

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Μελέτη τάσης δικτύου σε διασυνδεδεμένο αιολικό πάρκο

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Κυριακόπουλου Χαράλαμπου

ΑΜ 19089

Επιβλέπων καθηγητής: Σχοινάς Νικόλαος

Πάτρα, 2024

Copyright © Χαράλαμπος Κυριακόπουλος, 2024.

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 Πανεπιστημίου Πελοποννήσου.

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία συγκεντρώθηκαν και αναλύθηκαν βιβλιογραφικές πηγές οι οποίες αναφέρονται στο κεφάλαιο με τίτλο «Βιβλιογραφία».

Η διπλωματική εργασία έχει σκοπό να προσομοιάσει ένα αιολικό πάρκο συνολικής ισχύς 9 MW. Το πάρκο αποτελείται στο σύνολο του από 6 ανεμογεννήτριες διπλής ανατροφοδότησης 1,5 MW η κάθε μία. Για την επίτευξη της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε το Matlab-Simulink.

Αρχικά στο κεφάλαιο 1, γίνεται μία γενική αναφορά στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ποιες είναι οι κυριότερες από αυτές και μία μικρή ανάλυση για την αιολική ενέργεια. Στο κεφάλαιο 2 δίνεται έμφαση στις ανεμογεννήτριες, δηλαδή στο κατασκευαστικό τους μέρος. Χαρακτηριστικά αναλύονται θέματα όπως η δομή, τα μέλη, οι τύποι αλλά και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Στο 3^ο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των αιολικών πάρκων και πως μπορούν να συνθέσουν ένα μεγάλο ενιαίο σύστημα για μεγαλύτερη απόδοση. Το 4^ο κεφάλαιο αναφέρεται στην μοντελοποίηση ανεμογεννητριών DFIG. Αναλύει τις επαγωγικές γεννήτριες, τις καταστάσεις που μπορεί να έρθουν αντιμέτωπες και την περίπτωση της βύθισης τάσης. Γίνεται επίσης αναφορά στους μετατροπείς μιας DFIG ανεμογεννήτριας, στο διανυσματικό έλεγχο με τα μοντέλα Park και d-q, και τέλος τα συστήματα ελέγχου των ανεμογεννητριών. Το κεφάλαιο 5 είναι αφιερωμένο στην πραγματοποίηση της προσομοίωσης των διάφορων καταστάσεων του πάρκου. Οι προσομοιώσεις έλαβαν χώρα σε περιβάλλον Matlab και Simulink, των οποίων τα συμπεράσματα εμφανίζονται στο 6^ο κεφάλαιο.

Ευχαριστίες

Με το πέρας της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπον καθηγητή κ. Νικόλαο Σχοινά για την βοήθεια που μου προσέφερε και τις πολύτιμες οδηγίες που μου έδωσε.

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

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

Περιεχόμενα

| | |
|--|----|
| Περίληψη..... | 3 |
| Ευχαριστίες | 4 |
| Κεφάλαιο 1: Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και αιολική ενέργεια | 7 |
| 1.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας..... | 7 |
| 1.2 Αιολική Ενέργεια..... | 9 |
| Κεφάλαιο 2: Ανεμογεννήτριες..... | 12 |
| 2.1 Λειτουργία ανεμογεννήτριας..... | 12 |
| 2.2 Δομή ανεμογεννήτριας..... | 13 |
| 2.3 Συστήματα ανεμογεννητριών- Τύποι ανεμογεννητριών | 15 |
| 2.4 Έλεγχος ανεμογεννήτριας..... | 17 |
| 2.5 Περιβαλλοντική επίπτωση | 20 |
| Κεφάλαιο 3: Αιολικά πάρκα | 23 |
| 3.1 Απαιτήσεις αιολικού πάρκου | 24 |
| Κεφάλαιο 4: Μοντελοποίηση συστήματος ανεμογεννήτριας | 27 |
| 4.1. Επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας (DFIG) | 27 |
| 4.2 Καταστάσεις λειτουργίας DFIG..... | 28 |
| 4.2.1 Ομαλή λειτουργία | 28 |
| 4.3 Βυθίσεις τάσης 4.3.1 Συμμετρικές βυθίσεις τάσης..... | 30 |
| 4.3.2 Ασύμμετρες βυθίσεις τάσης..... | 31 |
| 4.3.3 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα..... | 32 |
| 4.4 Μετατροπέας ισχύος DFIG | 33 |
| 4.4.1 Μετατροπέας από την πλευρά δικτύου | 36 |
| 4.4.2 Μετατροπέας από την πλευρά δρομέα | 37 |
| 4.5 Ισοδύναμο κύκλωμα της DFIG | 37 |
| 4.6 Απώλειες μαγνήτισης | 39 |
| 4.7 Έλεγχος διανυσματικός DFIG..... | 40 |
| 4.7.1 Μοντέλο μετασχηματισμού Park | 40 |
| 4.7.2 Μοντέλο d-q στο χώρο κατάστασης..... | 42 |
| 4.7.3 Μοντέλο d-q σε στατό πλαίσιο αναφοράς | 43 |
| 4.7.4 Η ισχύς του μοντέλου d-q | 44 |
| 4.8 Σύστημα ελέγχου της DFIG | 45 |
| 4.8.1 Σύστημα ελέγχου από την πλευρά του δρομέα (RSC) | 45 |
| 4.8.2 Σύστημα ελέγχου από τη πλευρά του δικτύου (GSC)..... | 49 |
| Κεφάλαιο 5: Προσομοίωση αιολικού πάρκου | 53 |
| 5.1 Περιγραφή συστήματος..... | 53 |
| 5.2 Συνθήκες αλλαγής ταχύτητας | 54 |
| 5.2.1 Αλλαγή ταχύτητας σε εναέριο καλώδιο χωρίς σφάλμα | 54 |

| | |
|--|----|
| 5.2.2 Αλλαγή ταχύτητας σε υπόγειο καλώδιο χωρίς σφάλμα | 59 |
| 5.3 Συνθήκες τριφασικού σφάλματος | 64 |
| 5.3.1 Εναέριο καλώδιο σε τριφασικό σφάλμα..... | 64 |
| 5.3.2 Υπόγειο καλώδιο σε τριφασικό σφάλμα | 69 |
| 5.4 Επιρροή της διάρκειας του σφάλματος στο σύστημα..... | 74 |
| 5.5 Σφάλματα με διακόπτη | 76 |
| 5.5.1 Θέτεται εκτός μία φάση για 0.1 δευτερόλεπτα. | 77 |
| 5.5.2 Θέτονται εκτός δύο φάσεις για 0.1 δευτερόλεπτα..... | 80 |
| Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα | 85 |
| Βιβλιογραφία..... | 87 |

Κεφάλαιο 1: Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και αιολική ενέργεια

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελούν πλέον έναν από τους πιο σημαντικούς τομείς της ενεργειακής πολιτικής και τεχνολογικής ανάπτυξης παγκοσμίως. Καθώς η ανάγκη για βιώσιμη και καθαρή ενέργεια αυξάνεται, η έρευνα και η επένδυση σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας γίνονται όλο και πιο επιτακτικές. Οι ΑΠΕ περιλαμβάνουν πηγές όπως η ηλιακή, η αιολική, η υδροηλεκτρική, η γεωθερμική ενέργεια και η βιομάζα, οι οποίες ανανεώνονται φυσικά και δεν εξαντλούνται με τη χρήση τους. Αυτές οι πηγές ενέργειας είναι σημαντικά υπεύθυνες για τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, περιορίζοντας την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και προωθώντας την αειφόρο ανάπτυξη.

