτό όμως που παρατηρείται στην συγκεκριμένη παράγραφο είναι πως η πρώτη βύθιση τάσης μετά το σφάλμα στην λειτουργία ελέγχου τάσης είναι και αυτή μεγαλύτερη από την βύθιση που θα υπήρχε αν δεν ήταν συνδεδεμένο το αιολικό πάρκο. Αυτό οφείλεται στην υψηλή αρχική ενεργό ισχύ εξόδου, διότι τώρα που το σφάλμα συμβαίνει πιο κοντά στην σύγχρονη γεννήτρια του δικτύου οι διακυμάνσεις της τάσης είναι μεγαλύτερες και έτσι προκειμένου το Α/Π να εγχύσει την ενεργό του ισχύ χρησιμοποιεί όλο το μέγιστο ρεύμα του μετατροπέα για αυτό το σκοπό, με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν περιθώρια για παραγωγή αέργου ισχύος και ως δίνει σήμα ο ελεγκτής της τάσης στο ΣΚΣ. Αυτό φαίνεται και στο Σχ. 5.26 όπου και στις δύο περιπτώσεις το ενεργό ρεύμα εξόδου του Α/Π ρυθμίζεται στην μέγιστη τιμή του για λίγο χρόνο μετά την εκκαθάριση του σφάλματος.

Αξίζει να σημειωθεί πως ιδίως στην λειτουργία μοναδιαίου Σ.Ι., η τάση στο ΣΚΣ μειώνεται για λίγο κάτω από το 85% με αποτέλεσμα να δρα ο περιοριστής του ενεργού ρεύματος του μετατροπέα και να δοθεί έτσι το αντίστοιχο περιθώριο για έγχυση αέργου ρεύματος (βάσει του Σχ. 1.9). Γι' αυτό στην καμπύλη Β του Σχ. 5.27 παρατηρείται μια μικρή αύξηση του αέργου ρεύματος εξόδου περίπου τη χρονική στιγμή $t=1.5\text{sec}$.

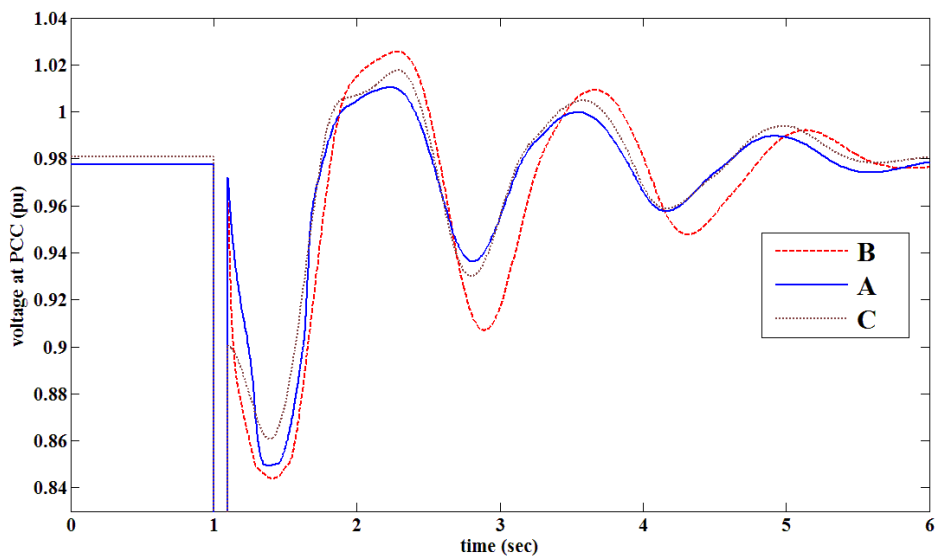
Όπως φαίνεται στο Σχ. 5. 28 λόγω της μεγαλύτερης βύθισης τάσης σε σχέση με αυτή της προηγούμενης παραγράφου, το μέτρο του ρεύματος εξόδου του μετατροπέα φτάνει στην μέγιστη τιμή του και στις δύο περιπτώσεις λειτουργίας κατά την διάρκεια της πρώτης βύθισης τάσης.

Τέλος ενδεικτικά παρατίθενται και οι αποκρίσεις της ενεργού και αέργου ισχύος στα Σχ. 5.29, 5.30 η μορφή των οποίων συμβαδίζει με τις αντίστοιχες αποκρίσεις των

ρευμάτων. Και εδώ δεν υπάρχει ουσιαστική διαφορά στην απόκριση της ενεργού ισχύος του Α/Π με αποτέλεσμα και η ταχύτητα περιστροφής της Α/Γ να μην αλλάζει ιδιαίτερα στις δύο περιπτώσεις, όπως φαίνεται και στο Σχ. 5.31.

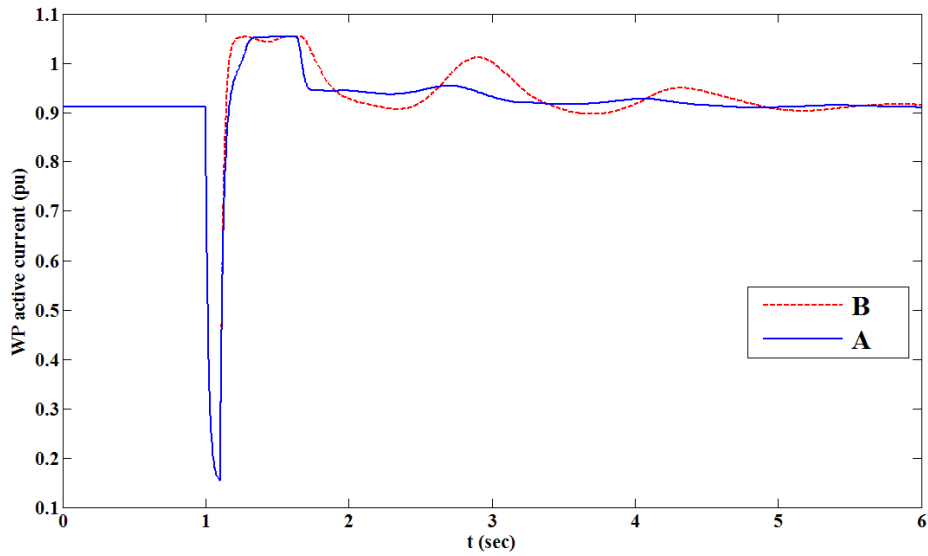


(α)

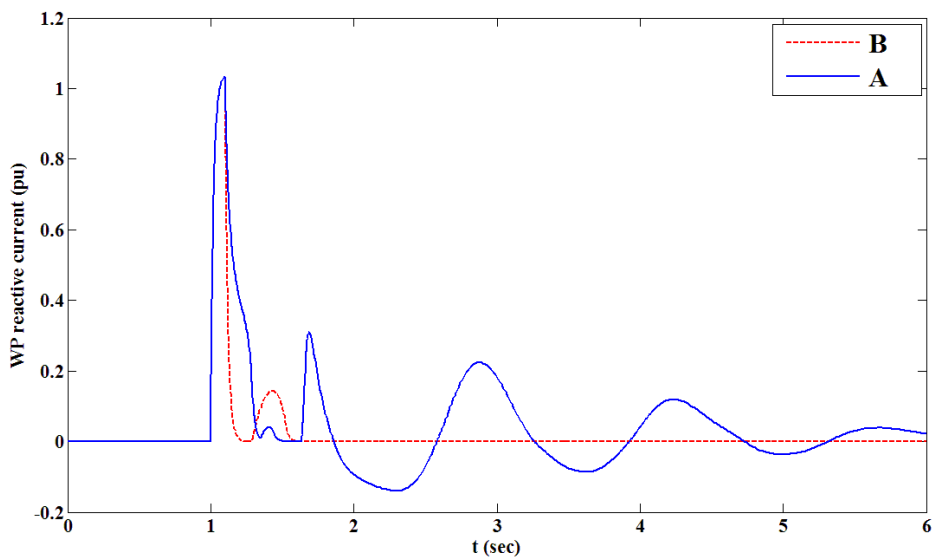


(β)

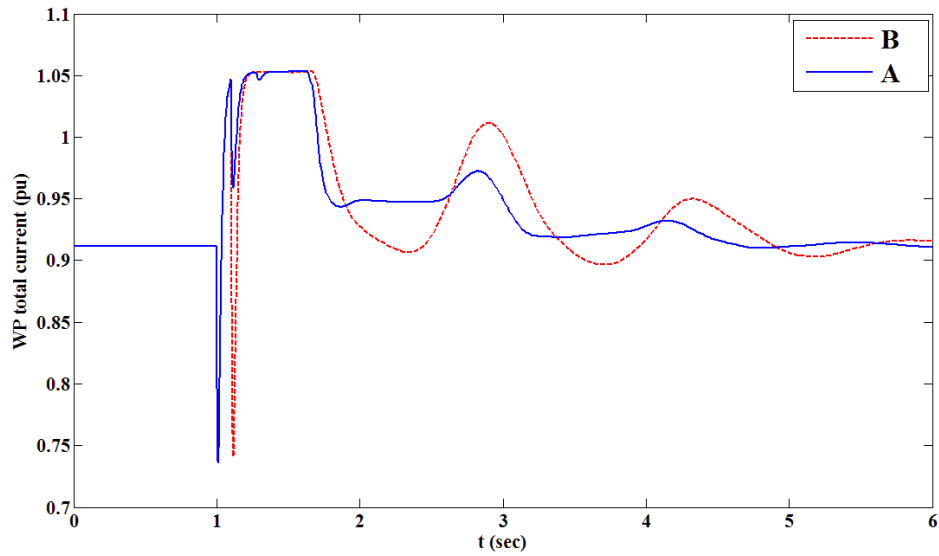
Σχήμα 5.25 : (α) Τάση στο ΣΚΣ για τριφασικό σφάλμα στον ζυγό 3, διάρκειας 100msec με αντίσταση σφάλματος 0.5% επαγωγική.
 Α : Αιολικό πάρκο με έλεγχο της τάσης στο ΣΚΣ
 Β : Αιολικό πάρκο με λειτουργία μοναδιαίου Σ.Ι. στην έξοδό του
 C : Απόκριση της τάσης χωρίς το αιολικό πάρκο
 (β) Μεγέθυνση του Σχ. 5.25.α



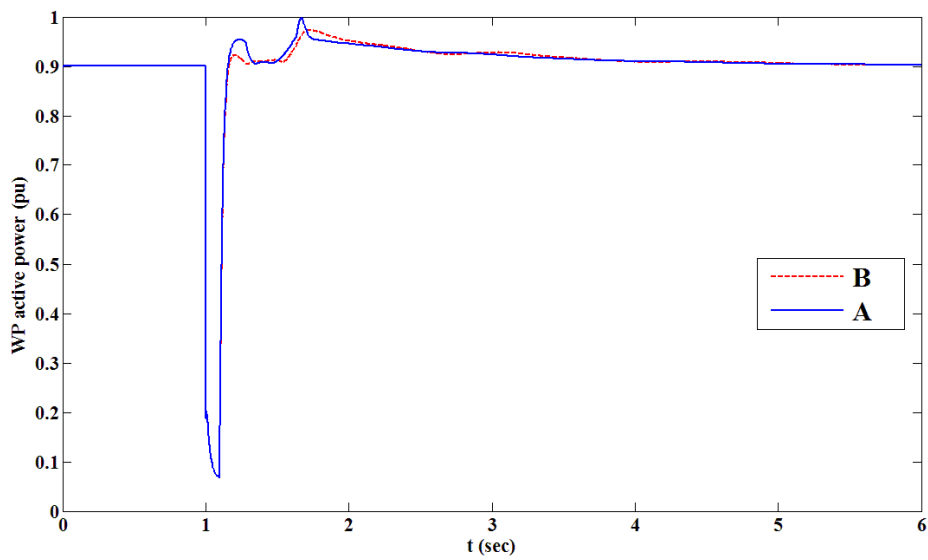
Σχήμα 5.26 : Ενεργός συνιστώσα του ρεύματος εξόδου του Α/Π
 Α : Αιολικό πάρκο με έλεγχο της τάσης στο ΣΚΣ
 Β : Αιολικό πάρκο με λειτουργία μοναδιαίου Σ.Ι. στην έξοδό του



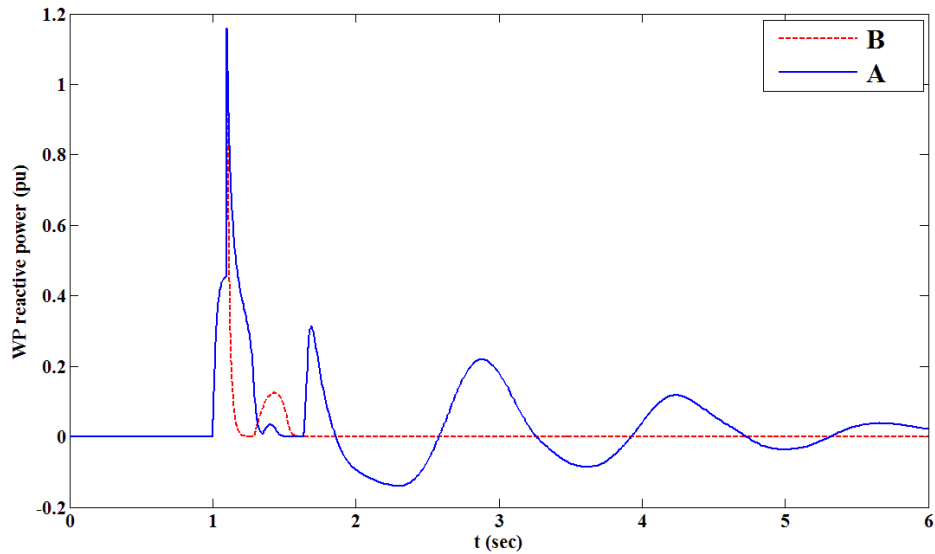
Σχήμα 5.27 : Άεργος συνιστώσα του ρεύματος εξόδου του Α/Π
 Α : Αιολικό πάρκο με έλεγχο της τάσης στο ΣΚΣ
 Β : Αιολικό πάρκο με λειτουργία μοναδιαίου Σ.Ι. στην έξοδό του



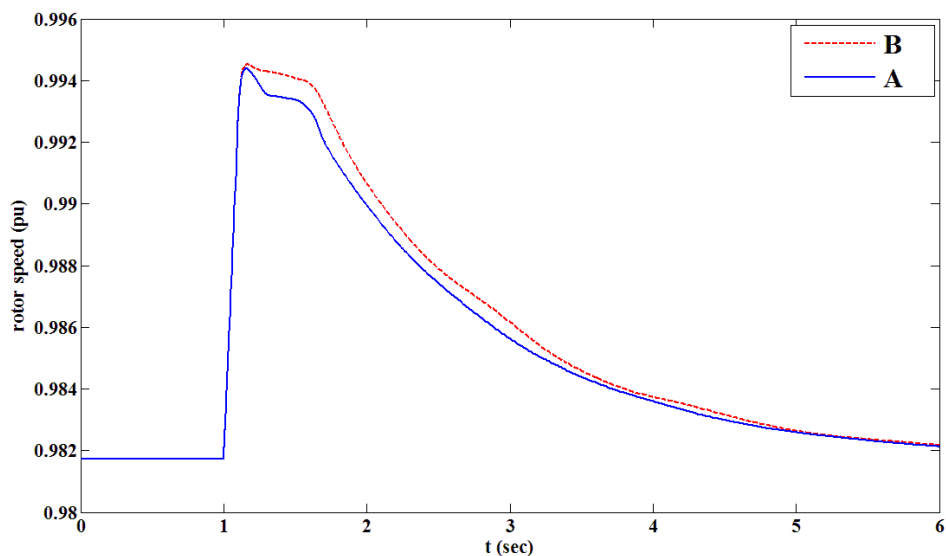
Σχήμα 5.28 : Κανονικοποιημένη ενεργός τιμή του ρεύματος εξόδου του Α/Π
 Α : Αιολικό πάρκο με έλεγχο της τάσης στο ΣΚΣ
 Β : Αιολικό πάρκο με λειτουργία μοναδιαίου Σ.Ι. στην έξοδό του



Σχήμα 5.29 : Ενεργός ισχύς εξόδου του Α/Π
 Α : Αιολικό πάρκο με έλεγχο της τάσης στο ΣΚΣ
 Β : Αιολικό πάρκο με λειτουργία μοναδιαίου Σ.Ι. στην έξοδό του



Σχήμα 5.30 : Άεργος ισχύς εξόδου του Α/Π
 Α : Αιολικό πάρκο με έλεγχο της τάσης στο ΣΚΣ
 Β : Αιολικό πάρκο με λειτουργία μοναδιαίου Σ.Ι. στην έξοδό του