Ανάμεσα στις διάφορες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η αιολική ενέργεια ξεχωρίζει ως μια από τις πιο αποτελεσματικές και γρήγορα εξελίξιμες τεχνολογίες. Η αιολική ενέργεια παράγεται μέσω της μετατροπής της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια με τη χρήση ανεμογεννητριών. Η αξιοποίηση του ανέμου ως πηγή ενέργειας προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, όπως η μηδενική εκπομπή ρύπων κατά τη λειτουργία, η δυνατότητα τοπικής παραγωγής ενέργειας και ευκαιρία για περισσότερες δουλειές στο φάσμα των πράσινων τεχνολογιών.

1.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ορίζονται ως οι ανεξάντλητες πηγές ενεργείας οι οποίες βρίσκονται σε αφθονία στο φυσικό περιβάλλον. Οι ΑΠΕ είναι ανεξάντλητες και δεν μολύνουν το περιβάλλον με διοξείδιο του άνθρακα ή άλλες βλαβερές προς το περιβάλλον ουσίες. Ο σκοπός εκμετάλλευσής τους από τον άνθρωπο είναι να στραφεί προς αυτές ώστε να περιοριστεί η παραγωγή ενέργειας με τρόπους που μολύνουν το περιβάλλον. Με αφορμή τα σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα, τα τελευταία περίπου δεκαπέντε χρόνια, πολλές χώρες με ευνοϊκές συνθήκες και προοπτική προσπαθούν να εντάξουν στο ενεργειακό τους ισοζύγιο τις ΑΠΕ, μειώνοντας έτσι την εξάρτηση από πηγές ενέργειας βλαβερές προς το περιβάλλον. [3]

Πλεονεκτήματα των ανεξάρτητων πηγών ενέργειας είναι οι ανεξάντλητοι πόροι που διατίθενται, που με τη χρήση του δεν υπάρχουν ιδιαίτερες επιπτώσεις στο περιβάλλον

αφού έχουν μηδενικά απόβλητα και κατάλοιπα. Το λειτουργικό τους κόστος είναι χαμηλό κι έτσι δεν επηρεάζεται από τις αλλαγές στην διεθνή οικονομία. Σε αρκετές περιπτώσεις μάλιστα αποτελεί παράγοντα αναβάθμισης για περιοχές που είναι σχετικά υποβαθμισμένες, και συμβάλει στην κοινωνική ανάπτυξη. [2]

Από την άλλη πλευρά ο χαμηλός συντελεστής απόδοσης (περίπου 0.3 ή 30%) δεν επιτρέπει στις ΑΠΕ να είναι το κυρίαρχος τρόπος παραγωγής ενέργειας σε ένα μεγάλο αστικό κέντρο. Αυτός είναι και ο κυριότερος λόγος που δεν αποτελούν μοναδικό τρόπο παραγωγής ενέργειας αλλά συμπληρωματικό. Επίσης, η παροχή ενέργειας εξαρτάται από την παραγωγή της καθώς οι πηγές όπως ο άνεμος δεν είναι σταθερές όλο το χρόνο αλλά η ποσότητα των πηγών ποικίλουν ανάλογα με την εποχή.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας χωρίζονται, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, σε: [4]

·**Ηλιακή ενέργεια:** Εκμεταλλεύεται την ενέργεια από τον ήλιο μέσω φωτοβολταϊκών πάνελ που μετατρέπουν το ηλιακό φως σε ενέργεια. Η διαδικασία αυτή ξεκινάει από την απορρόφηση του ηλιακού φωτός από τους συλλέκτες του πάνελ που αποτελούνται από πολλαπλά κύτταρα διασυνδεδεμένα. Στα κύτταρα περιέχονται στρώματα ημιαγωγών που απελευθερώνουν ηλεκτρόνια με την επαφή του από φωτόνια. Η ροή των ηλεκτρονίων δημιουργεί ηλεκτρικό ρεύμα που διανέμεται σε οποιονδήποτε καταναλωτή.

·**Αιολική ενέργεια:** Εκμεταλλεύεται την δύναμη του ανέμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση στροβίλων. Οι τουρμπίνες τοποθετούνται σε χερσαίες και υπεράκτιες τοποθεσίες με στόχο την καλύτερη δυνατή ταχύτητα ανέμου, μετατρέποντας έτσι την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική.

·**Υδροηλεκτρική ενέργεια:** Παράγεται από την κίνηση του νερού. Υδροηλεκτρικοί σταθμοί κατασκευάζονται σε ποταμιά ή τεχνίτες λίμνες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

·**Γεωθερμική ενέργεια:** Εκμεταλλεύεται τη θερμότητα από το εσωτερικό της Γης με τη βοήθεια της χημείας και των φυσικών ιδιοτήτων των κοιτασμάτων νερού που είναι σε βάθος.

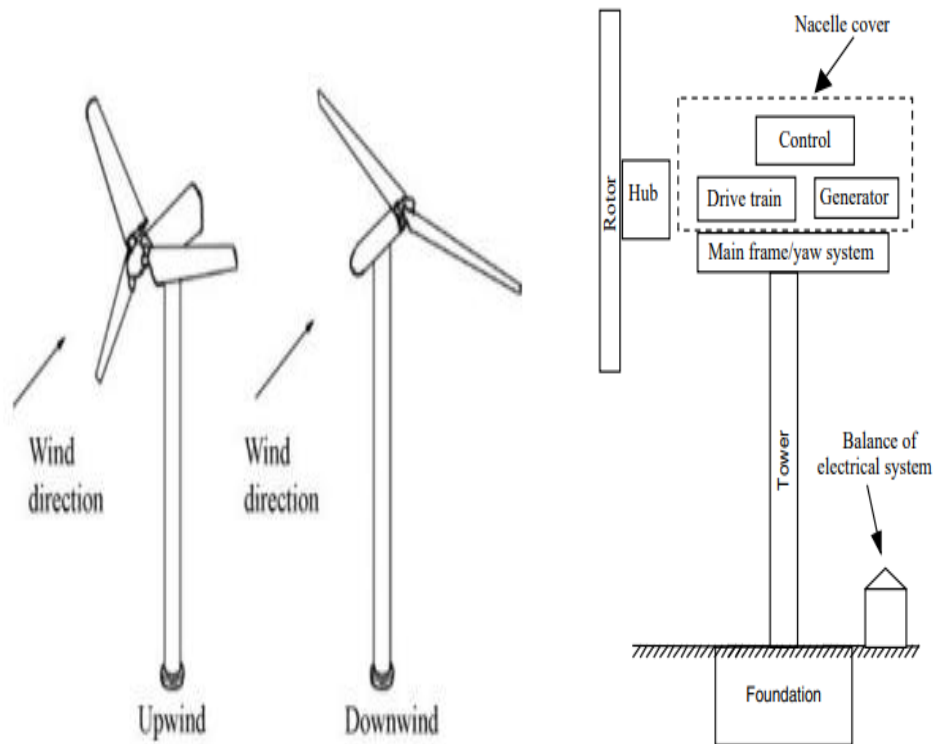
- **Ενέργεια από βιομάζα:** Προέρχεται από οργανικά υλικά και η καύση τους θεωρείται φιλική ως προς την εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα. Αυτό γιατί οι εκπομπές απορροφώντας από φυτά για την φωτοσύνθεση τους.

- **Ενέργεια από τη θάλασσα:** Εκμεταλλεύεται κύματα, παλίρροιες, ωκεανούς και τις διαφορές θερμοκρασίας στην θάλασσα. Μιας και τα κύματα δημιουργούνται από τον άνεμο που πνέει στην επιφάνεια της θάλασσας, καθιστώντας το μια αέναη πηγή κινητικής ενέργειας.

1.2 Αιολική Ενέργεια

Η Αιολική Ενέργεια ανθεί διεθνώς. Ειδικά το παράδειγμα της αιολικής ενέργειας το αποδεικνύει αυτό το ποσοστό επιτυχίας μπορεί να ποικίλλει σημαντικά ακόμη και με συγκρίσιμες συνθήκες εκκίνησης. Το πλαίσιο της περιβαλλοντικής και ενεργειακής πολιτικής είναι καθοριστικό εδώ. Ειδικότερα, ο νόμος της Γερμανίας για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (EEG), με την τροφοδοσία ισχύος του και κανονισμούς αποπληρωμής που ενθαρρύνουν τις επενδύσεις σε οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μαζί με παρόμοια νομοθεσία στην Ισπανία, έχει σημαντικό αποτέλεσμα σε σύγκριση με άλλες χώρες. Η Γερμανία και η Ισπανία είχαν εγκατεστημένη αιολική ενέργεια περίπου 50.000 MW το 2010, περισσότερα από τα μισά ολόκληρης της Ευρωπαϊκής Ένωσης. [5]

Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας είναι από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές παγκοσμίως, με την συλλογή της ενέργεια αν γίνεται με ανεμογεννήτριες. Οι ανεμογεννήτριες αποτελούνται από πτερύγια που κινούνται ανάλωμα με την ταχύτητα του ανέμου, σε περιστροφική κίνηση. Τα πτερύγια είναι συνδεδεμένα με μια γεννήτρια στο εσωτερικοί της τουρμπίνας και έτσι η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική.



1.1 Παρουσίαση εξωτερικής αλλά και της εσωτερικής μεριάς της ανεμογεννήτριας [5]

Μάλιστα σύμφωνα με την ΕΛΕΤΑΕΝ καταγράφηκε πως έως τις 11/07/2024 η κατά μέσο ορό ημερήσια παραγωγή αιολικής ενέργειας είναι κοντά στα 31.5 GWh αριθμός ο οποίος αποτελεί ρεκόρ για τα μέχρι τώρα δεδομένα. Επιπροσθέτως, η ηλεκτρική ενέργεια που παράχθηκε από τα αιολικά πάρκα για το 2023 είναι 11TWh, που σε ποσοστό παραγωγής ενέργειας είναι το 15,7% του ηλεκτρισμού σε όλη την Ελλάδα. [6]



1.2 Η παραγωγή αιολικής ενέργειας με γεωγραφική κατανομή σε επίπεδο περιφερειών για το 2023 [6]

Κεφάλαιο 2: Ανεμογεννήτριες

Για να καταστεί δυνατό να εκμεταλλευτεί ο άνθρωπος την κινητική ενέργεια από τον άνεμο μετατρέποντας την σε ηλεκτρική, ήταν απαραίτητο να δημιουργήσει ειδικές κατασκευές τις οποίες ονομάζουμε ανεμογεννήτριες. Οι ανεμογεννήτριες έχουν τη δυνατότητα με την φορά και την κίνηση του ανέμου να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Οι εγκαταστάσεις οι οποίες αποτελούνται από πολλαπλές ανεμογεννήτριες σε έναν περιορισμένο χώρο, διασυνδεδεμένες μεταξύ τους, ονομάζονται αιολικά πάρκα. Σκοπός ενός πάρκου είναι να παράξει όσο το δυνατόν μεγαλύτερα ποσά ενέργειας γίνεται με τις μικρότερες δυνατές απώλειες. Τα αιολικά πάρκα εκτός των ανεμογεννητριών περιλαμβάνουν και σταθμούς μετασχηματισμού, καλώδια μεταφοράς, δομές υποβοήθησης κ.α. Στο πλαίσιο της μόλυνσης του περιβάλλοντος οι ανεμογεννήτριες δεν το επιβαρύνουν άμεσα με παραγωγή CO₂, αλλά έμμεσα τα παρελκόμενα όπως η μεταφορά του ρεύματος, και της εγκατάστασης ή λόγω της μη ανακύκλωσης των υλικών τους.

2.1 Λειτουργία ανεμογεννήτριας

Η βασική λειτουργία της ανεμογεννήτριας είναι η μετατροπή της κινητικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Αυτό γίνεται όμως με ένα βήμα παραπάνω. Πιο αναλυτικά η κινητική ενέργεια από τον άνεμο μετατρέπεται αρχικά σε μηχανική περιστρέφοντας τους έλικες της ανεμογεννήτριας προς την κατεύθυνση που δίνει ο αέρας. Στη συνέχεια, ο ρότορας των πτερυγίων είναι συνδεδεμένος στο εσωτερικό με ένα κιβώτιο ταχυτήτων το οποίο μετατρέπει την χαμηλή ταχύτητα του ρότορα σε υψηλή. Ο άξονας της υψηλής ταχύτητας είναι συνδεδεμένο με τον ρότορα της γεννήτριας. Η ηλεκτρική γεννήτρια δουλεύει σε μεγαλύτερη ταχύτητα που σε συνδυασμό με την κατάλληλη μαγνήτιση παράγει την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια.