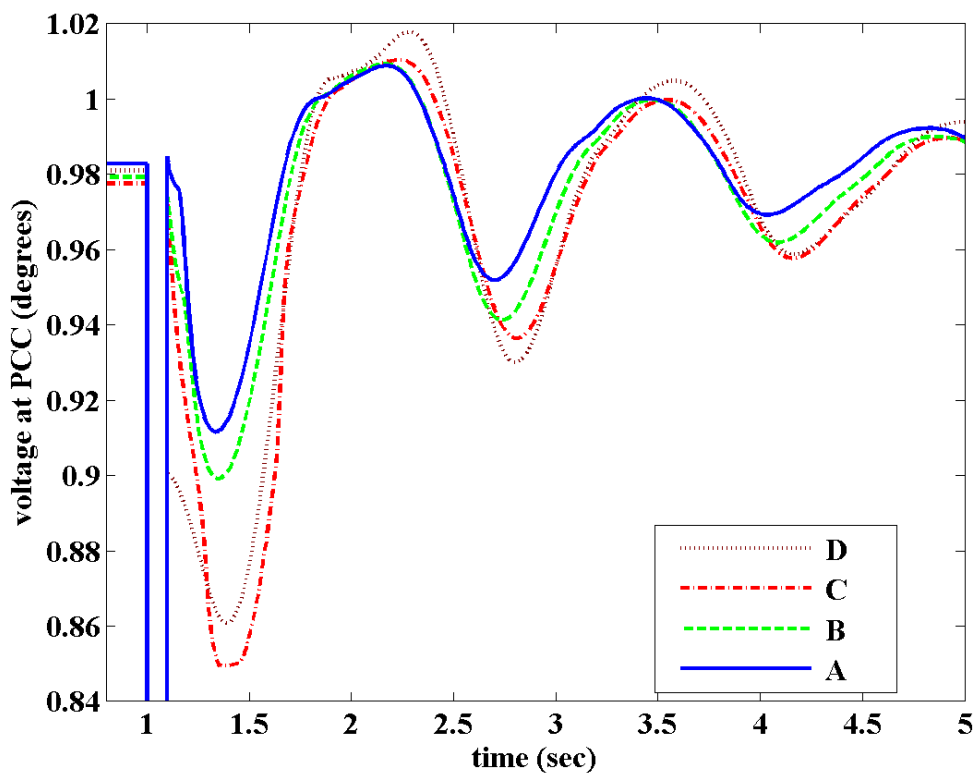
Σχήμα 5.31 : Ταχύτητα περιστροφής της Α/Γ
 Α : Αιολικό πάρκο με έλεγχο της τάσης στο ΣΚΣ
 Β : Αιολικό πάρκο με λειτουργία μοναδιαίου Σ.Ι. στην έξοδό του

γ. Συμβολή στην μεταβατική ευστάθεια (επίδραση ενεργού παραγωγής)

Τα αποτελέσματα της προηγούμενης παραγράφου ισχύουν όταν η αρχική ενεργός ισχύς εξόδου του πάρκου είναι 90MW (90% της ονομαστικής ενεργού ισχύος του Α/Π). Στην συνέχεια θα γίνει μια διερεύνηση του κατά πόσο η αρχική τιμή της ενεργού ισχύος του Α/Π πριν το σφάλμα επηρεάζει την απόκριση του δικτύου, για τις

ίδιες συνθήκες σφάλματος με αυτές της προηγούμενης ενότητας, δηλαδή για σφάλμα στον ζυγό 3, διάρκειας 100msec και αντίστασης σφάλματος 0.5% επαγωγική.

Στο Σχ. 5.32 φαίνονται οι αποκρίσεις της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης για διάφορες αρχικές τιμές της ενεργού ισχύος του αιολικού πάρκου. Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, υπάρχει σημαντική διαφορά στην απόκριση της τάσης μεταξύ των καμπυλών B και C και ιδίως στην πρώτη βύθιση τάσης. Παρόλα αυτά η διαφορά της αρχικής ενεργού ισχύος που αντιστοιχεί σε αυτές τις καμπύλες είναι μόνο 10% (90% στην καμπύλη C και 80% στην καμπύλη B). Αντίθετα στις καμπύλες A και B η διαφορά στην αρχική ενεργό ισχύ είναι 50% αλλά η διαφορά στην απόκριση της τάσης είναι σχετικά μικρή. Από τα παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε πως για το συγκεκριμένο είδος σφάλματος, αν η αρχική ενεργός ισχύς είναι μικρότερη από την τιμή των 90MW (όπως αποδεικνύεται από τις αποκρίσεις του Σχ. 5.32) η άεργος ισχύς που θα εγχύσει το αιολικό πάρκο στο δίκτυο θα είναι αρκετή προκειμένου να υπάρξει σημαντική μείωση στις διακυμάνσεις της τάσης του δικτύου.



Σχήμα 5.32 : Τάση στο ΣΚΣ, λειτουργία A/Π με έλεγχο της τάσης αυτής

A : Αρχική ενεργός ισχύς 30MW

B : Αρχική ενεργός ισχύς 80MW

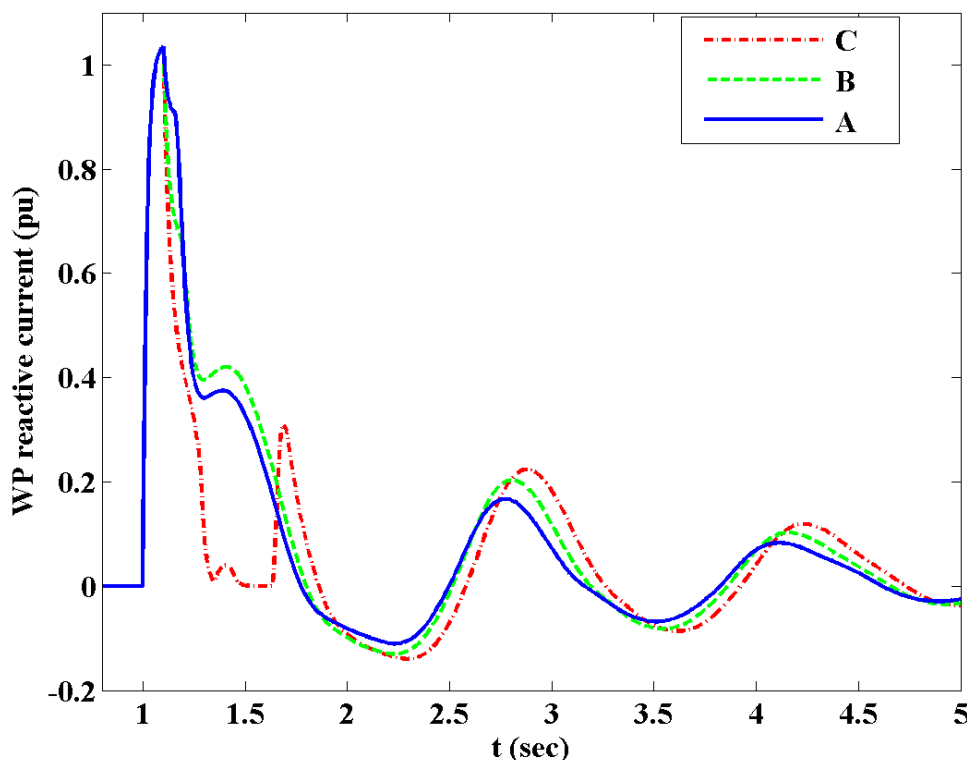
C : Αρχική ενεργός ισχύς 90MW

D : Απόκριση τάσης όταν το A/Π δεν είναι συνδεδεμένο

Στο Σχ. 5.33 παρατίθενται και οι αντίστοιχες αποκρίσεις της άεργου συνιστώσας του ρεύματος εξόδου του A/Π. Στην καμπύλη C φαίνεται χαρακτηριστικά η έλλειψη παραγωγής άεργου ισχύος κατά την διάρκεια της πρώτης βύθισης τάσης (στο χρονικό διάστημα γύρω από την χρονική στιγμή 1.5 sec), καθώς η αρχική ενεργός ισχύς είναι τέτοια όπου απαιτείται όλο το μέγιστο ρεύμα του μετατροπέα προκειμένου αυτή να

εγχυθεί στο δίκτυο. Αντίθετα στις δύο άλλες καμπύλες μπορεί να δοθεί η απαιτούμενη άεργος ισχύς.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι το Α/Π συμβάλλει θετικά στην μεταβατική ευστάθεια του συστήματος όσο έχει τη δυνατότητα παραγωγής αέργου ισχύος, ενώ συμβάλλει αρνητικά στην ευστάθεια όταν δεν έχει αυτή τη δυνατότητα.



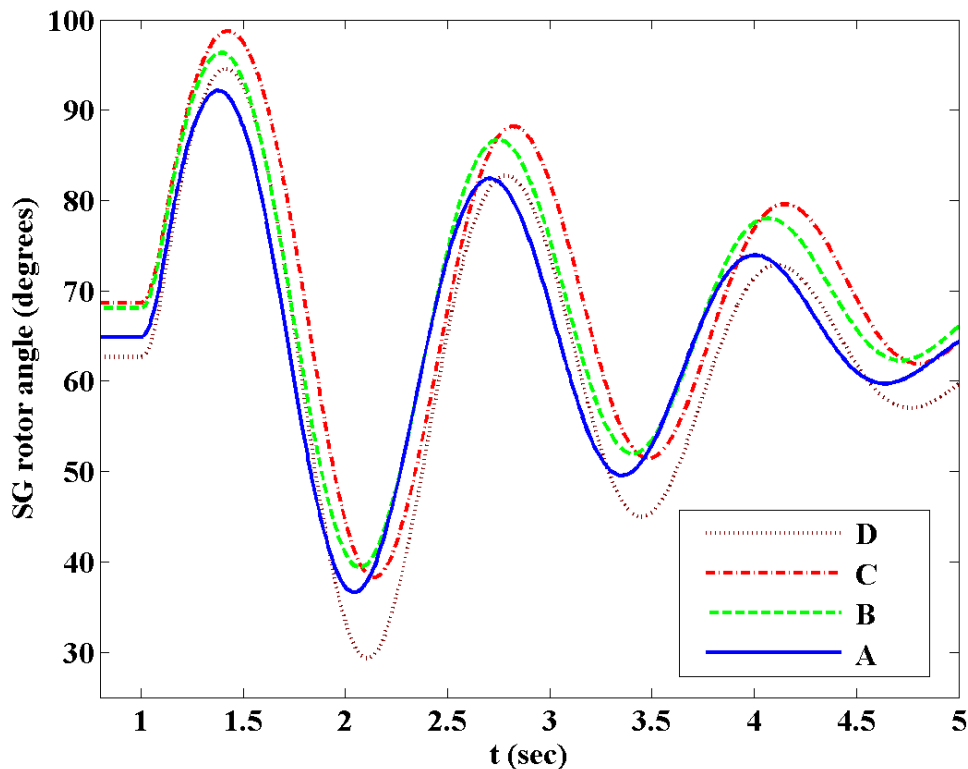
Σχήμα 5.33 : Άεργος συνιστώσα του ρεύματος εξόδου του Α/Π

A : Αρχική ενεργός ισχύς 30MW

B : Αρχική ενεργός ισχύς 80MW

C : Αρχική ενεργός ισχύς 90MW

Στο Σχ. 5.34 παρατίθενται οι αποκρίσεις της γωνίας του δρομέα της σύγχρονης γεννήτριας του ζυγού 2 για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Καταρχάς μπορούμε να συμπεράνουμε πως τις μικρότερες ταλαντώσεις η σύγχρονη γεννήτρια τις εμφανίζει στην καμπύλη A του Σχ. 5.34. Επίσης στην καμπύλη A η συχνότητα των ταλαντώσεων είναι ελαφρώς υψηλότερη σε σχέση με τις άλλες περιπτώσεις. Αντίθετα, στην καμπύλη C του ίδιου σχήματος η συχνότητα των ταλαντώσεων της γωνία του δρομέα της σύγχρονης γεννήτριας είναι εμφανώς μικρότερη. Η διαφορά μεταξύ των δύο αυτών αποκρίσεων οφείλεται στο γεγονός ότι στην καμπύλη A το αιολικό πάρκο έχει τη δυνατότητα παραγωγής αέργου ισχύος με αποτέλεσμα τα επίπεδα της τάσης να είναι αυξημένα και έτσι η ενεργός ισχύς που μπορεί να εγχυθεί στο δίκτυο από τη σύγχρονη γεννήτρια να είναι και αυτή αυξημένη, πράγμα που προκαλεί την εντονότερη επιβράδυνση της μηχανής μετά την εκκαθάριση του σφάλματος.



Σχήμα 5.34 : Γωνία δρομέα σύγχρονης γεννήτριας ζυγού 2

A : Αρχική ενεργός ισχύς του αιολικού πάρκου 30MW

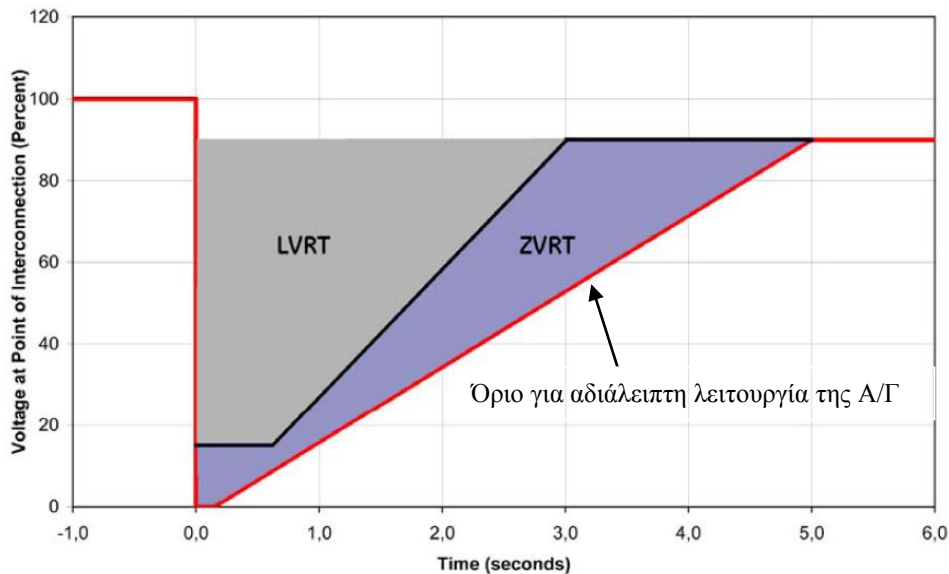
B : Αρχική ενεργός ισχύς του αιολικού πάρκου 80MW

C : Αρχική ενεργός ισχύς του αιολικού πάρκου 90MW

D : Απόκριση όταν το αιολικό πάρκο δεν είναι συνδεδεμένο

Στην συνέχεια της ενότητας αυτής μέσω προσομοιώσεων θα υπολογιστούν οι κρίσιμοι χρόνοι εκκαθάρισης που αντιστοιχούν σε κάθε μία από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις, ώστε να αξιολογηθεί ακριβέστερα η συμβολή του αιολικού πάρκου στη μεταβατική ευστάθεια. Ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης είναι η μέγιστη χρονική διάρκεια ενός σφάλματος που μετά την εκκαθάρισή του η σύγχρονη γεννήτρια παραμένει συγχρονισμένη με το δίκτυο.

Βασική υπόθεση στην συγκεκριμένη ανάλυση είναι ότι μέχρι την χρονική στιγμή όπου παρατηρείται η διατήρηση ή η απώλεια συγχρονισμού της σύγχρονης γεννήτριας το αιολικό πάρκο παραμένει συνδεδεμένο στο δίκτυο. Η υπόθεση αυτή είναι ρεαλιστική καθώς σύμφωνα και με την αναφορά [8] η σημερινή τεχνολογία του εξεταζόμενου είδους ανεμογεννήτριας (με πλήρη μετατροπέα) είναι τέτοια ώστε οι ανεμογεννήτριες αυτές μπορούν να παραμείνουν συνδεδεμένες και να τροφοδοτούν το δίκτυο έως και για 5 δευτερόλεπτα κατά την διάρκεια βύθισης της τάσης του δικτύου. Για παράδειγμα στο Σχ. 5.35 φαίνεται η δυνατότητα αδιάλειπτης παροχής ισχύος από μια ανεμογεννήτρια με πλήρη μετατροπέα κατά την διάρκεια διαταραχών της τάσης του δικτύου.



Σχήμα 5.35: Δυνατότητα αδιάλειπτης παροχής ισχύος από ανεμογεννήτρια με πλήρη μετατροπέα της εταιρίας GE [59]

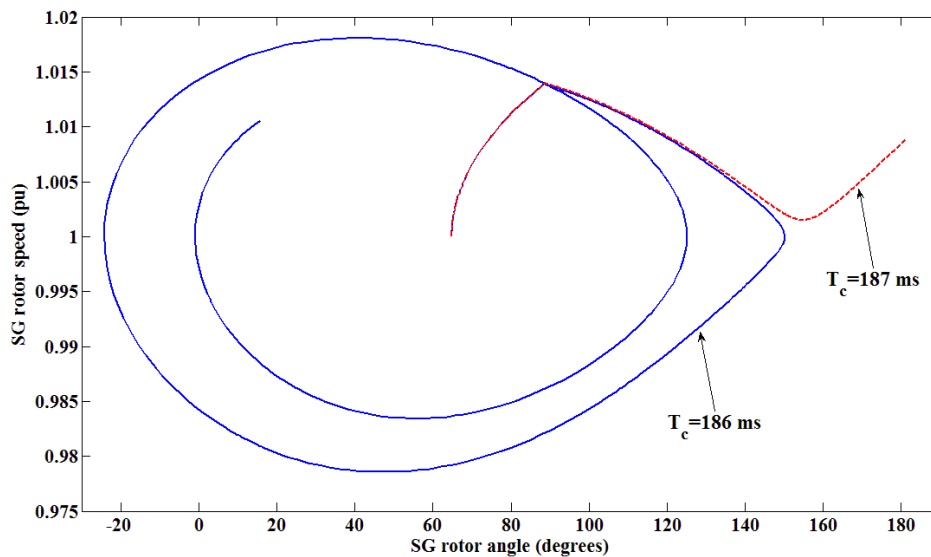
Η εύρεση του κρίσιμου χρόνου έγινε με ακρίβεια 1 ms και τα αποτελέσματα για κάθε περίπτωση παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.6. Όπως φαίνεται στον πίνακα αυτό η μεγαλύτερη τιμή του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης εμφανίζεται στην περίπτωση όπου η αρχική ενεργός ισχύς εξόδου του αιολικού πάρκου είναι 30MW. Αυτό οφείλεται όπως έχει ειπωθεί στην δυνατότητα παραγωγής αέργου ισχύος από το πάρκο, καθώς μειώνεται το απαιτούμενο ενεργό ρεύμα προκειμένου να εγχυθεί η επιθυμητή ενεργός ισχύς. Η παραγωγή αέργου ισχύος βελτιώνει τα επίπεδα της τάσης του δικτύου με αποτέλεσμα η ενεργός ισχύς της γεννήτριας του ζυγού 2 να είναι μεγαλύτερη. Έτσι, λόγω της εντονότερης επιβράδυνσης της μηχανής, η διάρκεια του σφάλματος μπορεί να είναι μεγαλύτερη χωρίς να παρατηρηθεί αποσυγχρονισμός της σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις.