Υπάρχουν πολλά είδη ανεμογεννητριών. Παρόλα αυτά χωρίζονται σε 2 βασικές κατηγορίες βάση την θέση των πτερυγίων στον άξονα περιστροφής σε σύγκριση με την ροή του αέρα:

• **Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα:** Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα είναι στραμμένες προς την κατεύθυνση του ανέμου. Ο ρότορας και η ηλεκτρική γεννήτρια είναι τοποθετημένοι στην κορυφή ενός πύργου. Οι μεγάλες ανεμογεννήτριες έχουν έναν αισθητήρα και έναν σερβοκινητήρα (βοηθητικό μοτέρ) για να στρέφονται προς την κατεύθυνση του ανέμου, ενώ οι μικρές ανεμογεννήτριες κατευθύνονται από έναν ανεμοδείκτη. Χρησιμοποιούν επίσης ένα κιβώτιο ταχυτήτων το οποίο μετατρέπει την χαμηλή ταχύτητα του ανέμου σε υψηλή μέσω ενός μηχανισμού, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

• **Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα:** Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα είναι με τον ρότορα κάθετα τοποθετημένο στο έδαφος. Το βασικότερο πλεονέκτημα του κάθετου άξονα είναι ότι δεν χρειάζεται να έχει κλίση στην κατεύθυνση που κινείται ο άνεμος για να παράγει ενέργεια. Είναι πιο αποδοτικές σε μέρη με ανέμους που αλλάζουν συχνά ταχύτητα αφού περιστρέφονται 360° μοίρες. Το κιβώτιο ταχυτήτων και η γεννήτρια βρίσκονται κοντά στο έδαφος, γεγονός που κάνει πιο εύκολη την συντήρησή του. Βασικό μειονέκτημα είναι ότι παράγουν πολύ λιγότερη ενέργεια κατά μέσο όρο με το πέρασμα του χρόνου.[8] [9] [10]

2.2 Δομή ανεμογεννήτριας

Είναι γεγονός πως από την αρχή της εμφάνισης των ανεμογεννητριών καθιερώθηκαν οι οριζόντιου άξονα με δύο ή τρία πτερύγια. Ο λόγος της επικράτησης τους έναντι αυτών του κατακόρυφου άξονα είναι μεγάλος αεροδυναμικός βαθμός απόδοσης. Αναλυτικότερα μία τυπική ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα αποτελείται από τα παρακάτω δομικά στοιχεία:

1. **Σύστημα μετάδοσης κίνησης**, το οποίο αποτελείται από:
 - i. **Τον άξονα χαμηλής ταχύτητας** που περιστρέφεται με 30 έως 60 στροφές ανά λεπτό
 - ii. **Το σύστημα της πέδησης (brake)**, που είναι ένα κοινότυπο δισκόφρενο το οποίο είναι τοποθετημένο στον κύριο άξονα ή στον άξονα της γεννήτριας. Δουλεύει ηλεκτρικά, μηχανικά ή υδραυλικά, για περίπτωση έκτακτης ανάγκης.

- iii. **Το κιβώτιο ταχυτήτων (gearbox).** Το κιβώτιο ταχυτήτων κάνει στη σύνδεση του Άξονα Χαμηλής Ταχύτητας, ο οποίος λειτουργεί με 30 έως 60 στροφές ανά λεπτό, με τον Άξονα Υψηλής Ταχύτητας (High-speed Shaft) που οδηγεί τη γεννήτρια σε ταχύτητα 1200 έως 1500 στροφές ανά λεπτό, όπως είναι η απαίτηση των περισσότερων γεννητριών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ανεμογεννήτριες δεν μπορούν να λειτουργούν σε ταχύτητες ανέμου άνω των 65 μιλίων/ώρα, καθώς οι γεννήτριες μπορεί να υπερθερμανθούν και τα πτερύγια να σπάσουν και για αυτό το λόγο διατηρούν μία σταθερή ταχύτητα με τη βοήθεια ενός ελεγκτή. Συνήθως, ο ελεγκτής ξεκινά τη μηχανή όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι περίπου 8-16 μίλια την ώρα και την απενεργοποιεί όταν φτάνει περίπου στα 65 μίλια την ώρα.
2. **Ηλεκτρική γεννήτρια:** η οποία μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική.
3. **Κέλυφος:** που περιλαμβάνει το σύστημα μετάδοσης κίνησης, τους άξονες και την ηλεκτρική γεννήτρια. Κάποια κελύφη είναι τόσο μεγάλα που ένας τεχνικός μπορεί να στέκεται όρθιος μέσα σε αυτά ενώ εργάζεται.
4. **Σύστημα προσανατολισμού:** Ο άξονας περιστροφής του μη επανδρωμένου αεροσκάφους είναι πάντα παράλληλος με την κλίση του ανέμου μέσω ενός ανεμόμετρου που υπολογίζει την ταχύτητα από τον άνεμο και μεταδίδει δεδομένα ταχύτητας ανέμου στον ελεγκτή.
5. **Πύργος:** ένα από τα βασικότερα μέρη της ανεμογεννήτριας το οποίο στηρίζει ολόκληρη την ηλεκτρομηχανολογική κατασκευή. Πολλές φορές οι πύργοι μπορεί να φτάσουν έως και τα 130 μέτρα. Συχνό είναι επίσης το φαινόμενο της εγκατάστασης ανεμογεννήτριας σε μεγάλα υψόμετρα, γεγονός το οποίο σημαίνει μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας αφού ο άνεμος είναι δυνατότερος σε μεγάλα ύψη. Παράλληλα πρέπει να αναφερθεί ότι η κατασκευή σε αυτό το υψόμετρο αλλάζει, με τη χρήση πιο ανθεκτικών υλικών, λόγω των καταπονήσεων, με κατάλληλο αεροδυναμικό σχήμα για σταθερότητα και αντοχή. Τέλος, μεγάλος όγκος μελέτης υπάρχει στην αλληλεπίδραση μεταξύ περιστρεφόμενων πτερυγίων, πύργου στηρίξεως και τοποθέτηση ανεμοκινητήρων σε εδάφη που δεν έχουν μεγάλη σταθερότητα, όπως ο βυθός της θάλασσας.

6. **Πίνακας ελέγχου:** Γνωστό και ως Controller, είναι τοποθετημένο στην βάση του πύργου. Ολόκληρο το σύστημα για τον έλεγχο επιβλέπει, ελέγχει και συντονίζει την λειτουργία την ανεμογεννήτριας ώστε να έχει την μεγαλύτερη δυνατή συλλογή ενέργειας.