Αντίθετα ο μικρότερος χρόνος εκκαθάρισης παρατηρείται στην περίπτωση όπου το αιολικό πάρκο δεν είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο, πράγμα που υποδηλώνει την θετική συμβολή του αιολικού πάρκου στην μεταβατική ευστάθεια, ανεξαρτήτως αρχικής παραγωγής ενεργού ισχύος.

Βέβαια σύμφωνα με το Σχ. 5.32 η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης στην περίπτωση αρχικής ενεργού ισχύος 90MW (καμπύλη C) εμφανίζει μεγαλύτερη βύθιση τάσης σε σχέση με την περίπτωση όπου το αιολικό πάρκο δεν είναι συνδεδεμένο, πράγμα που υποδηλώνει την αρνητική συμβολή του σε αυτή την περίπτωση. Αυτό όμως οφείλεται στο γεγονός ότι η διάρκεια του σφάλματος στην περίπτωση αυτή είναι τέτοια που δεν επενεργεί ο περιοριστής του ενεργού ρεύματος εξόδου και έτσι δεν υπάρχουν περιθώρια για παραγωγή αέργου ισχύος κατά την πρώτη βύθιση τάσης. Αντίθετα στον υπολογισμό του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης, τα σφάλματα είναι τέτοιας διάρκειας που προκαλούν σημαντικά μεγαλύτερη βύθιση τάσης. Έτσι, δρα ο περιοριστής του ενεργού ρεύματος εξόδου προκειμένου να παραχθεί άεργος ισχύς. Γι' αυτό ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης στην περίπτωση αρχικής ενεργού ισχύος 90MW είναι και αυτός μεγαλύτερος σε σχέση με την περίπτωση όπου το αιολικό πάρκο δεν είναι συνδεδεμένο.

Πίνακας 5.6: Κρίσιμοι χρόνοι εκκαθάρισης

Αρχική ενεργός ισχύς του Α/Π (MW)	Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης (ms)
30	186
80	170
90	169
χωρίς Α/Π	163

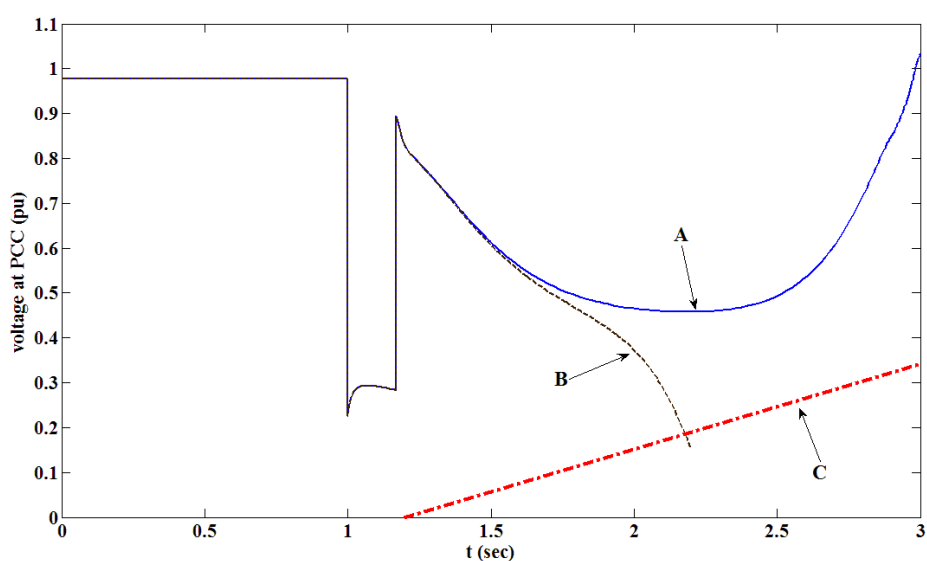


Σχήμα 5.36: Πορτραίτο καταστάσεως για την εύρεση του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης

Στο Σχ. 5.36 φαίνεται η απόκριση του συστήματος στο επίπεδο καταστάσεως δ, ω για διάφορους χρόνους εκκαθάρισης. Με σταδιακή αύξηση του T_c μπορεί να παρατηρηθεί πότε η σύγχρονη γεννήτρια αποσυγχρονίζεται, και έτσι να βρεθεί ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης. Το σχήμα αυτό ισχύει στην περίπτωση όπου η αρχική ενεργός ισχύς εξόδου του αιολικού πάρκου είναι 30 MW. Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, όταν η διάρκεια του σφάλματος είναι 186 ms τότε μετά την εκκαθάριση του διαγράφεται μια σπειροειδής τροχιά που δείχνει ότι το σύστημα είναι ευσταθές και τείνει να επιστρέψει στο αρχικό σημείο ισορροπίας. Αντίθετα όταν η διάρκεια του σφάλματος είναι 187 ms, η επιτάχυνση της σύγχρονης γεννήτριας κατά την διάρκεια του σφάλματος ήταν τέτοια που τελικά αυτή οδηγείται σε αποσυγχρονισμό, καθώς δεν προλαβαίνει να επιστρέψει στις ονομαστικές στροφές της πριν ξεπεράσει το ασταθές σημείο ισορροπίας. Έτσι παρατηρείται η ταυτόχρονη αύξηση της ταχύτητας περιστροφής και της γωνίας του δρομέα της μηχανής (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή του Σχ. 5.36).

Παρόμοιες χαρακτηριστικές ισχύουν και στις υπόλοιπες περιπτώσεις και δεν κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστούν αναλυτικά.

Για επιβεβαίωση της υπόθεσης πως κατά το χρονικό διάστημα που παρατηρείται διατήρηση ή απώλεια συγχρονισμού της σύγχρονης γεννήτριας, το αιολικό πάρκο παραμένει συνδεδεμένο στο δίκτυο, στο Σχ. 5.37 παρουσιάζονται οι αποκρίσεις της τάσης στο ΣΚΣ για την περίπτωση αρχικής ενεργού ισχύος του αιολικού πάρκου ίσης με 90MW. Όπως φαίνεται και στο σχήμα αυτό τη στιγμή που παρατηρείται διατήρηση ή απώλεια συγχρονισμού, η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης είναι πάνω από το όριο που ορίζει η καμπύλη C (η οποία είναι η χαρακτηριστική του Σχ. 5.35), πράγμα που υποδηλώνει ότι το αιολικό πάρκο έχει τη δυνατότητα αδιάλειπτης λειτουργίας στο εξεταζόμενο χρονικό διάστημα. Παρόμοια αποτελέσματα προκύπτουν και για τις υπόλοιπες περιπτώσεις, πράγμα που επιβεβαιώνει την υπόθεση που έγινε στην αρχή της ανάλυσης αυτής.



Σχήμα 5.37: Απόκριση της τάσης στο ΣΚΣ για αρχική ενεργό ισχύ του Α/Π 90MW
 Α: Απόκριση της τάσης για διάρκεια σφάλματος 169 ms
 Β: Απόκριση της τάσης για διάρκεια σφάλματος 170 ms
 C: Όριο του Σχ. 5.35 για δυνατότητα παροχής ισχύος υπό χαμηλή τάση

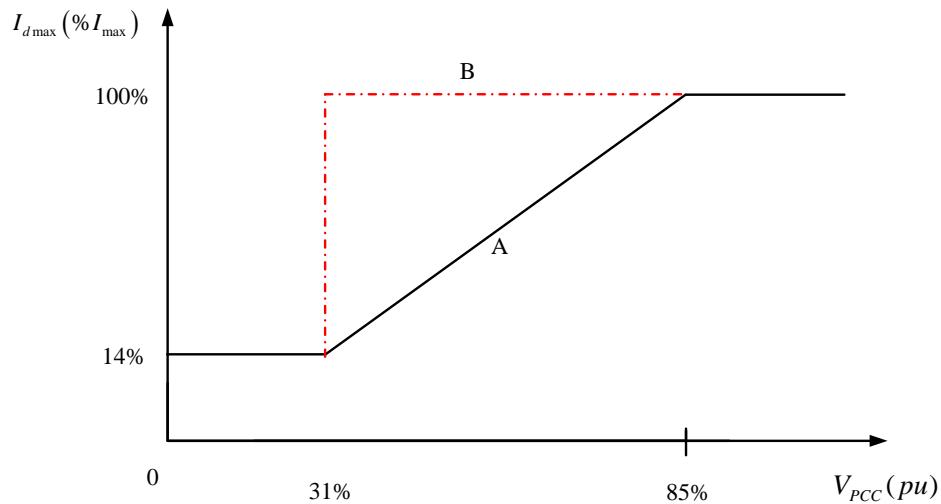
δ. Συμβολή στην μεταβατική ευστάθεια (επίδραση αέργου παραγωγής)

Στην προηγούμενη παράγραφο εξετάστηκε η συμβολή στην μεταβατική ευστάθεια όταν η χαρακτηριστική του περιοριστή του ενεργού ρεύματος εξόδου του μετατροπέα είναι αυτή που έχει οριστεί στο Σχ. 4.12. Στην συγκεκριμένη παράγραφο θα διερευνηθεί η επίδραση μιας διαφορετικής χαρακτηριστικής του περιοριστή ενεργού ρεύματος στη μεταβατική ευστάθεια. Αρχικά, η ανάλυση θα γίνει για τις περιπτώσεις όπου η αρχική ενεργός ισχύς εξόδου του αιολικού πάρκου είναι 30MW, 80MW και 90MW.

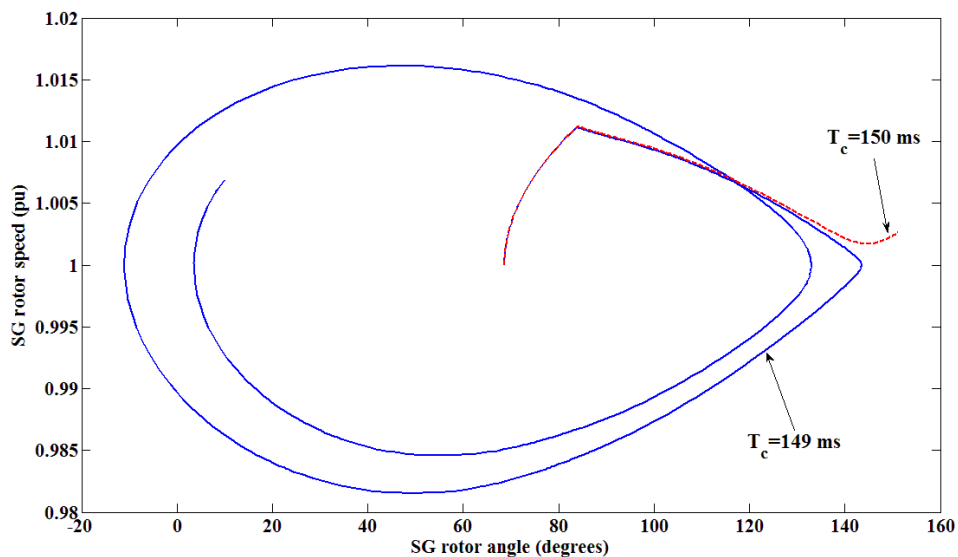
Στο Σχ. 5.38 φαίνεται η χαρακτηριστική του περιοριστή που θα εξεταστεί στην παρούσα παράγραφο (καμπύλη Β) και τα αποτελέσματα θα συγκριθούν με αυτά που προκύπτουν με την προηγούμενη χαρακτηριστική (καμπύλη Α).

Στην προηγούμενη παράγραφο ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης με την χαρακτηριστική Α του περιοριστή I_{dmax} και με αρχική ενεργό ισχύ εξόδου 90MW

προέκυψε ίσος με 169 ms. Στο Σχ. 5.39 φαίνεται ποιος είναι ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης όταν η αρχική ενεργός ισχύς του πάρκου είναι 90MW αλλά η χαρακτηριστική του περιοριστή είναι η καμπύλη B του Σχ. 5.38. Όπως φαίνεται στο Σχ. 5.39 το σύστημα παραμένει ευσταθές όταν η χρονική διάρκεια του σφάλματος είναι μέχρι 149 ms.



Σχήμα 5.38: A: προκαθορισμένη χαρακτηριστική περιοριστή I_{dmax}
B: εξεταζόμενη χαρακτηριστική περιοριστή I_{dmax}



Σχήμα 5.39: Εύρεση κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης για αρχική ενεργό ισχύ 90MW και με τη χαρακτηριστική B για τον περιοριστή I_{dmax}

Δηλαδή με την χρήση της χαρακτηριστικής B του Σχ. 5.38 παρατηρείται μια σημαντική μείωση του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης (μείωση κατά 20 ms) που οφείλεται στο γεγονός ότι τώρα ο περιοριστής δίνει προτεραιότητα στην ενεργό ισχύ του πάρκου και έτσι δεν υπάρχουν περιθώρια για παραγωγή αέργου ισχύος ούτε κατά την διάρκεια σοβαρών βυθίσεων τάσης.

Στον Πίνακα 5.7 παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα στους κρίσιμους εκκαθάρισης για τις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείται η χαρακτηριστική καμπύλη A του περιοριστή και η τροποποιημένη χαρακτηριστική (καμπύλη B) του Σχ. 5.38.

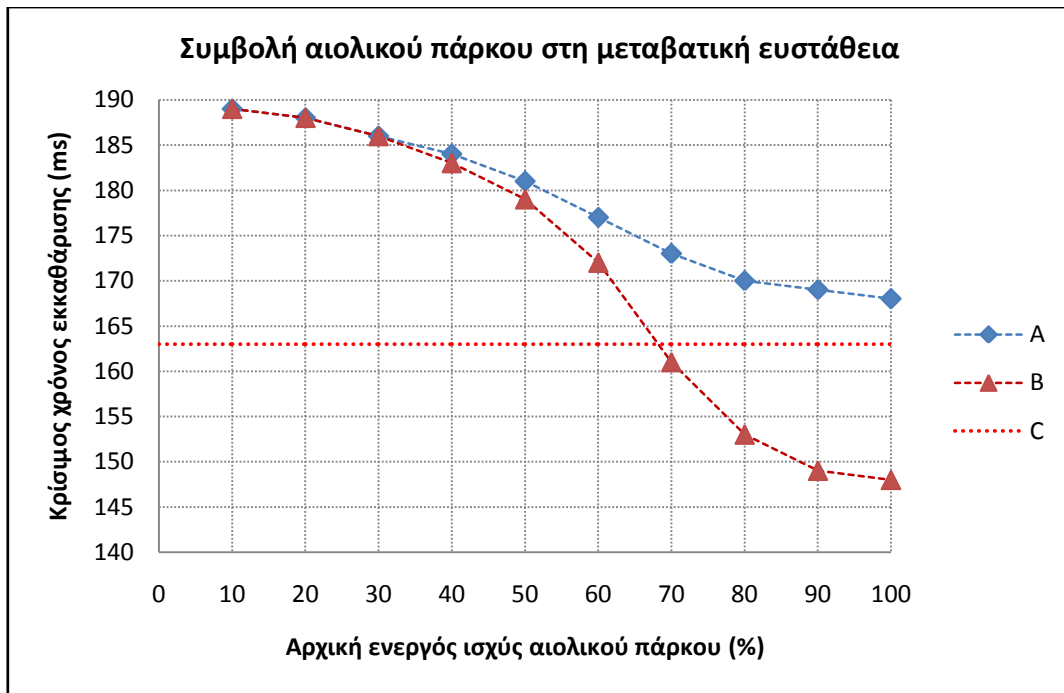
Πίνακας 5.7: Κρίσιμοι χρόνοι εκκαθάρισης

Αρχική ενεργός ισχύς του Α/Π (MW)	Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης (ms)	
	Προκαθορισμένη χαρακτηριστική (A)	Τροποποιημένη χαρακτηριστική (B)
	I_{dmax}	I_{dmax}
30	186	186
80	170	153
90	169	149

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.7 υπάρχει σημαντική διαφορά στους κρίσιμους χρόνους εκκαθάρισης, όταν η αρχική ενεργός ισχύς εξόδου του αιολικού πάρκου είναι υψηλή. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η δράση του περιοριστή με την προκαθορισμένη χαρακτηριστική A θα είναι εμφανής μόνο όταν η ενεργός ισχύς αναφοράς είναι τέτοια που το ενεργό ρεύμα θα προκύψει υψηλό για χαμηλά επίπεδα τάσης. Αντίθετα, όταν η ενεργός ισχύς αναφοράς είναι χαμηλή, έτσι και αλλιώς δεν χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί το μέγιστο ενεργό ρεύμα που ορίζει η προκαθορισμένη χαρακτηριστική A του περιοριστή για χαμηλότερα επίπεδα τάσης, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ουσιαστική διαφορά στην απόκριση της διάταξης μεταξύ των δύο περιπτώσεων του περιοριστή. Γι' αυτό στον Πίνακα 5.7 όταν η αρχική ενεργός ισχύς εξόδου του πάρκου είναι 30MW ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης προκύπτει ο ίδιος (186 ms).