2.3 Συστήματα ανεμογεννητριών- Τύποι ανεμογεννητριών

Ανάλογα τα ηλεκτρικά μέρη μιας ανεμογεννήτριας, χωρίζονται σε μεταβλητών ή σταθερών στροφών. Οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών έχουν την άνεση να συνδέονται απευθείας στο δίκτυο, σε αντίθεση με των μεταβλητών στροφών που χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά ισχύος για τη σύνδεσή τους. Παρακάτω αναλύονται τα δύο συστήματα: [11]

Σταθερών στροφών: Ονομάζονται σταθερών στροφών, αφού Ο ρότορας της ανεμογεννήτριας περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα, ανεξάρτητα από την ταχύτητα του ανέμου, και η ταχύτητα περιστροφής είναι πολύ κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα. Η προαναφερθείσα ταχύτητα επιτυγχάνεται μέσω ενός κιβωτίου ταχυτήτων που συνδέει την περωτή με τον δρομέα της γεννήτριας. Το κιβώτιο ταχυτήτων αυξάνει την ταχύτητα περιστροφής και μειώνει τη ροπή ανάλογα με τον λόγο ταχύτητας περυγίου προς ρότορα. Οι γεννήτριες που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι τύπου κλωβού.

Η λειτουργία σταθερών στροφών έχει ένα σημαντικό πλεονέκτημα. Αυτό είναι ότι επιτρέπει την απευθείας σύνδεση των ανεμογεννητριών στο δίκτυο χωρίς τη χρήση ηλεκτρονικών ισχύος. Γεγονός το οποίο καθιστά τις ανεμογεννήτριες πιο οικονομικές, πιο απλές στην σύνθεσή τους και λιγότερο δαπανηρές. Λόγω της απλούστερης σύνθεσης είναι πιο στιβαρές, αξιόπιστες και έχουν μικρότερο βάρος. Είναι απαραίτητο δε, να υπάρχει διάταξη ομαλής εκκίνησης καθώς κατά τη ζεύξη εμφανίζονται μεταβατικά φαινόμενα. Επίσης οι ασύγχρονες γεννήτριες απορροφούν μεγάλα ποσά άεργου ισχύος από το δίκτυο και ο συντελεστής ισχύος διαμορφώνεται περίπου στο 0.9. Έτσι είναι αναγκαία η χρήση ειδικών φίλτρων ούτως ώστε να επιτευχθεί διόρθωση του συντελεστή ισχύος στο 0.95.

Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν και μειονεκτήματα τα οποία δεν είναι καθόλου αμελητέα. Αρχικά, οι ασύγχρονες γεννήτριες που είναι συνδεδεμένες απευθείας στο δίκτυο ζητούν και τραβούν μεγάλα ποσά έργου ισχύος, με αποτέλεσμα να μειώνεται

κατά πολύ ο συντελεστής ισχύος. Στη συνέχεια, εμφανίζουν μεγάλη μεταβολή στην ισχύς εξόδου αφού δεν μπορούν να απορροφήσουν τις διακυμάνσεις της ισχύος του ανέμου. Τέλος, ο έλεγχος της ισχύος εξόδου είναι μια αργή διαδικασία αφού μπορεί να γίνει μόνο από τη ρύθμιση των πτερυγίων της πτερωτής που μπορεί να πραγματοποιηθεί παθητικά ή ενεργητικά.

Επιπρόσθετα, μπορεί να υπάρξει και γεννήτρια με μεταβλητή αντίσταση δρομέα. Οι ανεμογεννήτριες αυτές χρησιμοποιούν ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα με την ιδιαιτερότητα της ύπαρξης ηλεκτρονικών ισχύος με σκοπό την μεταβολή της αντίστασης του δρομέα της γεννήτριας. Με τον τρόπο αυτό μπορεί η ταχύτητα να μεταβάλλεται έως και 10%, είτε θετικά είτε αρνητικά. Έτσι σε διάφορες ριπές ανέμου μπορεί να επιτευχθεί βελτίωση της παραγόμενης ισχύος και να μειωθεί η μηχανική φόρτιση. Ο έλεγχος των πτερυγίων γίνεται με σύστημα μεταβολής της κλίσης των πτερυγίων (pitch).

Μεταβλητών στροφών: Για τις ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου χρησιμοποιείται σύγχρονη γεννήτρια. Ο στάτης αυτής της γεννήτριας συνδέεται στο δίκτυο μέσω μετατροπέα AC/DC/AC. Με σκοπό να υπάρξει συγχρονισμός και να έρθει η γεννήτρια στην συχνότητα του δικτύου ο μετατροπέας μπορεί να διαμορφώσει την τάση εξόδου με την συχνότητα που επιθυμεί. Έτσι η ανεμογεννήτρια μπορεί να λειτουργεί με μεταβαλλόμενη συχνότητα άρα και μεταβαλλόμενη ταχύτητα περιστροφής. Οι σύγχρονες γεννήτριες μπορούν να διεγείρονται από συνεχές ρεύμα ή από μόνιμους μαγνήτες. Οι σύγχρονες γεννήτριες με μεγάλο αριθμό πόλων μπορούν να κινούνται σε χαμηλότερες ταχύτητες και μπορούν να χρησιμοποιούν κιβώτια ταχυτήτων χαμηλής σχέσης μετάδοσης. Σε διαφορετική περίπτωση, που ο αριθμός των πόλων είναι μεγάλος μπορεί να μην υπάρχει κιβώτιο ταχυτήτων, μικραίνοντας έτσι το κόστος κατασκευής, το βάρος και το κόστος συντήρησης.

Επίσης υφίστανται λιγότερες καταπονήσεις, συνεπώς και μικρότερο κόστος συντήρησης. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα όμως, είναι ο έλεγχος της ενεργού και άεργου ισχύος εξόδου. Καθώς με τον τρόπο αυτό δεν πάει χαμένη η περίσσεια από την ενέργεια που δίνει ο άνεμος από τις διακυμάνσεις στην ταχύτητα του.

Τα μειονεκτήματα αυτού του τύπου ανεμογεννήτριας επικεντρώνονται σε θέματα όπως η πολυπλοκότητα στις διατάξεις και η μελέτη για την τοποθέτηση των

ηλεκτρονικών ισχύος. Τα ηλεκτρονικά ισχύος σαν κύριο μειονέκτημά τους έχουν τις αρμονικές που εμφανίζονται στην πλευρά του δικτύου, με την τοποθέτηση φίλτρων αποκοπής αρμονικών να είναι αναγκαία. Για τους παραπάνω λόγους λοιπόν, έχουν υπερισχύσει στην αγορά σήμερα οι ανεμογεννήτριες μεταβαλλόμενων στροφών και είναι πιο ευρέως διαδεδομένες στις μέρες μας.