Τέλος, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για περισσότερες τιμές της αρχικής ενεργού ισχύος εξόδου του αιολικού πάρκου, και υπολογίστηκαν οι κρίσιμοι χρόνοι εκκαθάρισης ανά περίπτωση, για τις δύο εξεταζόμενες χαρακτηριστικές του περιοριστή του ενεργού ρεύματος εξόδου του μετατροπέα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχ. 5.40.

Σύμφωνα με το Σχ. 5.40, η διαφορά στον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης μεταξύ των καμπυλών A, B αυξάνει όσο αυξάνει η αρχική ενεργός ισχύς εξόδου του αιολικού πάρκου. Μάλιστα στην καμπύλη B (δηλαδή όταν δίνεται προτεραιότητα στην ενεργό ισχύ), όταν η αρχική ενεργός ισχύς ξεπερνά περίπου το 0.7αμ ο κρίσιμος χρόνος προκύπτει μικρότερος από αυτόν που ισχύει για την περίπτωση όπου το αιολικό πάρκο δεν είναι συνδεδεμένο. Αυτό δείχνει πως για αυτές τις τιμές ενεργού ισχύος το αιολικό πάρκο συμβάλλει αρνητικά στην μεταβατική ευστάθεια του συστήματος. Αντίθετα, όταν ο περιοριστής I_{dmax} λειτουργεί σύμφωνα με την καμπύλη A του Σχ. 5.38, το αιολικό πάρκο συμβάλλει μόνο θετικά στην μεταβατική ευστάθεια του συστήματος, ανεξαρτήτως αρχικής ταχύτητας ανέμου. Τέλος για μικρές τιμές της αρχικής ταχύτητας ανέμου δεν υπάρχει ουσιαστική διαφορά στους υπολογιζόμενους κρίσιμους χρόνους μεταξύ των καμπυλών A και B του Σχ. 5.40, οι οποίοι προκύπτουν σημαντικά μεγαλύτεροι από τη περίπτωση όπου το αιολικό πάρκο δεν είναι συνδεδεμένο.



Σχήμα 5.40: Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης συναρτήσει της αρχικής ενεργού ισχύος του αιολικού πάρκου

A: δράση του περιοριστή I_{dmax} σύμφωνα με τη καμπύλη A του Σχ. 5.38

B: δράση του περιοριστή I_{dmax} σύμφωνα με τη καμπύλη B του Σχ. 5.38

C: κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης όταν το A/Π δεν είναι συνδεδεμένο

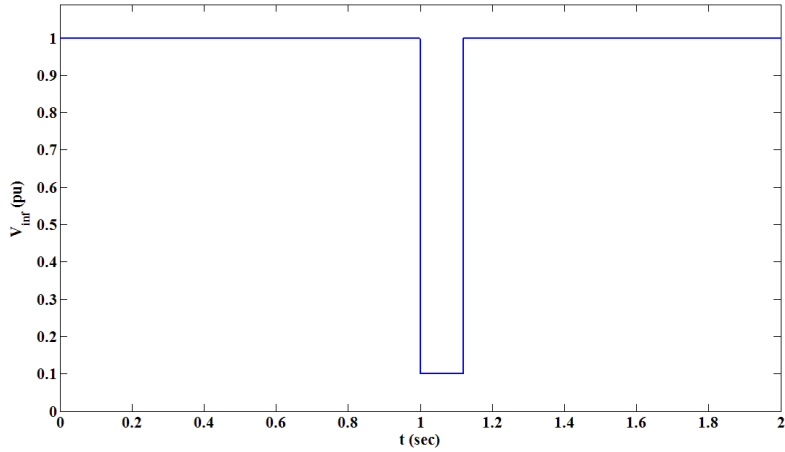
Συμπερασματικά λοιπόν, η ικανοποίηση από το εξεταζόμενο αιολικό πάρκο των απαιτήσεων των σύγχρονων κωδίκων για τη παραγωγή αέργου ισχύος κατά τη διάρκεια βυθίσεων της τάσης του δικτύου εξασφαλίζει τη θετική συμβολή του στη μεταβατική ευστάθεια του συστήματος. Επίσης, η μεγαλύτερη συμβολή του παρατηρείται σε μικρές ταχύτητες ανέμου.

5.2.4 Απόκριση μοντέλου σε βύθιση τάσης του άπειρου ζυγού

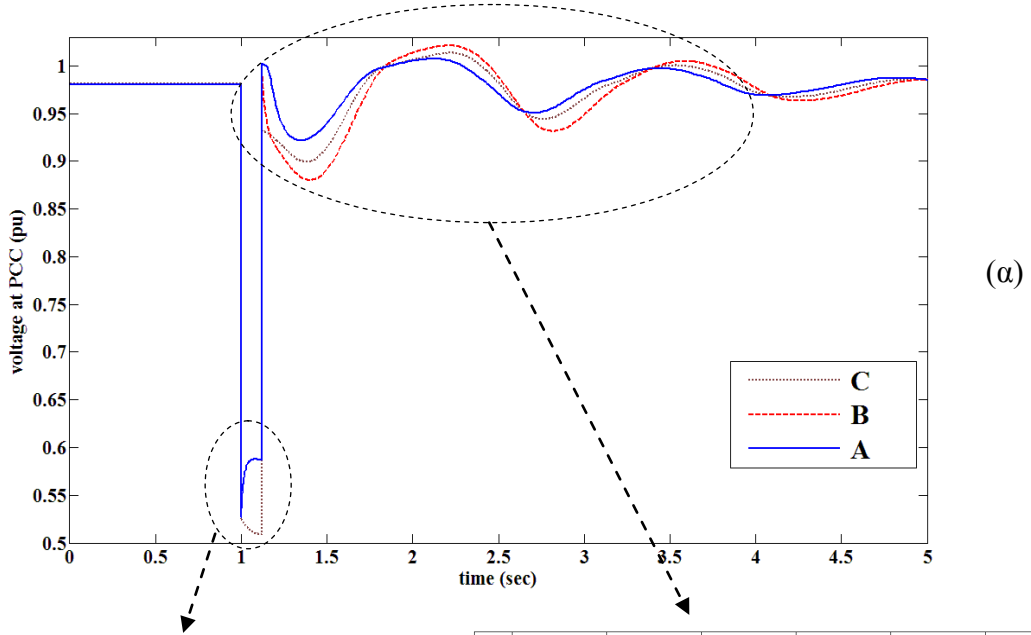
α. Αποτελέσματα προσομοιώσεων για αρχική τιμή ενεργού ισχύος 70MW

Σε αυτή την παράγραφο θα εξεταστεί η απόκριση του μοντέλου για βύθιση της τάσης του άπειρου ζυγού του Σχ. 5.16. Συγκεκριμένα θεωρούμε ότι εμφανίζεται βύθιση τάσης 90%, διάρκειας 120 ms, όπως φαίνεται και στο Σχ. 5.41. Η αρχική ενεργός ισχύς εξόδου του A/Π είναι 70MW (70% της ονομαστικής ενεργού ισχύος) και θεωρούμε ότι υπάρχει σταθεροποιητής στην σύγχρονη γεννήτρια του ζυγού 2 του εξεταζόμενου συστήματος.

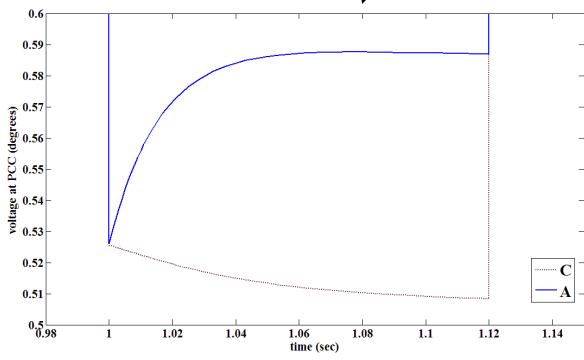
Στο Σχ. 5.42 φαίνεται η απόκριση της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης για τις τρεις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Καταρχάς και εδώ επιβεβαιώνεται η αρνητική επίδραση της έγχυσης καθαρά ενεργού ισχύος από το A/Π μετά το σφάλμα. Αντίθετα, με λειτουργία ελέγχου της τάσης στο ΣΚΣ η τάση είναι εμφανώς βελτιωμένη και από την περίπτωση όπου το A/Π δεν είναι συνδεδεμένο.



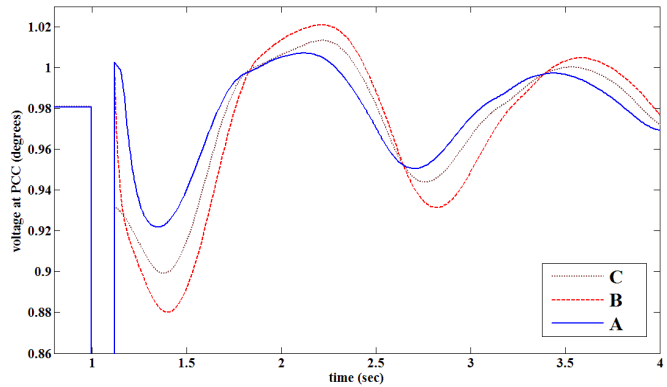
Σχήμα 5.41 : Βύθιση τάσης του άπειρου ζυγού του Σχ. 5.16



(α)



(γ)



(β)

Σχήμα 5.42 : (α) Τάση στο ΣΚΣ για βύθιση της τάσης του άπειρου ζυγού, διάρκειας 120msec.

A : Αιολικό πάρκο με έλεγχο της τάσης στο ΣΚΣ

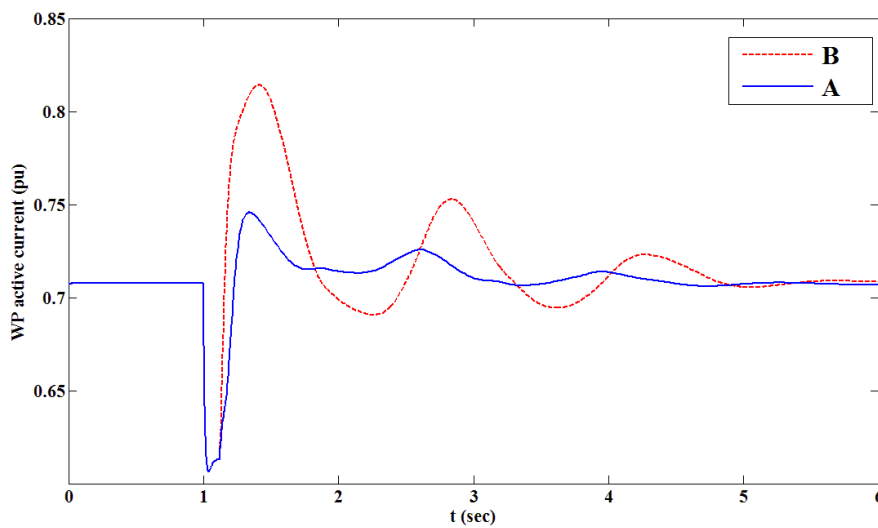
B : Αιολικό πάρκο με λειτουργία μοναδιαίου Σ.Ι. στην έξοδο του

C : Απόκριση της τάσης χωρίς το αιολικό πάρκο

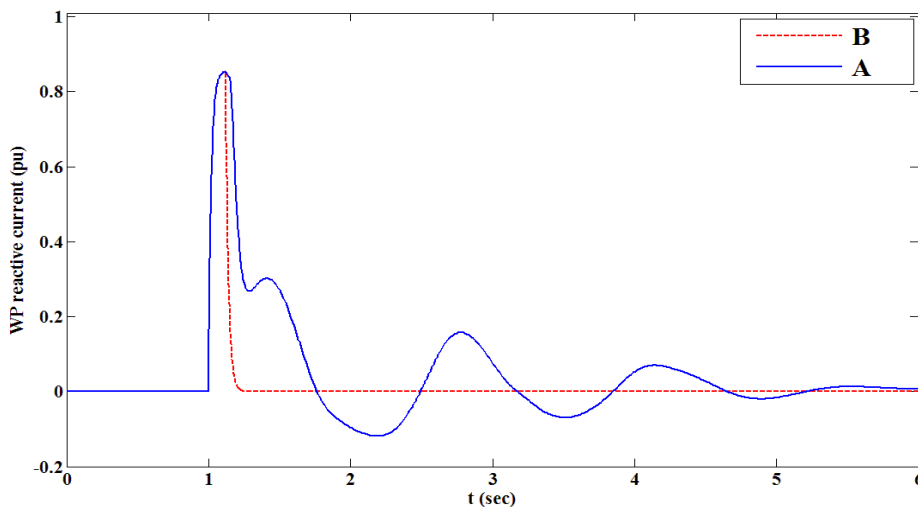
(β) Μεγέθυνση του Σχ. 5.42.α μετά το σφάλμα

(γ) Μεγέθυνση του Σχ. 5.42.α κατά την διάρκεια του σφάλματος

Σε αυτό το είδος διαταραχής είναι εμφανέστερη και η συνεισφορά του αιολικού πάρκου στην τάση του δικτύου κατά την διάρκεια της εξεταζόμενης βύθισης. Στο Σχ. 5.42.γ φαίνεται η απόκριση της τάσης στην περίπτωση όπου το A/Π είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο (καμπύλη A) και στην περίπτωση όπου δεν είναι συνδεδεμένο (καμπύλη C). Επειδή η τάση στο ΣΚΣ κατά την διάρκεια τη διαταραχής είναι κάτω του 85% η λειτουργία του A/Π δεν εξαρτάται από το αν λειτουργεί με έλεγχο τάσης ή με μοναδιαίο Σ.Ι. Έτσι, όπως έχει ειπωθεί, δρα ο περιοριστής του ενεργού ρεύματος του μετατροπέα (καμπύλη A του Σχ. 5.38), με αποτέλεσμα αυτό να αρχίσει να μειώνεται (με την καθυστέρηση που εισάγουν οι βρόχοι ελέγχου του μετατροπέα), όπως φαίνεται και στο Σχ. 5.43. Έτσι, με την παράλληλη δράση του περιοριστή του αέργου ρεύματος, δίνεται το αντίστοιχο περιθώριο για έγχυση του ρεύματος αυτού. Έτσι λοιπόν, η αύξηση αυτή που φαίνεται και στο Σχ. 5.44, έχει ως αποτέλεσμα την αισθητή ανύψωση της τάσης στο ΣΚΣ (καμπύλη A, Σχ. 5.42.γ) σε σχέση με την περίπτωση όπου το A/Π δεν ήταν συνδεδεμένο (καμπύλη C, Σχ. 5.42.γ).



Σχήμα 5.43 : Ενεργός συνιστώσα ρεύματος εξόδου A/Π
 A : Αιολικό πάρκο με έλεγχο της τάσης στο ΣΚΣ
 B : Αιολικό πάρκο με λειτουργία μοναδιαίου Σ.Ι. στην έξοδό του

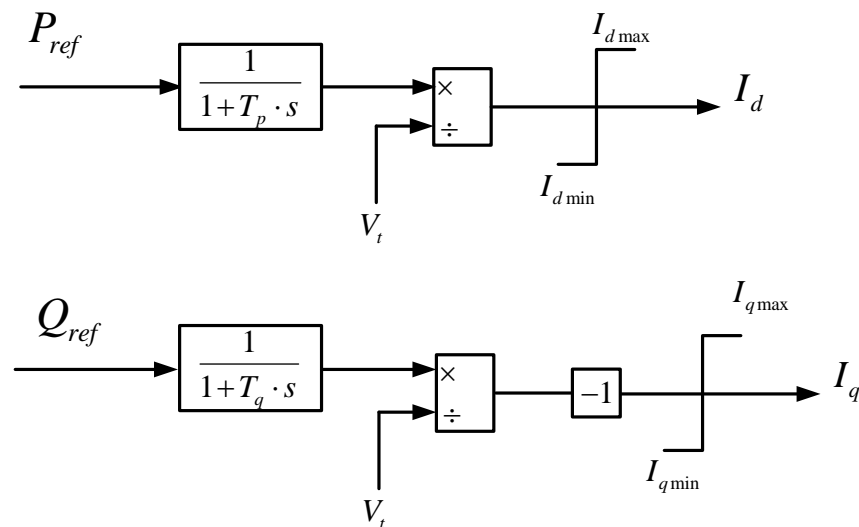


Σχήμα 5.44 : Άεργος συνιστώσα ρεύματος εξόδου A/Π
 A : Αιολικό πάρκο με έλεγχο της τάσης στο ΣΚΣ
 B : Αιολικό πάρκο με λειτουργία μοναδιαίου Σ.Ι. στην έξοδό

β. Επίδραση τεχνικής ελέγχου μετατροπέα πλευράς δικτύου στην απόκριση του δικτύου

Σε όλες τις προηγούμενες προσομοιώσεις η παράσταση του μετατροπέα πλευράς δικτύου (Μ.Π.Δ.) έγινε με τα διαγράμματα βαθμίδων των Σχ. 4.9 και 4.11 που παρουσιάστηκαν στο Κεφ. 4. Σύμφωνα με την μοντελοποίηση αυτή, ο μετατροπέας εμφανίζει καθυστέρηση στην διαμόρφωση του ρεύματος εξόδου του στην επιθυμητή τιμή ακόμα και σε μεταβολές της τάσης του δικτύου. Αυτό όπως έχει αναφερθεί και στην παράγραφο 4.5 αντιστοιχεί στην τεχνική ελέγχου που χρησιμοποιεί τους βραδύτερους βρόχους ελέγχου της ενεργού και άεργου ισχύος του Σχ. 3.13 για την διαμόρφωση των ρευμάτων αναφοράς.

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστεί μια εναλλακτική παράσταση του μετατροπέα πλευράς δικτύου, σύμφωνα με την οποία όταν η τερματική τάση μεταβληθεί, τα ρεύματα αναφοράς διαμορφώνονται αμέσως σε εκείνες τις τιμές που θα προκαλέσουν την επιθυμητή έγχυση ενεργού και άεργου ισχύος. Η μοντελοποίηση αυτή αντιστοιχεί στις τεχνικές ελέγχου των παραγράφων 3.2, 3.3 του Κεφ. 3 στις οποίες ο υπολογισμός των ρευμάτων αναφοράς γίνεται αλγεβρικά γνωρίζοντας τις ισχείς αναφοράς και την τερματική τάση. Το διάγραμμα βαθμίδων της εναλλακτικής αυτής παράστασης του μετατροπέα παρουσιάζεται και στην αναφορά [5] και φαίνεται στο Σχ. 5.45.



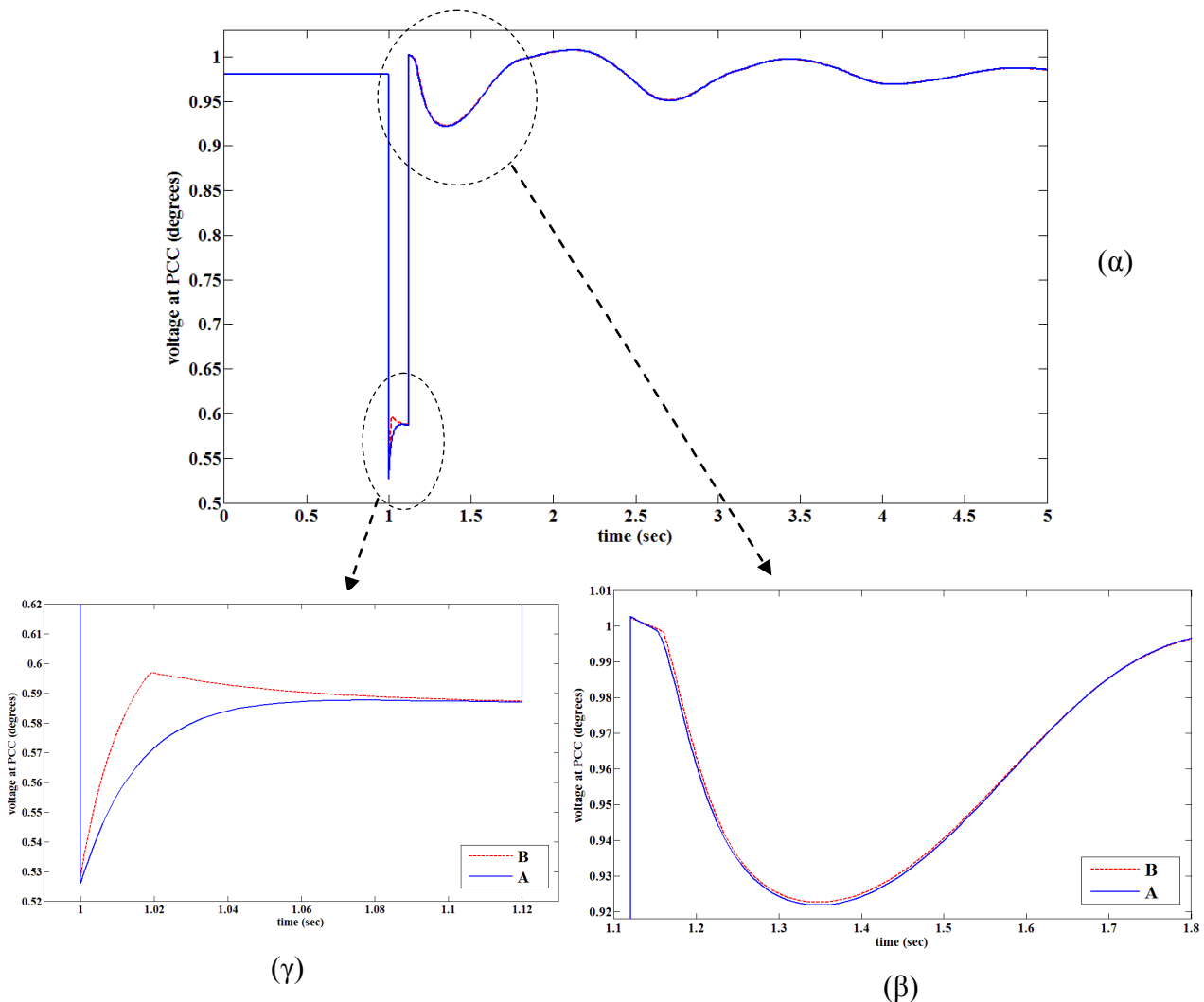
Σχήμα 5.45: Εναλλακτική παράσταση μετατροπέα πλευράς δικτύου [5]

Όπως φαίνεται στο Σχ. 5.45 η μόνη διαφορά με το διάγραμμα βαθμίδων των Σχ. 4.9, 4.11 είναι στην τοποθέτηση της βαθμίδας καθυστέρησης πρώτης τάξης, όπου εδώ τοποθετείται σε επίπεδο ισχύος. Στην ανάλυση που θα ακολουθήσει για τις χρονικές σταθερές T_p, T_q και εδώ θεωρείται ότι:

$$T_p = T_q = 20 \text{ ms}$$

Παρακάτω συγκρίνεται η απόκριση του δικτύου και του μοντέλου για τις δύο εναλλακτικές παραστάσεις του Μ.Π.Δ. Θεωρείται και εδώ βύθιση τάσης του άπειρου ζυγού κατά 90%, διάρκειας 120msec, η οποία συμβαίνει τη χρονική στιγμή $t=1$ s.

Επίσης θεωρούμε ότι το αιολικό πάρκο λειτουργεί με έλεγχο της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης. Η αρχική ενεργός ισχύς εξόδου του είναι 70MW και η αρχική άεργος μηδενική.



Σχήμα 5.46 : (α) Τάση στο ΣΚΣ για βύθιση της τάσης του άπειρου ζυγού, διάρκειας 120 ms.

A : Απόκριση με μοντελοποίηση Μ.Π.Δ. βάσει των Σχ. 4.9, 4.11

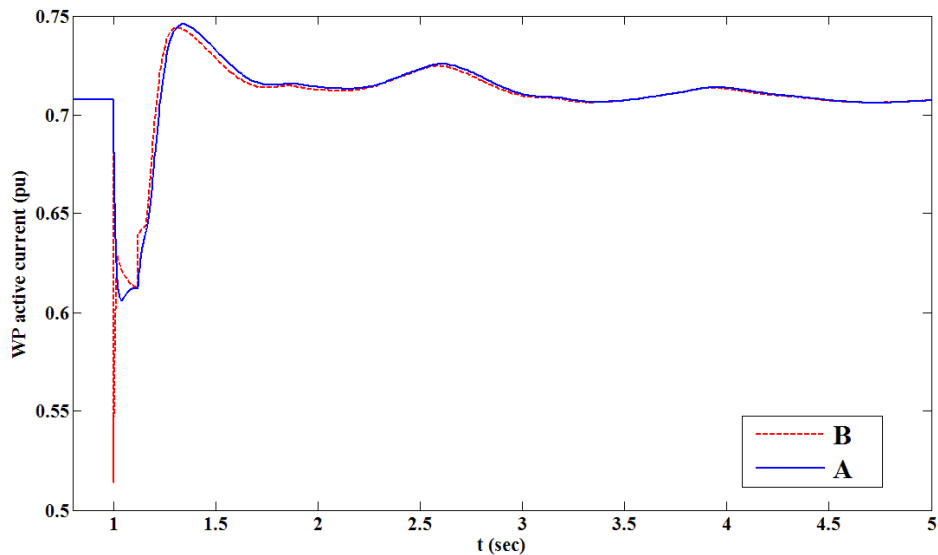
B : Απόκριση με μοντελοποίηση Μ.Π.Δ. βάσει του Σχ. 5.45

(β) Μεγέθυνση του Σχ. 5.46.α μετά το σφάλμα

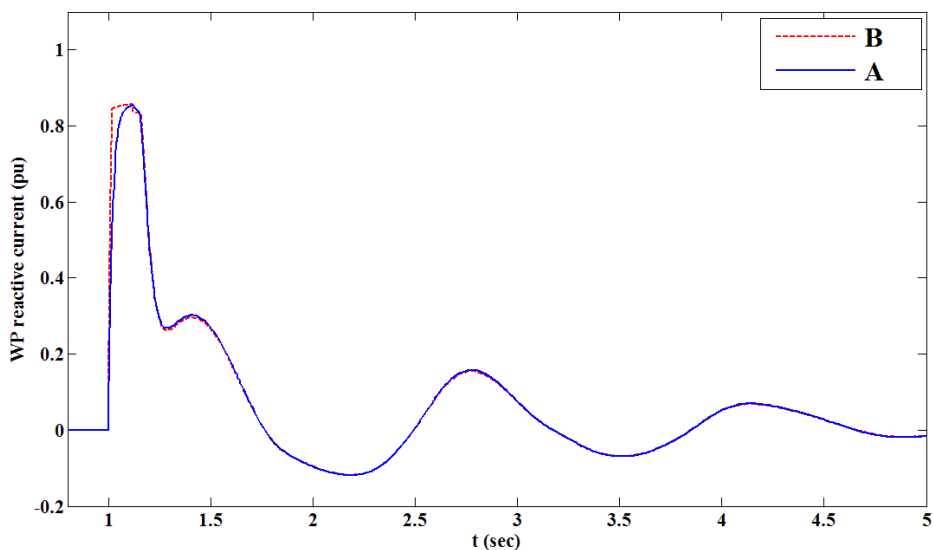
(γ) Μεγέθυνση του Σχ. 5.46.α κατά την διάρκεια του σφάλματος

Στο Σχ. 5.46 φαίνεται η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης για τις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις. Σύμφωνα με το σχήμα αυτό διαφορά στην απόκριση του δικτύου εμφανίζεται σε απότομες μεταβολές της τάσης του. Συγκεκριμένα, στο Σχ. 5.46.β η απόκριση της τάσης είναι σχεδόν η ίδια και αυτό γιατί ο ρυθμός μεταβολής της τάσης είναι τέτοιος ώστε ο Μ.Π.Δ. δεν εμφανίζει καθυστέρηση στην διαμόρφωση του ρεύματος εξόδου του, ακόμα και όταν μοντελοποιείται όπως έχει παρουσιαστεί στο Κεφ. 4. Αυτό φαίνεται και στα Σχ. 5.47 και 5.48 όπου οι αποκρίσεις του ενεργού και άεργου ρεύματος μετά το σφάλμα είναι σχεδόν οι ίδιες και για τις δύο περιπτώσεις.

Αντίθετα, κατά την διάρκεια του σφάλματος υπάρχει εμφανέστερη διαφορά στις εξεταζόμενες αποκρίσεις. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στις καμπύλες B των Σχ. 5.47 και 5.48 το ενεργό και άεργο ρεύμα εξόδου διαμορφώνονται ταχύτερα με την μεταβολή της τερματικής τάσης, όταν δηλαδή η παράσταση του Μ.Π.Δ. γίνεται βάσει του Σχ. 5.45. Έτσι, το άεργο ρεύμα εξόδου διαμορφώνεται ταχύτερα στην τιμή που δίνει ο περιοριστής I_{qmin} με αποτέλεσμα να εμφανίζεται ταχύτερη ανύψωση της τάσης του δικτύου, όπως φαίνεται και στην καμπύλη B του Σχ. 5.46.γ.



Σχήμα 5.47: Ενεργός συνιστώσα ρεύματος εξόδου του αιολικού πάρκου
 Α : Απόκριση με μοντελοποίηση Μ.Π.Δ. βάσει των Σχ. 4.9, 4.11
 Β : Απόκριση με μοντελοποίηση Μ.Π.Δ. βάσει του Σχ. 5.45



Σχήμα 5.48: Άεργος συνιστώσα ρεύματος εξόδου του αιολικού πάρκου
 Α : Απόκριση με μοντελοποίηση Μ.Π.Δ. βάσει των Σχ. 4.9, 4.11
 Β : Απόκριση με μοντελοποίηση Μ.Π.Δ. βάσει του Σχ. 5.45

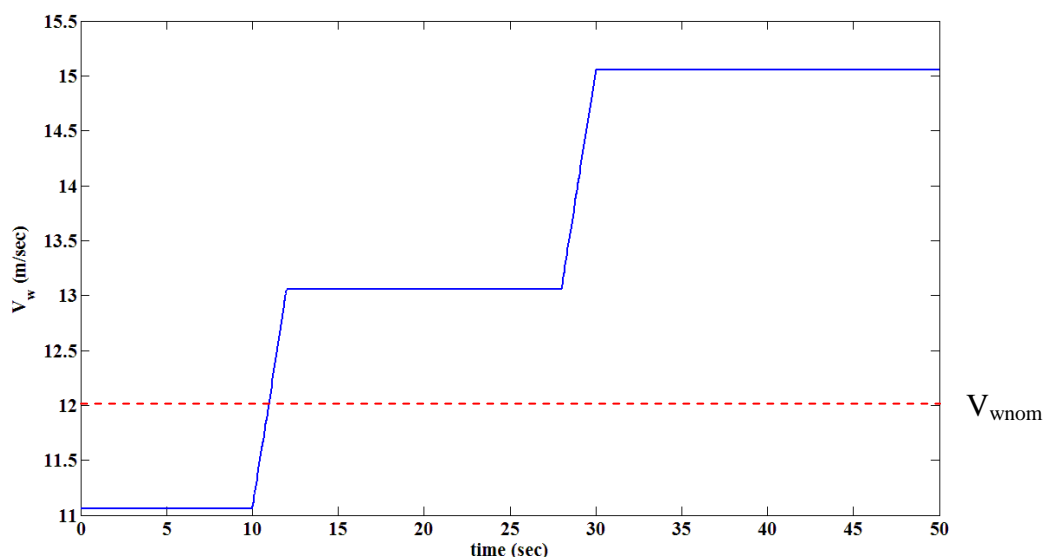
Συμπερασματικά λοιπόν, όταν η μοντελοποίηση του μετατροπέα πλευράς δικτύου γίνεται για μελέτες ευστάθειας, δεν παίζει ιδιαίτερο ρόλο το αν η παράσταση του μετατροπέα αυτού γίνει βάσει των Σχ. 4.9 και 4.11 του Κεφ. 4 ή βάσει του Σχ. 5.45.

5.2.5 Απόκριση μοντέλου σε μεταβολές της ταχύτητας ανέμου

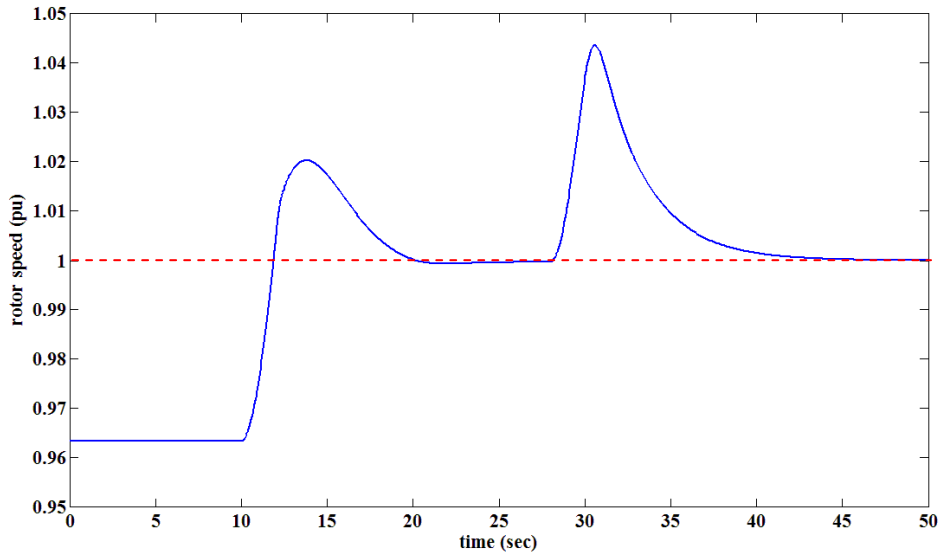
α. Διαδοχικές αυξήσεις της ταχύτητας ανέμου

Στην συγκεκριμένη παράγραφο εξετάζεται η απόκριση του μοντέλου για δύο διαδοχικές αυξήσεις της ταχύτητας ανέμου όπως φαίνονται στο Σχ. 5.49. Η αρχική ταχύτητα ανέμου αντιστοιχεί σε αρχική ενεργό ισχύ εξόδου ίση με 80MW (80% της ονομαστικής ενεργού ισχύος του αιολικού πάρκου). Η ταχύτητα ανέμου αυξάνει δύο φορές κατά 2 m/s.