Για τις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών εκτός από τη χρήση σύγχρονης γεννήτριας μπορεί να λειτουργήσει και με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τυλιγμένου δρομέα όπου και ο στάτης και ο δρομέας συνδέονται στο δίκτυο. Σε αντίθεση με τον στάτη που συνδέεται απευθείας στο δίκτυο, ο δρομέας συνδέεται μέσω ψηκτρών και ενός μετατροπέα AC/DC/AC. Αυτό δίνει τη δυνατότητα στην ανεμογεννήτρια να μεταβάλλει την Η ταχύτητα περιστροφής μειώνεται κατά 30% σε σύγκριση με το Η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα σε ταχύτητες ανέμου χαμηλότερες της ονομαστικής ελέγχεται έμμεσα από τον έλεγχο ροπής της γεννήτριας. Σε υψηλότερες ταχύτητες ανέμου, η έξοδος διατηρείται στις ονομαστικές τιμές και η ταχύτητα περιστροφής ελέγχεται από αλλαγές στο βήμα των πτερυγίων (pitch). Σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί η χρήση του αντιστροφέα, καθώς δεν χρειάζεται παραπάνω από το 30% της ονομαστικής ισχύς της ανεμογεννήτριας. Αυτό το γεγονός έχει ως επακόλουθο την μεγάλη μείωση κόστους και απωλειών ενέργειας, άρα αυξάνεται η ενεργειακή απόδοση και μειώνεται η μεταβλητότητα της ισχύς εξόδου. Στον αντίποδα, σημαντικό μειονέκτημα αποτελεί η πολυπλοκότητα που παρουσιάζουν αυτού του είδους ανεμογεννήτριας λόγω της χρήσης ηλεκτρονικών ισχύος στην διάταξή τους.

2.4 Έλεγχος ανεμογεννήτριας

1. Μηχανικός έλεγχος

Ο μηχανικός έλεγχος είναι υπεύθυνος στην αποφυγή της καταπόνησης και της φθοράς της ανεμογεννήτριας από την μη απορροφούμενη ισχύ του ανέμου αλλά και στις υψηλές ταχύτητες του δρομέα σε αεροδυναμικές δυνάμεις. Οι τρόποι μηχανικού ελέγχου που εφαρμόζονται στις ανεμογεννήτριες σταθερής και μεταβλητής ταχύτητας είναι τρεις. Είναι ο παθητικός, ο ενεργός και ο έλεγχος γωνίας πτερυγίων.

2. Παθητικός έλεγχος

Τα πτερύγια έχουν σταθερή γωνία στον άξονα. Ο αεροδυναμικός σχεδιασμός επιβραδύνει τον ρότορα όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι πάνω από την ονομαστική. Με το σύστημα αυτό, στις υψηλές ταχύτητες πάνω από τις ονομαστικές, λόγω του σχήματος και της αεροδυναμικής των πτερυγίων υπάρχει περιορισμός στην παραγόμενη ισχύς. Ως αποτέλεσμα μειώνεται η αναπτυσσόμενη ροπή καθώς η ισχύς από τα πτερύγια περιορίζεται σε συγκεκριμένο εύρος. Πλεονέκτημα του εντοπίζεται στο γεγονός ότι δεν υπάρχουν κινούμενα μέρη πάνω στον ρότορα, άρα λιγότερες βλάβες και εξοικονόμηση οικονομικών πόρων. Στα μειονεκτήματα εντοπίζεται η πολυπλοκότητα κατασκευής, η μεταβολές στην παραγόμενη ισχύ σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου αλλά και η μικρή απόδοση του συστήματος.

3. Γωνία βήματος πτερυγίου (pitch control)

Χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον σε ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών αφού η ανεμογεννήτρια με αυτό τον τρόπο ελέγχου δέχεται μικρότερες πιέσεις και δυνάμεις.

Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών αυτών διαθέτουν σύστημα περιστροφής κατά τον διαμήκη άξονα. Η περιστροφή μπορεί να γίνει παράλληλα ή και οριζόντια στον εισερχόμενο άνεμο. Η γωνία πρόσπτωσης αλλάζει με σκοπό την προσαρμογή της ισχύς εξόδου σε μία ισορροπία της προστασίας της ανεμογεννήτριας και της καλύτερης απόδοσης της. Τις στιγμές που ο άνεμος προκαλεί μεγάλη παραγωγή ενέργειας, τα πτερύγια αλλάζουν γωνία πρόσπτωσης προς οριζόντια κατεύθυνση στον εισερχόμενο άνεμο ώστε να μειωθεί ο άνεμος που προσπίπτει πάνω της.

Για την καλύτερη κατανόηση, εάν για παράδειγμα η ταχύτητα του ανέμου έχει μικρότερη τιμή από την ονομαστική το πτερύγιο θα βρίσκεται στις 0 μοίρες, ενώ σε περίπτωση που ο άνεμος είναι πάνω από την ονομαστική ταχύτητα, τα πτερύγια προσαρμόζονται στην κατάλληλη γωνία βήματος με σκοπό να επιτευχθεί μια υψηλή ισχύς εξόδου στα επιτρεπτά όρια. Με την μείωση της έντασης ταχύτητας του ανέμου τα πτερύγια επιστρέφουν στην αρχική τους θέση. Τα κυριότερα μειονεκτήματα είναι η πολυπλοκότητα του συστήματος ελέγχου της γωνίας κάθε πτερωτής, καθώς χρησιμοποιούνται υδραυλικά και ηλεκτρομηχανολογικά μέσα για να επιστραφούν τα πτερύγια.

4. Ενεργός έλεγχος απώλειας στήριξης

Η μέθοδος ελέγχου αυτή βασίζεται στην αρχή pitch όμως χρησιμοποιεί το σύστημα stall το οποίο δίνει την ικανότητα απώλειας της αεροδυναμικής στήριξης. Με τον συνδυασμό αυτό επιτυγχάνεται ευελιξία για ταχύτερο και πιο αποτελεσματικό φρενάρισμα σε κατάσταση κινδύνου και πιο ομαλές εκκινήσεις. Βάσει του συστήματος που αναφέρθηκε όταν η ταχύτητα ανέμου είναι πάνω από την ονομαστική, η γωνία pitch μεταβάλλεται αντίθετα ώστε να αποκοπεί ομαλά η περίσσεια αεροδυναμικής ισχύος και να περιοριστεί επίσης η παραγόμενη ενέργεια. Τα πλεονεκτήματα εντοπίζονται στον καλύτερο έλεγχο της αυξομείωσης ταχύτητας και στην μικρότερη καταπόνηση των μελών της Α/Γ. Τέλος, είναι εξαιρετικά χρήσιμο σε δύσκολες καταστάσεις που χρήζει να σταματήσει η λειτουργία της ανεμογεννήτριας αλλά και σε ομαλές εκκινήσεις.