Στο Σχ. 5.50 φαίνεται η απόκριση της ταχύτητας περιστροφής της Α/Γ. Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, η αύξηση της ταχύτητας ανέμου προκαλεί την επιτάχυνση της μηχανής, οι στροφές της οποίας υπερβαίνουν γρήγορα τις μέγιστες καθώς πριν την μεταβολή ήδη βρίσκονταν κοντά σε αυτές. Στην συνέχεια η μηχανή επιβραδύνεται λόγω της δράσης του ρυθμιστή της γωνίας βήματος των πτερυγίων ο οποίος επαναφέρει τις στροφές στην μέγιστη επιτρεπτή τιμή (περίπου μετά από 8s από την στιγμή της υπέρβασής τους). Με την δεύτερη όμως αύξηση ανέμου η μηχανή επιταχύνεται ξανά και αυτή τη φορά η ταχύτητα περιστροφής της εξαρτάται αποκλειστικά από την ταχύτητα απόκρισης του ρυθμιστή της γωνίας των πτερυγίων γιατί η ανεμογεννήτρια την στιγμή της δεύτερης αύξησης βρισκόταν ήδη στις μέγιστες στροφές με αποτέλεσμα, λόγω της χαρακτηριστικής ελέγχου των στροφών (Σχ. 4.6), η ηλεκτρική ισχύς να μην μπορεί να αυξηθεί κατά την διάρκεια της νέας επιτάχυνσης της ανεμογεννήτριας.

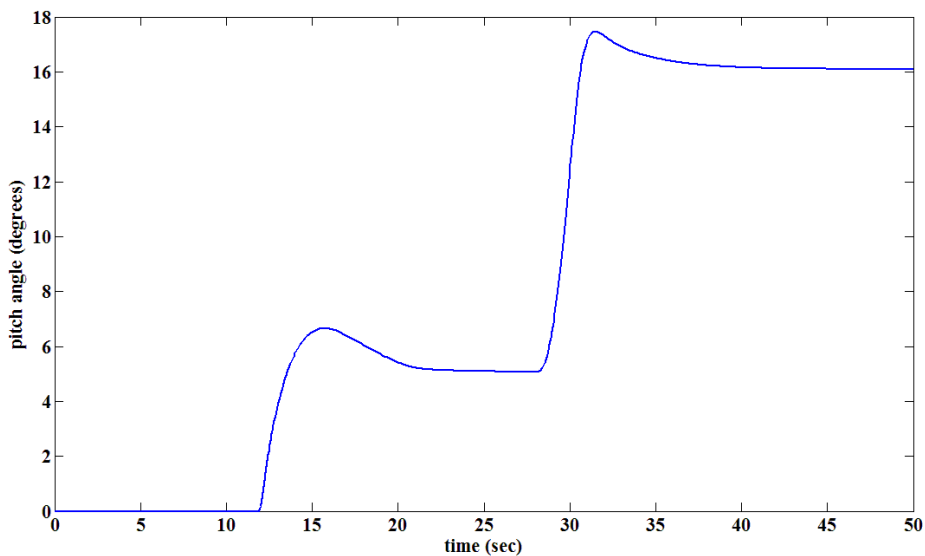


Σχήμα 5.49 : Διαδοχικές αυξήσεις της ταχύτητας ανέμου



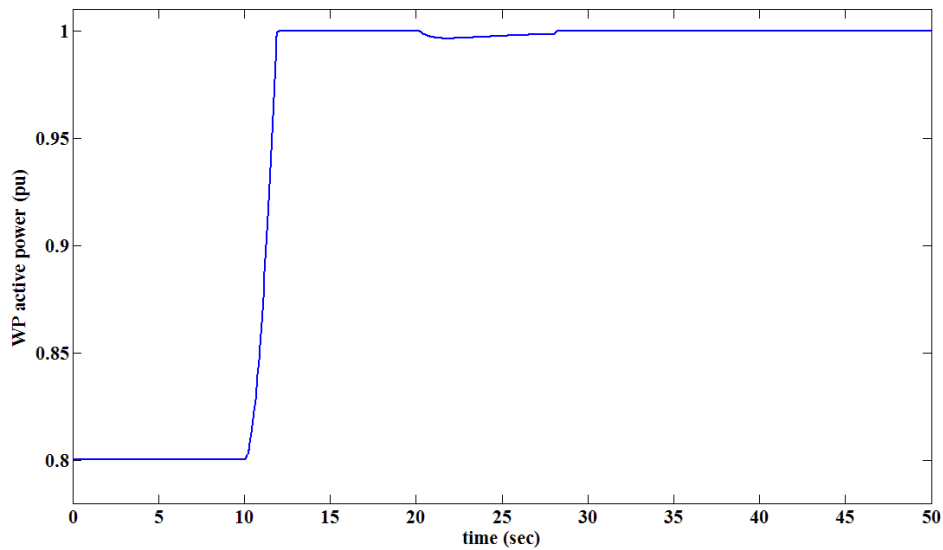
Σχήμα 5.50 : Ταχύτητα περιστροφής της Α/Γ

Στο Σχ. 5.51 φαίνεται η απόκριση της γωνίας βήματος των πτερυγίων που ρυθμίζεται από τον αντίστοιχο ρυθμιστή. Φαίνονται χαρακτηριστικά οι δύο τιμές στις οποίες τείνει να ισορροπήσει η γωνία βήματος ώστε η εισερχόμενη αεροδυναμική ισχύς να γίνει ίση με την ηλεκτρική ισχύ της γεννήτριας (5 μοίρες στην πρώτη αύξηση και 16 μοίρες στην δεύτερη αύξηση της ταχύτητας ανέμου).

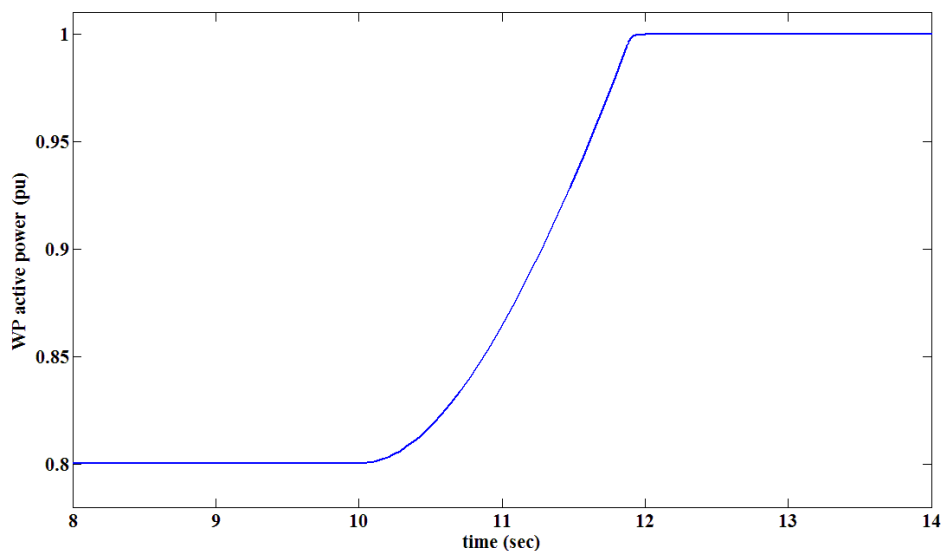


Σχήμα 5.51 : Γωνία βήματος των πτερυγίων

Τέλος, στα Σχ. 5.52, 5.53 φαίνεται η ενεργός ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας, η οποία εξαρτάται έντονα από τις στροφές της Α/Γ, καθώς υλοποιείται η στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος. Στο Σχ. 5.53 ενδεικτικά φαίνεται σε λεπτομέρεια ο τρόπος με τον οποίο η ενεργός ισχύς αυξάνει σύμφωνα με την προαναφερθείσα στρατηγική. Πέραν αυτού του χρονικού διαστήματος ακόμα και όταν οι στροφές της Α/Γ είναι μεγαλύτερες από τις μέγιστες η ηλεκτρική ισχύς παραμένει στην μέγιστη επιτρεπτή τιμή λόγω της χαρακτηριστικής του Σχ. 4.6.



Σχήμα 5.52 : Ενεργός ισχύς εξόδου του Α/Π

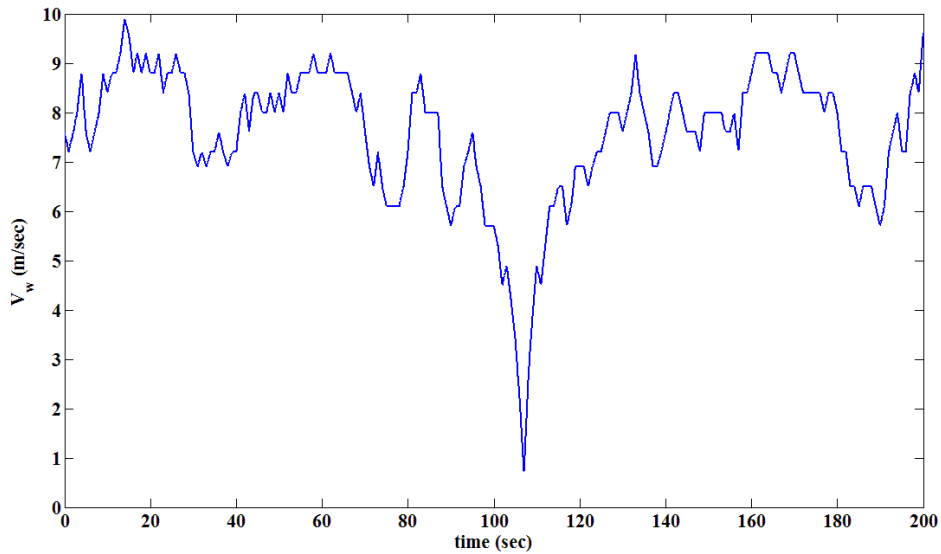


Σχήμα 5.53 : Ενεργός ισχύς εξόδου του Α/Π τη στιγμή της πρώτης αύξησης της ταχύτητας ανέμου (λεπτομέρεια του Σχ. 5.52)

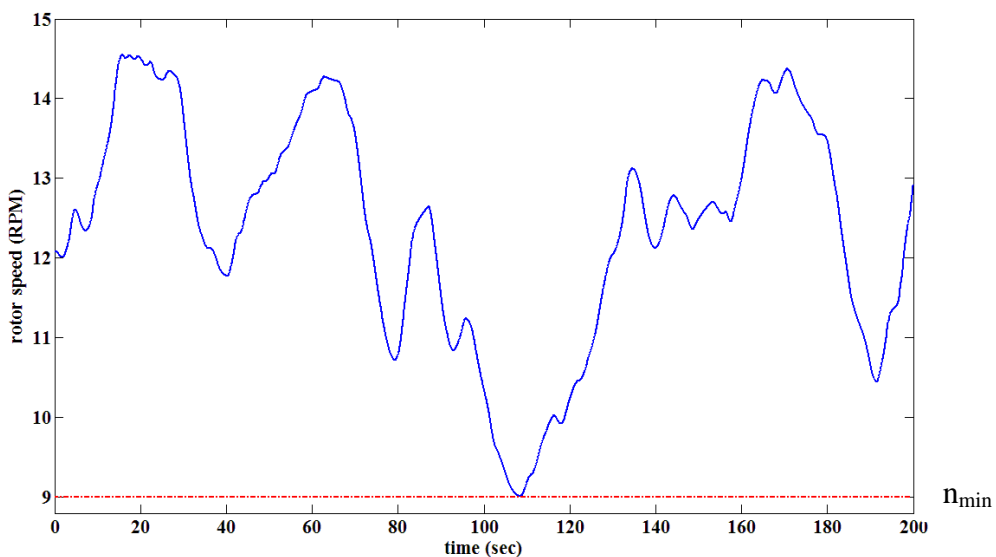
β. Απόκριση μοντέλου σε χρονοσειρά ανέμου

Στην συγκεκριμένη παράγραφο θεωρούμε ότι η ισοδύναμη ανεμογεννήτρια δέχεται ως είσοδο μια χρονοσειρά ταχυτήτων ανέμου. Οι χρονοσειρές ταχυτήτων ανέμου έχουν συχνότητα δειγματοληψίας 1 Hz και η μετατροπή του διακριτού σήματος σε συνεχές για τις ανάγκες της προσομοίωσης γίνεται με γραμμική παρεμβολή. Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστεί η απόκριση του μοντέλου για δύο διαφορετικές χρονοσειρές ανέμου.

Η πρώτη χρονοσειρά που εξετάζεται φαίνεται στο Σχ. 5.54, η χρονική διάρκεια της οποίας είναι 200s.



Σχήμα 5.54: Χρονοσειρά ανέμου



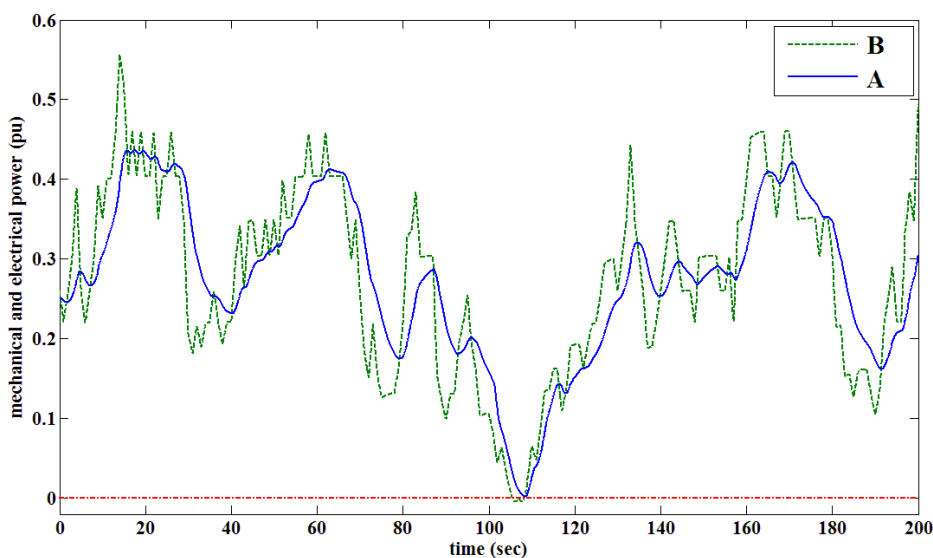
Σχήμα 5.55: Ταχύτητα περιστροφής της Α/Γ

Στο Σχ. 5.55 παρατίθεται η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της ισοδύναμης ανεμογεννήτριας. Όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο σχήμα αυτό η ταχύτητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας εξομαλύνεται λόγω της αδράνειας της μηχανής. Έτσι, μεταβολές στην αναπτυσσόμενη αεροδυναμική ροπή θα προκαλέσουν αντίστοιχες μεταβολές στον ρυθμό μεταβολής της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής της Α/Γ και όχι απευθείας στην ίδια την ταχύτητα περιστροφής. Συνεπώς το μηχανικό μέρος της εξεταζόμενης διάταξης συμπεριφέρεται ως βαθυπερατό φίλτρο.

Στο Σχ. 5.56 παρατίθενται οι αποκρίσεις της αεροδυναμικής ισχύος και της εγχεόμενης ενεργού ισχύος στο δίκτυο. Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό η ενεργός ισχύς που εγχέεται στο δίκτυο από το αιολικό πάρκο εμφανίζει παρόμοια εξομάλυνση με αυτή της ταχύτητας περιστροφής της ανεμογεννήτριας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ενεργός ισχύς αναφοράς δίνεται ως συνάρτηση των στροφών της Α/Γ,

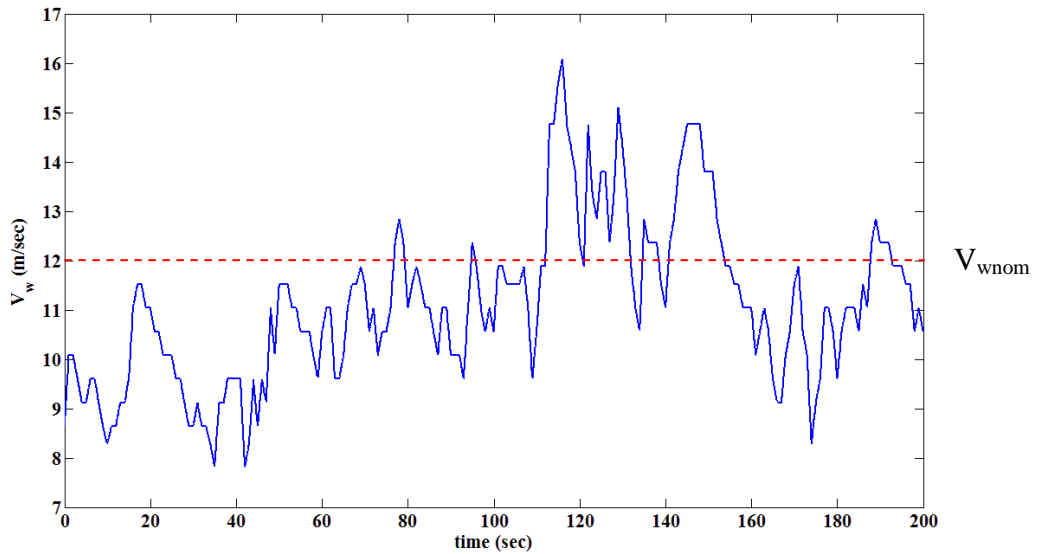
λόγω της στρατηγικής μέγιστης απολαβής ισχύος. Έτσι ό,τι μεταβολές εμφανίζονται στις στροφές της ανεμογεννήτριας, παρόμοιες μεταβολές θα εμφανίζονται και στην ενεργό ισχύ εξόδου του αιολικού πάρκου.

Τέλος αξίζει να παρατηρηθεί η απόκριση της διάταξης κατά την διάρκεια της μεγάλης μείωσης της ταχύτητας ανέμου η οποία συμβαίνει περίπου στο χρονικό διάστημα από 100 s έως 120 s. Κατά το χρονικό αυτό διάστημα η αεροδυναμική ισχύς μειώνεται δραστικά όπως φαίνεται και στην καμπύλη B του Σχ. 5.56. Έτσι η μηχανή αρχίζει να επιβραδύνεται με αποτέλεσμα και η ενεργός ισχύ εξόδου του αιολικού πάρκου να μειώνεται. Η διάρκεια της επιβράδυνσης ήταν τέτοια που οι στροφές της ανεμογεννήτριας έφτασαν οριακά την ελάχιστη τιμή των 9 ΣΑΛ, τιμή που αποτελεί και το όριο για να παραμείνει συνδεδεμένη η ανεμογεννήτρια, καθώς για αυτή τη τιμή μηδενίζεται η ενεργός ισχύς αναφοράς (Σχ. 4.6). Στην συγκεκριμένη όμως περίπτωση οι στροφές της Α/Γ έφτασαν πολύ κοντά στο όριο χωρίς όμως να το υπερβούν, με αποτέλεσμα εκείνη τη στιγμή να εγχέεται στο δίκτυο μια πολύ μικρή τιμή ενεργού ισχύος. Το γεγονός ότι οι στροφές της ανεμογεννήτριας διατηρήθηκαν οριακά πάνω από το ελάχιστο όριο οφείλεται και στην γραμμική χαρακτηριστική που χρησιμοποιείται στον έλεγχο των στροφών της ανεμογεννήτριας, για ταχύτητες περιστροφής της κοντά στην ελάχιστη τιμή. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στο Σχ. 4.6, όταν οι στροφές της Α/Γ είναι μικρότερες από 10 ΣΑΛ χρησιμοποιείται η διακεκομμένη γραμμή στην χαρακτηριστική έλεγχο, πράγμα που υποδηλώνει την αναλογική μείωση της ηλεκτρικής ισχύος της ανεμογεννήτριας με τη μείωση των στροφών της. Η μείωση της ηλεκτρικής ισχύος μειώνει αντίστοιχα και την επιβράδυνση της μηχανής, με αποτέλεσμα να αποφευχθεί η εντονότερη επιβράδυνση που θα εμφανιζόταν στην περίπτωση όπου χρησιμοποιούνταν η συνεχής γραμμή του Σχ. 4.6.

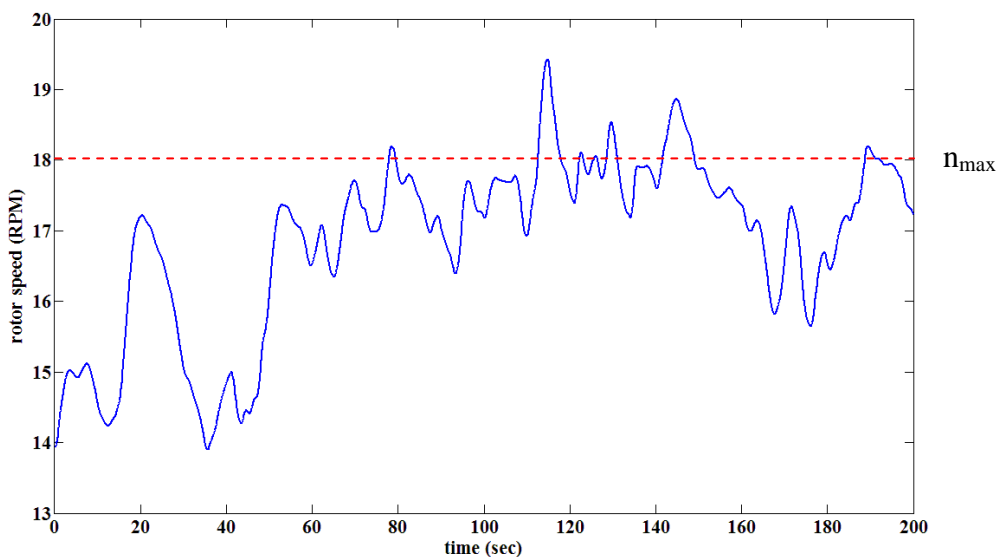


Σχήμα 5.56: A: Ηλεκτρική ισχύς της ισοδύναμης ανεμογεννήτριας
B: Αεροδυναμική ισχύς της ισοδύναμης ανεμογεννήτριας

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η απόκριση της εξεταζόμενης διάταξης όταν αυτή δέχεται σαν είσοδο την χρονοσειρά ανέμου του Σχ. 5.57. Σε αυτή τη περίπτωση εμφανίζονται διαδοχικές ριπές ανέμου κατά την διάρκεια των οποίων η ταχύτητα ανέμου υπερβαίνει την ονομαστική τιμή των 12 m/s.



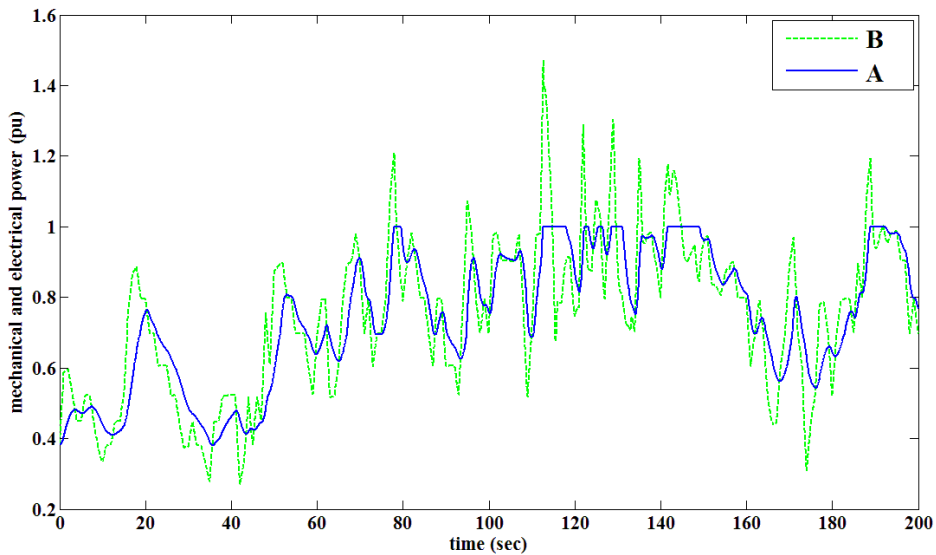
Σχήμα 5.57: Χρονοσειρά ανέμου



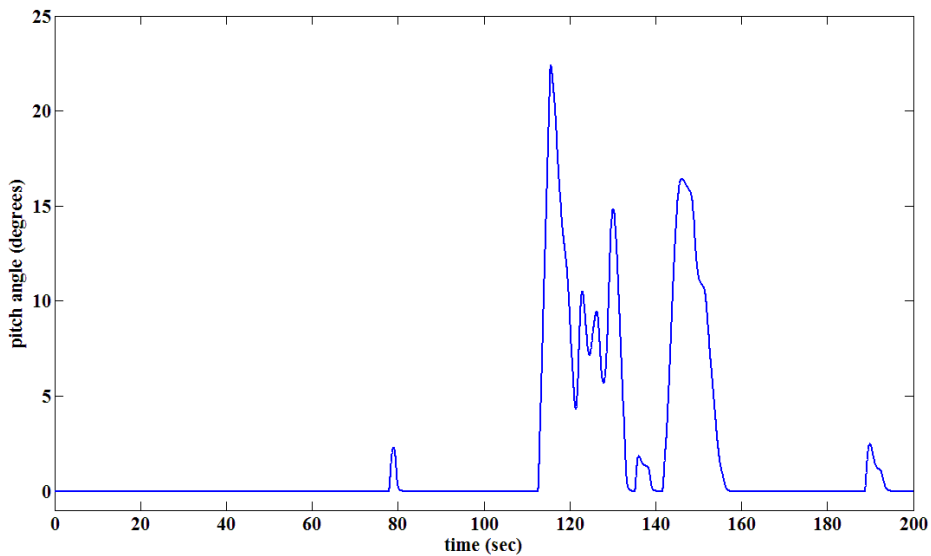
Σχήμα 5.58: Ταχύτητα περιστροφής της ισοδύναμης ανεμογεννήτριας

Στο Σχ. 5.58 φαίνεται η απόκριση της ταχύτητας περιστροφής της ισοδύναμης ανεμογεννήτριας. Και σε αυτή την περίπτωση φαίνεται η εξομάλυνση της ταχύτητας περιστροφής της Α/Γ λόγω της αδράνειας της μηχανής. Η εξομάλυνση αυτή, όπως έχει ήδη ειπωθεί, εμφανίζεται και στην ενεργό ισχύ που εγχέεται στο δίκτυο από το αιολικό πάρκο, η απόκριση της οποίας φαίνεται στο Σχ. 5.59. Σε αυτή τη περίπτωση αξίζει να παρατηρηθεί η λειτουργία της εξεταζόμενης διάταξης τις χρονικές περιόδους όπου η ταχύτητα ανέμου υπερβαίνει την ονομαστική τιμή των 12 m/s, κυρίως στο χρονικό διάστημα από 100 s έως 160 s. Όπως φαίνεται στην καμπύλη Β του Σχ. 5.59 η αεροδυναμική ισχύς στο προαναφερθέν χρονικό διάστημα υπερβαίνει την ονομαστική τιμή της ενεργού ισχύος του αιολικού πάρκου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την επιτάχυνση της μηχανής σε τιμές πέραν των ονομαστικών στροφών της (18 ΣΑΛ), όπως φαίνεται στο Σχ. 5.58. Σε αυτές τις χρονικές περιόδους η ενεργός ισχύς εξόδου του αιολικού πάρκου παραμένει στην μέγιστη τιμή του 1 αμ, λόγω της

χαρακτηριστικής ελέγχου του Σχ. 4.6. Η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής πέραν της μέγιστης τιμής προκαλεί την δράση του ρυθμιστή γωνίας βήματος των πτερυγών ο οποίος διαμορφώνει μια γωνία βήματος αναφοράς ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας. Η απόκριση της γωνίας βήματος που διαμορφώνει ο σερβομηχανισμός της διάταξης φαίνεται στο Σχ. 5.60. Στο σχήμα αυτό φαίνονται χαρακτηριστικά οι διαδοχικές αυξήσεις της γωνίας βήματος λόγω των αντίστοιχων αυξήσεων της ταχύτητας περιστροφής της Α/Γ οι οποίες με τη σειρά τους προκαλούνται από τις διαδοχικές ριπές ανέμου στο χρονικό διάστημα από 100 s έως 160 s.



Σχήμα 5.59: Α: Ηλεκτρική ισχύς της ανεμογεννήτριας
 Β: Αεροδυναμική ισχύς της ανεμογεννήτριας



Σχήμα 5.60: Απόκριση γωνίας βήματος πτερυγών

Γενικά παρατηρείται ότι με τις θεωρηθείσες ρυθμίσεις η ανεμογεννήτρια αποκρίνεται ικανοποιητικά σε όλες τις εξετασθείσες διαταραχές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε ένα απλοποιημένο μοντέλο ανεμογεννήτριας με πλήρη μετατροπέα κατάλληλο για μελέτες ευστάθειας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Συγκεκριμένα, μεγαλύτερη βαρύτητα δόθηκε στην κατάλληλη μοντελοποίηση του μετατροπέα πλευράς δικτύου, μέσω του οποίου γίνεται η έγχυση της ενεργού και αέργου ισχύος στο δίκτυο. Ο μετατροπέας αυτός μοντελοποιήθηκε ως μια ελεγχόμενη πηγή ρεύματος με μια μικρή χρονική καθυστέρηση η οποία αναπαριστά την αντίστοιχη καθυστέρηση στους βρόχους ελέγχου του μετατροπέα. Αμελήθηκε η δυναμική συμπεριφορά του πυκνωτή που υπάρχει στην dc σύνδεση της πραγματικής διάταξης, καθώς η προσαρμογή της dc τάσης στην ονομαστική της τιμή γίνεται σε χρόνο μικρότερο από την χρονική κλίμακα στην οποία εξετάζεται η απόκριση της συγκεκριμένης διάταξης. Συνεπώς, η ενεργός ισχύς της γεννήτριας θεωρήθηκε ίση με την ενεργό ισχύ που εγχέεται στο δίκτυο. Η ενεργός ισχύς αναφοράς διαμορφώνεται από την στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος. Επίσης μοντελοποιήθηκε και ο ρυθμιστής γωνίας βήματος των πτερυγίων ο οποίος δρα όταν η ταχύτητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας υπερβαίνει τη μέγιστη τιμή της. Τέλος αναπτύχθηκε και η στρατηγική με την οποία ο μετατροπέας πλευράς δικτύου αναπροσαρμόζει την έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος κατά την διάρκεια βυθίσεων της τάσης του δικτύου, ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις των σύγχρονων κωδίκων δικτύου.

Στην συνέχεια περιγράφηκε η περίπτωση όπου το εξεταζόμενο αιολικό πάρκο είναι συνδεδεμένο σε ένα άπειρο Σ.Η.Ε. μέσω τριών γραμμών μεταφοράς. Εξετάστηκε η απόκριση του αιολικού πάρκου σε τριφασικό βραχυκύκλωμα σε μια από τις προαναφερθείσες γραμμές, για τις περιπτώσεις όπου το αιολικό πάρκο λειτουργεί με έλεγχο της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης και όταν λειτουργεί με έλεγχο συντελεστή ισχύος στην έξοδό του. Διαπιστώθηκε πως όταν το αιολικό πάρκο λειτουργεί με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος προκύπτει μια μόνιμη βύθισης τάσης μετά την εκκαθάριση του σφάλματος. Η προηγούμενη πτώση τάσης διορθώνεται όταν το Α/Π λειτουργεί με έλεγχο της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης.

Τέλος, περιγράφηκε η περίπτωση όπου το εξεταζόμενο αιολικό πάρκο είναι συνδεδεμένο σε ένα μικρό διασυνδεδεμένο σύστημα στο οποίο υπάρχει και ένας συμβατικός σταθμός παραγωγής με σύγχρονη γεννήτρια. Διαπιστώθηκε πως όταν το Α/Π λειτουργούσε με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος η απόκριση του δικτύου ήταν δυσμενέστερη μετά από μια διαταραχή σε σχέση με την περίπτωση όπου το αιολικό πάρκο δεν ήταν συνδεδεμένο. Αντίθετα υπήρχε εμφανής βελτίωση στην απόκριση του δικτύου όταν το αιολικό πάρκο λειτουργούσε με έλεγχο της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης. Στην συνέχεια μελετήθηκαν τριφασικά σφάλματα μεγαλύτερης χρονικής διάρκειας ώστε να υπολογιστούν οι κρίσιμοι χρόνοι εκκαθάρισης, ανάλογα με την αρχική ταχύτητα ανέμου του αιολικού πάρκου πριν την διαταραχή. Διαπιστώθηκε πως όσο μικρότερη ήταν η αρχική ταχύτητα ανέμου τόσο μεγαλύτερος προέκυπτε ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης. Με άλλα λόγια τόσο μεγαλύτερη ήταν η

συμβολή του αιολικού πάρκου στην μεταβατική ευστάθεια του εξεταζόμενου δικτύου. Επίσης διερευνήθηκε και η συμβολή στην μεταβατική ευστάθεια ανάλογα με την στρατηγική με την οποία το αιολικό πάρκο εγγείει ενεργό και άεργο ισχύ κατά την διάρκεια βυθίσεων της τάσης του δικτύου. Διαπιστώθηκε πως για υψηλή αρχική ταχύτητα ανέμου ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης προκύπτει σημαντικά μικρότερος στην περίπτωση όπου δοθεί προτεραιότητα στην ενεργό ισχύ, σε σχέση με την περίπτωση όπου η ενεργός ισχύς βαθμιαία μειώνεται με μείωση της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης, ώστε να δοθεί το αντίστοιχο περιθώριο για έγχυση αέργου ισχύος. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται πως το αιολικό πάρκο συμβάλλει θετικά στην μεταβατική ευστάθεια του συστήματος όσο έχει τη δυνατότητα παραγωγής αέργου ισχύος, ενώ συμβάλλει αρνητικά στην ευστάθεια όταν δεν έχει αυτή τη δυνατότητα. Η παραγωγή αέργου ισχύος κατά τη διάρκεια βυθίσεων τάσης προβλέπεται από τις απαιτήσεις των σύγχρονων κωδίκων δικτύου. Συνεπώς η ικανοποίηση των απαιτήσεων αυτών εξασφαλίζει και τη θετική συμβολή στην μεταβατική ευστάθεια του συστήματος. Τέλος, μελετήθηκε και η απόκριση του εξεταζόμενου αιολικού πάρκου σε χρονοσειρές ταχυτήτων ανέμου και διαπιστώθηκε η σημαντική εξομάλυνση στην ενεργό ισχύ εξόδου του λόγω της αδράνειας των μηχανών που απαρτίζουν το Α/Π.