5. Ηλεκτρονικός έλεγχος:

Το σύστημα αυτό εφαρμόζεται σε συστήματα μεταβλητών στροφών. Για την εφαρμογή τους χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικά ισχύος που διαχειρίζονται μεγάλα ποσά ισχύος. Οι πιο διαδεδομένες και γνωστές συσκευές είναι οι συστοιχίες πυκνωτών, ο μετατροπέας (AC/DC/AC converter) και τα ηλεκτρονικά ελεγχόμενος εκκινητής (soft starter). Αναλυτικότερα:

6. Συστοιχίες πυκνωτών:

Οι συστοιχίες τοποθετούνται στη βάση του πύργου των ανεμογεννητριών και κατά κύριο λόγο σε ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας. Κυριότερο χαρακτηριστικό τους είναι να απορροφούν την άεργο ισχύ από το σύστημα ώστε να μην την απορροφά η γεννήτρια κατά τη λειτουργία της.

7. Μετατροπέας (ac/dc-dc/ac converter):

Βασικότερο χαρακτηριστικό του μετατροπέα είναι ότι λόγω των υψηλών διατοπικών συχνοτήτων του προκαλεί μεγάλη μείωση της επίδρασής τους στο δίκτυο παρά την υψηλή διακοπτική συχνότητα. Πιο αναλυτικά, τα στοιχεία που αποτελείται είναι μία εξαπαλμική γέφυρα με IGBT. Τοποθετούνται 2 μετατροπείς back-to-back, που συνδέονται με μια dc-διασύνδεση. Ανάμεσα στους μετατροπείς παρεμβάλλεται ένας πυκνωτής, Διαθέτει μια χρησιμότητα αποσύνδεσης ελέγχου τόσο στην πλευρά της μηχανής όσο και στην πλευρά του δικτύου. Ένα πλεονέκτημα των μετατροπέων είναι ότι μπορούν να λειτουργούν τόσο ως ανορθωτές όσο και ως μετατροπείς. Αυτό σημαίνει ότι είναι δυνατή η αμφίδρομη μεταφορά ισχύος και μπορεί να ελεγχθεί η ενεργός και η άεργος ισχύς.

8. Ηλεκτρονικά ελεγχόμενος εκκινητής (soft starter):

Χρησιμοποιείται σε Α/Γ σταθερών στροφών με τη διευκόλυνση της σύνδεσής τους στο δίκτυο. Η επιθυμητή επίτευξη είναι η μείωση των μεταβατικών καταστάσεων που οδηγούν σε μεταβατικά ρεύματα και έπειτα και διαταραχές του δικτύου. Εάν τεθεί εκτός λειτουργίας τότε το δίκτυο μπορεί να επιφορτιστεί με σοβαρή υπέρταση. Αποτελείται από ζεύγη θυρίστωρ τα οποία είναι τοποθετημένα αντιπαράλληλα τα οποία είναι υπεύθυνα για τον ομαλή ένταξη της ανεμογεννήτριας στο δίκτυο αφού έχει πρώτα ρυθμιστεί σωστά η κατάλληλη γωνία έναυσης. Μετά την μεταβατική διαδικασία ο εκκινητής παρακάμπτεται ώστε να μην υπάρχουν επιπλέον απώλειες.

2.5 Περιβαλλοντική επίπτωση

Η αιολική ενέργεια όπως είδαμε είναι μια από τις πιο αναπτυσσόμενες και καλύτερες μεθόδους ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τα οφέλη είναι αρκετά κυρίως οικονομικά και ο άνθρωπος τα εκμεταλλεύεται.

Στην αντίπερα, υπάρχουν και οικολογικές επιπτώσεις στην παρεμβολή του περιβάλλοντος και στην εκμετάλλευσή του από τον άνθρωπο. Συχνά τα προβλήματα είναι σημαντικά και κάποιες άλλες φορές λιγότερο. Κάποιες από τις επιπτώσεις

φαίνεται να είναι ο θόρυβος, η αλλοίωση του τοπίου, διάφορες διαταραχές στην χλωρίδα, την πανίδα και τη ζωή των πτηνών. Αναλυτικότερα:

1. Θόρυβος:

Ο θόρυβος που παράγεται κατά τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας διακρίνεται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία είναι ο μηχανικός θόρυβος, ο οποίος παράγεται από τον ηλεκτρικό και μηχανικό εξοπλισμό. Ο περιορισμός του καλύπτεται με τη χρήση κιβωτίου ταχυτήτων. Η δεύτερη κατηγορία είναι ο αεροδυναμικός θόρυβος. Ο αεροδυναμικός θόρυβος οφείλεται στην αλληλεπίδραση των πτερυγίων με την ροή του αέρα. Όσο υψηλότερη είναι η ταχύτητα του αέρα, τόσο μεγαλύτερος είναι και ο θόρυβος που προκαλείται, γι' αυτό και πλέον οι ανεμογεννήτριες δουλεύουν σε χαμηλές ταχύτητες περιστροφής πτερυγίων.

2. Αλλοίωση τοπίου:

Η αλλοίωση του τοπίου από μία ανεμογεννήτρια ή από ένα αιολικό πάρκο καθορίζεται από το μέγεθος και την πυκνότητα των ανεμογεννητριών. Οι κάτοικοι της ευρύτερης περιοχής συμβάλλουν με τη στάση τους απέναντι στην κατασκευή καθώς και εκείνοι καθορίζουν τον τόπο και το μέγεθος του πάρκου.

3. Επιπτώσεις στη χλωρίδα και την πανίδα:

Η επιρροή των πάρκων στην χλωρίδα και την πανίδα είναι μεγάλη. Ο βίοτοπος πολλών μικρών ζώων και εντόμων μετατοπίζεται ή καταστρέφεται κατά τη φάση της κατασκευής και εγκατάστασης των μηχανών. Για την μεταφορά και την εγκατάσταση των κατασκευών απαιτείται άνοιγμα δρόμων και διαμόρφωση του τόπου για την εγκατάσταση των πάρκων. Οι εργασίες διαρκούν για σχετικά μικρό διάστημα, κι έτσι η ζωή μπορεί να προσαρμοστεί γρήγορα στις νέες αλλαγές. Τέλος, συγκριτικά με ολόκληρη την έκταση των πάρκων, μόνο ένα μικρό κομμάτι δεν είναι διαθέσιμο προς

χρήση, οπότε το υπόλοιπο εκμεταλλεύεται για το τάισμα των ζώων και την βελτίωση της ζωής τους.