6.2 Προοπτικές

Αντικείμενο μελλοντικής ερευνητικής προσπάθειας μπορεί να αποτελέσει η τροποποίηση της στρατηγικής ελέγχου του μετατροπέα πλευράς δικτύου κατά την διάρκεια πολύ μεγάλων βυθίσεων τάσης ώστε αυτός να προσαρμόζεται περισσότερο δυναμικά στα χαμηλά όρια της ενεργού ισχύος που μπορεί να εγχυθεί στο δίκτυο. Μια εναλλακτική λύση που έχει αναφερθεί είναι ο μετατροπέας να παριστάνεται σαν πηγή τάσεως μόλις η τερματική τάση μειωθεί κάτω από ένα όριο. Αυτό βέβαια απαιτεί να υπολογιστεί η κατάλληλη φάση της ελεγχόμενης πηγής τάσεως, σε σχέση με την αναφορά του δικτύου.

Ένα επιπλέον θέμα που χρήζει περισσότερης μελέτης είναι η ακριβέστερη αναγνώριση των παραμέτρων που καθορίζουν την απόκριση του μετατροπέα στην χρονική κλίμακα που αντιστοιχεί σε μελέτες ευστάθειας. Αυτό προϋποθέτει την προσομοίωση των συνηθέστερων τεχνικών οδήγησης των διακοπτικών στοιχείων, έτσι ώστε να μελετηθεί η απόκριση του μετατροπέα συναρτήσει των σημάτων που του δίνονται σαν αναφορά, καθώς και συναρτήσει των διαταραχών που εμφανίζονται στην τάση του δικτύου. Ειδικότερα, θα μπορούσε να μελετηθεί η απόκριση του μετατροπέα και σε συνθήκες όπου η μέγιστη ενεργός ισχύς που μπορεί να απορροφηθεί από το δίκτυο είναι μικρότερη από την ενεργό ισχύ που δίνεται σαν αναφορά στα συστήματα ελέγχου του μετατροπέα. Έτσι μπορούν να εξαχθούν ακριβέστερα συμπεράσματα για την πιθανή ασταθή λειτουργία του μετατροπέα και για την κατάλληλη τεχνική έλεγχου που θα πρέπει να εφαρμοστεί ώστε να αποφευχθεί η προαναφερθείσα κατάσταση.

Ένα άλλο σημαντικό θέμα αποτελεί η προσθήκη στο μοντέλο των συστημάτων προστασίας της εξεταζόμενης διάταξης. Συγκεκριμένα, θα μπορούσε να μοντελοποιηθεί η διάταξη που θα προκαλεί αποσύνδεση της ανεμογεννήτριας ανάλογα με την διάρκεια και το μέγεθος της βύθισης τάσης έτσι ώστε να προκύψει μια περισσότερο ρεαλιστική λειτουργία της διάταξης αυτής κατά την διάρκεια των προσομοιώσεων.

Ένα ζήτημα που χρήζει περισσότερης μελέτης είναι και η διερεύνηση της στρατηγικής με την οποία το αιολικό πάρκο εγγείει ενεργό και άεργο ισχύ στο δίκτυο

κατά την διάρκεια βυθίσεων τάσης. Θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν παραδείγματα από περισσότερους κώδικες δικτύου έτσι ώστε να αξιολογηθεί η επίδραση της εξεταζόμενης διάταξης στην απόκριση του συστήματος κατά την διάρκεια διαταραχών, ανάλογα με τον χρησιμοποιούμενο κώδικα.

Όσον αφορά το μηχανικό μέρος της διάταξης, θα μπορούσε να ενσωματωθεί ένα εναλλακτικό μοντέλο για την παράσταση του ρυθμιστή στροφών της ανεμογεννήτριας, με το οποίο η ενεργός ισχύς αναφοράς να προκύπτει περισσότερο δυναμικά από την απόκλιση της μετρούμενης ταχύτητας περιστροφής από μια ταχύτητα αναφοράς που θα διαμορφώνεται από την στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος.

Επίσης, θα μπορούσε να διερευνηθεί η επίδραση της ελαστικότητας του άξονα που συνδέει την πτερωτή με την γεννήτρια στην ενεργό ισχύ εξόδου του αιολικού πάρκου.

Επιπρόσθετα, ένα άλλο θέμα προς διερεύνηση είναι η υλοποίηση ενός προσαρμοστικού ελεγκτή στον ρυθμιστή γωνίας βήματος των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας, ο οποίος θα μεταβάλλει τα κέρδη των παραμέτρων του ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας της Α/Γ κάθε χρονική στιγμή.

Τέλος, θα μπορούσε να γίνει βελτιστοποίηση της μοντελοποίησης του αεροδυναμικού μέρους της ανεμογεννήτριας έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη η εμφάνιση των ανώτερων αρμονικών στην αεροδυναμική ροπή, που οφείλονται στη μεταβολή της ταχύτητας ανέμου με το ύψος (wind shear) και στο φαινόμενο σκίασης του πύργου (tower shadow).

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] “EU Energy Mix, 2000-2007”, European Statistics, European Wind Energy Association (EWEA) and Platts PowerVision.
- [2] “The Facts, An analysis of Wind Energy in the EU-25”, Executive Summary, European Wind Energy Association (EWEA).
- [3] “Large Scale Integration of Wind Energy in the European Power Supply: analysis, issues and recommendations”, EWEA, December 2005.
- [4] Han Slootweg, Eize de Vries, “Fixed vs. Variable”, Renewable Energy World, January-February 2003.
- [5] P. Pourbeik (conv.), “Modeling and Dynamic Behavior of Wind Generation as it relates to Power System Control and Dynamic Performance”, CIGRÉ WG C4.601 Technical report, August 2007.
- [6] E. Quitmann, “Wind farms support to weak electrical systems – auxiliary services”, Power Expo, Zaragoza, September 2008.
- [7] Stefan Hartge, “Ride-through Behavior of ENERCON Wind Energy Converters, technical details and computational capabilities”, in EWEC 2004.
- [8] Stephan Wachtel and Stefan Hartge, “Technical and economical benefits of wind energy converters with FACTS capabilities for power systems and the grid integration of wind power” in EWEC 2007, Milan, May 2007.
- [9] Jouko Niiranen, “Recent trends in variable speed wind turbine drives”, ABB Oy, NORPIE 2008.
- [10] Jouko Niiranen, Slavomir Seman, Jari-Pekka Matsinen, Reijo Virtanen, and Antti Vilhunen, “Low voltage ride-through testing of wind turbine converters at ABB helps wind turbines meet the requirements of IEC 61400-21 more quickly”, ABB, 2008.
- [11] Stefan Hartge and Frank Fischer, “FACTS capabilities of wind energy converters”, in EWEC 2006.
- [12] Marina Tsili, Christos Patsiouras and Stavros Papathanassiou, “Grid code requirements for large wind farms: A review of technical regulations and available wind turbine technologies”, in EWEC 2008, Belgium, 31 March - 3 April 2008.
- [13] N. W. Miller, J. J. Sanchez-Gasca, W. W. Price and R. W. Delmerico, “Dynamic Modeling of GE 1.5 MW and 3.6 MW Wind Turbine-Generators for Stability

- Simulations”, Proceedings of the IEEE PES General Meeting, Toronto, Canada, July 2003.
- [14] Gabriele Michalke, Anca D. Hansen and Thomas Hartkopf, “Control strategy of a variable speed wind turbine with multipole permanent magnet synchronous generator”, Risø National Laboratory, Denmark, 2007.
- [15] Anca D.Hansen and Gabriele Michalke, “Modelling and Control of Variable-speed Multi-Pole Permanent Magnet Synchronous Generator Wind Turbine”, Wind Energy 2008, May 2008.
- [16] S. M. Mueeen, R. Takahashi, T. Murata, J. Tamura and M. H. Ali, “Transient Stability Analysis of Permanent Magnet Variable Speed Synchronous Generator”, in Proceedings of International Conference on Electrical Machines and Systems 2007, Oct. 8~11, Seoul, Korea.
- [17] Joris Soens, Johan Driesen and Ronnie Belmans, “Equivalent transfer function for a variable speed wind turbine in power system dynamic simulations”, International Journal of Distributed Energy Resources vol:1 issue:2 pages:111-133.
- [18] M. Pöller, S. Achilles, “Direct Drive Synchronous Machine Models for Stability Assessment of Wind Farms”, in Proceedings of the Fourth International Workshop on Large Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Offshore Wind Farms, Billund, Denmark, October 20-21 2003.
- [19] C. Abbey and G. Joos, “Effect of Low Voltage Ride Through (LVRT) Characteristic on Voltage Stability”, in Proceedings of 2005 IEEE PES General Meeting, vol. 2, 12-16 June 2005, pp. 1901-1907.
- [20] Vladislav Akhmatov, “Modelling and ride-through capability of variable speed wind turbines with permanent magnet generators”, Wind Energy 2006, vol.9, Issue 4, pp. 313-326.
- [21] M.R. Behnke and E. Muljadi, “Reduced order dynamic model for variable-speed wind turbine with synchronous generator and full power conversion topology”, Future Power Systems, 2005 International conference on, November 2005.
- [22] J. Morren, J.T.G. Pierik, and S.W.H. de Haan, “Voltage dip ride-through control of direct-drive wind turbines ”, in Universities Power Engineering Conference, UPEC 2004, 39th International, vol. 2, 6-8 September 2004, pp. 934-938.
- [23] R. Ottersten, A. Petersson, K. Pietiläinen, “Voltage sag response of pwm rectifiers for variable speed wind turbines,” in Proc. Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics (NORpie 2004), Trondheim, Norway, June 2004.
- [24] S. B. Papaefthimiou and S. A. Papathanassiou, “Simulation and Control of a Variable Speed Wind Turbine with Synchronous Generator,” in Proceedings of ICEM 2006, Crete, Hellas, September 2006.

- [25] David T. Johnsen, Willi Christiansen, “Optimisation of the Fault Ride Through strategy of a Wind Farm”, Master’s Thesis, Technical University of Denmark, September 2006.
- [26] David T. Johnsen, Willi Christiansen, “Implementing and Modeling of Wind Power in Ireland”, Master’s Thesis, Technical University of Denmark, June 2005.
- [27] V. Akhmatov, “Analysis of dynamic behaviour of electric power systems with large amount of wind power,” Ph.D. dissertation, Technical University of Denmark, April 2003.
- [28] Nayeem Rahmat Ullah, “Wind Power – Added Value for Network Operation”, Ph.D. dissertation, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden 2008.
- [29] Abram Perdana, “Dynamic Models of Wind Turbines”, Ph.D. dissertation, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden 2008.
- [30] Thomas Petru, “Modeling of Wind Turbines for Power System Studies”, Ph.D. dissertation, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden 2003.
- [31] Michael Lindgren, “Modeling and Control of Voltage Source Converters Connected to the Grid”, Ph.D. dissertation, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden 1998.
- [32] Clemens Jauch, “Stability and Control of Wind Farms in Power Systems”, Ph.D. dissertation, Risø National Laboratory, Denmark, October 2006.
- [33] Φ. Ν. Γάκης, “Έλεγχος Αντιστροφών Ισχύος Μονάδων Διανεμημένης Παραγωγής που συνδέονται στο Δίκτυο”, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Σεπτέμβριος 2005.
- [34] Σ. Β. Παπαευθυμίου, “Προσομοίωση και έλεγχος ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια”, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Σεπτέμβριος 2005.
- [35] Ε. Μ. Φαραντάτος, “Μοντέλο Ανεμογεννήτριας Μεταβλητών Στροφών με Σύγχρονη Μηχανή για μελέτες Ευστάθειας”, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Οκτώβριος 2006.
- [36] Α. Β. Γκίκα, “Μοντελοποίηση ηλεκτρονικών μετατροπέων ευρέως χρησιμοποιούμενων σε ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών”, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Οκτώβριος 2008.
- [37] G. Tsourakis, E. Farantatos and C. D. Vournas, “Generic Model and Control Modes for a Full-Converter Synchronous Wind Generator”, in Proceedings of ICEM 2006, Crete, Hellas, September 2006.

- [38] José R. Rodríguez, Juan W. Dixon, José R. Espinoza, Jorge Pontt, Pablo Lezana, “PWM Regenerative Rectifiers: State of the Art”, vol. 52, pp 5-22, Feb. 2005.
- [39] Marta Molinas, Bjarne Naess, William Gullvik and Tore Undeland, “Control of Wind Turbines with Induction Generators Interfaced to the Grid with Power Electronics Converters”, IPEC 2005.
- [40] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 1994.
- [41] P. Kundur, et al, "Definitions and Classification of Power System Stability", IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 2, pp. 1387-1401, May 2004.
- [42] Γ. Α. Μάνος, “Ανάλυση Φαινομένων Κατάρρευσης Τάσεως σε Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, Απρίλιος, 1998.
- [43] Ε. Γ. Ποταμιανάκης, “Προσομοίωση και Γραμμικοποίηση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργεια για την ανάλυση Βραχυπρόθεσμης Ευστάθειας Τάσης”, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, Απρίλιος 2006.
- [44] Φ. Δ. Κανέλλος, “Συμβολή στην Προσομοίωση και Αναγνώριση Ανεμογεννητριών με Ασύγχρονη Γεννήτρια για τη Δημιουργία Μειωμένης Τάξης Ισοδυνάμων Μοντέλων”, Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., Οκτώβριος 2003.
- [45] Σ. Α. Παπαθανασίου, “Συμβολή στην Ανάλυση Ανεμογεννητριών Μεταβλητών Στροφών με Ασύγχρονη Γεννήτρια για την επιλογή του Ηλεκτρικού Σχήματος”, Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π, Φεβρουάριος 1997.
- [46] Muhammad H. Rashid, Power Electronics Handbook, Second Edition, Elsevier, 2007.
- [47] Bimal K. Bose, Power Electronics and Motor Drives: advances and trends, Elsevier, 2006.
- [48] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, Power Electronics: Converters, Applications and Design, Second Edition, John Wiley & Sons, 1989.
- [49] E. G. Potamianakis and C. D. Vournas, “Modeling and Simulation of Small Hybrid Power Systems”, in Proceedings of 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference, Bologna, Italy, June 23-26 2003.
- [50] C. D. Vournas, E. G. Potamianakis, C. Moors and T. V. Cutsem, “An educational Simulation Tool for Power System Control and Stability”, IEEE Transactions on Power Systems. Special Section on Power Engineering Education, vol. 19, no. 1, February 2004.
- [51] D. Grahame Holmes, Thomas A. Lipo “Pulse Width Modulation for Power Converters – Principles and Practice”, IEEE 2003.

- [52] Bimal K. Bose, “Power Electronics and Variable Frequency Drives”, IEEE 1996.
- [53] I. Margaritis A. Tsouchnikas and N. Hatziargyriou, “Modeling and LVRT Capabilities of Variable Speed WTs equipped with Doubly Fed Induction and Direct Drive Synchronous Generator”, EWEC 2009.
- [54] Rajveer Mittal, K.S.Sandhu, D.K.Jain, “Ride-through Capability of Grid Interfaced Variable Speed Driven PMSG for Wind Energy Conversion Systems”, in Proceedings of International Conference on Energy and Environment, March 19-21, 2009.
- [55] Weihao Hu, Zhe Chen, Yue Wang and Zhaoan Wang, “Low Voltage Ride-Through of Variable Speed Wind Turbines with Permanent Magnet Synchronous Generator”, EVER 2009, Monaco, March 26-29 2009.
- [56] Thierry Van Cutsem and Costas Vournas, Voltage Stability of Electric Power Systems, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [57] S. K. Salman and Babak Badrzadeh, “New Approach for modeling Doubly-Fed Induction Generator (DFIG) for grid-connection studies”, EWEC 2004.
- [58] Kazmierkowski MP, Krishnan R, Blaabjerg F., Control in Power Electronics, Academic press, 2001.
- [59] Mats Wang-Hansen, “Wind Power Dynamic Behavior: Real Case Study on Linderödsåsen Wind Farm”, Master of Science Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden 2008.
- [60] G. Tsourakis, B. M. Nomikos and C. D. Vournas, “Effect of wind parks with doubly fed asynchronous generators on small-signal stability”, Electric Power Systems Research, vol. 79, issue 1, January 2009.
- [61] G. Tsourakis, B. M. Nomikos and C. D. Vournas, “Contribution of Doubly-Fed Wind Generators to Oscillation Damping”, Electric Power Systems Research, IEEE Transactions on Energy Conversion, υπό δημοσίευση.
- [62] Κ. Δ. Βουρνάς, Ευστάθεια Μονίμου Καταστάσεως, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2004.