4. Διατάραξη στη ζωή των πτηνών:

Οι ανεμογεννήτριες αποτελούνται από ψηλούς πύργους και μακριά πτερύγια, γι' αυτό και αποτελούν κίνδυνο σύγκρουσης με τα διερχόμενα πουλιά. Σύμφωνα όμως με ορνιθολόγους είναι δύσκολο να βγει ακέραιο συμπέρασμα για την θνησιμότητα των πτηνών, καθώς φαίνεται ότι τα μεγαλύτερα αρπακτικά πουλιά επηρεάζονται περισσότερο. Ωστόσο φαίνεται ότι σύμφωνα με μελέτες οι θάνατοι πτηνών ετησίως από συγκρούσεις με κτίρια, γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, οχήματα, κυνήγι ή ακόμα και γάτες, είναι μεγαλύτεροι από αυτούς με σύγκρουση σε ανεμογεννήτρια. [7]

Κεφάλαιο 3: Αιολικά πάρκα

Με απώτερο σκοπό την μέγιστη εκμετάλλευση της ισχύος του ανέμου γίνεται με συστοιχίες ανεμογεννητριών τα οποία ονομάζονται αιολικά πάρκα. Λειτουργούν σαν μία ολοκληρωμένη μονάδα και τοποθετούνται σε μέρη με υψηλό αιολικό δυναμικό. Τα αιολικά πάρκα χωρίζονται σε κατηγορίες, ανάλογα με τον τόπο που είναι τοποθετημένες και πιο συγκεκριμένα, χωρίζονται σε: χερσαία, θαλάσσια ή υπεράκτια και παράκτια[11]

1. **Χερσαία αιολικά πάρκα:** Τα χερσαία αιολικά πάρκα εγκαθίσταται σε περιοχές με μεγάλο υψόμετρο, όπως κορυφές βουνών, τουλάχιστον 3 χιλιόμετρα από την κοντινότερη ακτογραμμή. Σε μέρη χερσαία με μεγάλο υψόμετρο, μπορούν να αναπτυχθούν ταχύτητες ανέμων που είναι ωφέλιμες για την απόδοση της ανεμογεννήτριας. Κάποιες φορές όμως, υπάρχουν θυελλώδεις άνεμοι που ρίχνουν κατακόρυφα την απόδοση της ανεμογεννήτριας διότι ξεπερνούν κατά πολύ την ονομαστική τιμή της ταχύτητας του ανέμου που είναι ρυθμισμένη να αντέχει. Παρόλα αυτά, είναι η περίπτωση με την πιο φθηνή και απλούστερη εγκατάσταση από υλικό και τεχνολογικό εξοπλισμό.
2. **Θαλάσσια ή Υπεράκτια αιολικά πάρκα:** Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα είναι τοποθετημένα και εγκατεστημένα μέσα τη θάλασσα, με την ελάχιστη απόσταση από την ακτή να είναι 10 χιλιόμετρα. Ο λόγος της ανάπτυξης υπεράκτιων πάρκων ήταν η κάλυψη του χώρου στα χερσαία κομμάτια με ανεμογεννήτριες. Οι άνεμοι που πνέουν στη θάλασσα βοηθούν στην αύξηση της απόδοσης του συστήματος καθώς έχουν μεγάλη ταχύτητα. Το πιο σημαντικό όμως με τον άνεμο στη θάλασσα είναι η σταθερότητα στις διακυμάνσεις και η ομοιομορφία που παρουσιάζει. Οι άνθρωποι εκμεταλλευόμενοι αυτή τη συνθήκη είναι δυνατό να παρουσιάσουν αποδόσεις έως και 30%. Στην αντίποδα, η μεταφορά, η εγκατάσταση, η στήριξη και η συντήρηση των ανεμογεννητριών είναι διαδικασίες πολύ κοστοβόρες και χρονοβόρες, καθώς εμπεριέχουν και υψηλό δείκτη επικινδυνότητας.
3. **Παράκτια αιολικά πάρκα:** Οι συνθήκες είναι παρόμοιες με τα υπεράκτια αιολικά πάρκα. Αναπτύσσονται υψηλές ταχύτητες ανέμου λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ ξηράς και θάλασσας. Οι εγκατάσταση και η μεταφορά είναι το ίδιο περίπλοκη και δύσκολη με τα υπεράκτια πάρκα. Η

διαφορά τους εντοπίζεται στον τόπο εγκατάστασης που είναι μικρότερη των 3 χιλιομέτρων από την ακτογραμμή και μικρότερη των 10 χιλιομέτρων από τη θάλασσα.

3.1 Απαιτήσεις αιολικού πάρκου

Οι ανεμογεννήτριες και κατ' επέκταση τα αιολικά πάρκα αντιμετωπίζουν προβλήματα στην ενσωμάτωση τους στα συμβατικά δίκτυα. Το πρόβλημα εντοπίζεται στην διαφοροποίηση και την μη συγχρονισμό στην αλληλεπίδραση του αιολικού πάρκου με το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Η διαρκής μεταβολή του ανέμου και η δυσκολία πρόβλεψης και αντιμετώπισης των διακυμάνσεων της ταχύτητας, είναι το κύριο πρόβλημα της σύνδεσης με το δίκτυο. Τα παλαιότερα χρόνια όταν οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας από ανεμογεννήτριες δέχονταν μεταβατικά φαινόμενα, αποκλείονταν από το δίκτυο ώστε να μην έχουν αρνητική επίδραση στο δίκτυο. Κάτι τέτοιο σήμερα θα ήταν καταστροφικό για το δίκτυο αφού θα προκαλούσε μεγάλες διαταραχές στο ισοζύγιο παραγωγής. Τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί αρκετά η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τα αιολικά πάρκα. Ως εκ τούτου, δίνεται μεγάλη προσοχή στην αλληλεπίδραση μεταξύ των πάρκων και του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να διασφαλίζεται η ομαλή και ασφαλής λειτουργία των πάρκων και του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.

Συχνά προκύπτουν αρκετά προβλήματα και μετά την σύνδεση με το δίκτυο. Τα κυριότερα αφορούν την συχνότητα και την τάση, όπως για παράδειγμα την ανύψωση και τη βύθιση τάσης.

Διακύμανση Συχνότητας: Διακύμανση στη συχνότητα προκαλείται κυρίως όταν υπάρχει ανισορροπία στην προσφορά και τη ζήτηση ενέργειας. Οι διακυμάνσεις στην ταχύτητα του ανέμου προκαλούν της παραγόμενης ενεργού ισχύος μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τη συχνότητα. Διαταραχές προέρχονται από την αλλαγή ταχύτητας περιστροφής των πτερυγίων και είναι ανάλογες του μεγέθους του ηλεκτρικού συστήματος αλλά και της τιμής του ανέμου. Μπορούν να υιοθετηθούν αρκετά μέτρα πρόληψης ή αντιμετώπισης με το πιο αποτελεσματικά να είναι η αύξηση της εφεδρικής χωρητικότητας, η χρήση ηλεκτρονικών ισχύος για τον έλεγχο, συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και περιορισμό στην ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων.

Διακυμάνση Τάσης: Διακυμάνσεις στην τάση προκαλούνται με την μεταβολή της ισχύς που εισάγεται ή καταναλώνεται από τα αιολικά πάρκα, με σκοπό την διασύνδεση τους με το δίκτυο σε κάποιο κόμβο σύνδεσης. Σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η τεχνολογία και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών. Μεγάλες διακυμάνσεις σχηματίζονται όταν υπάρχει ασθενές δίκτυο. Πλέον, Οι ανεμογεννήτριες είναι εξοπλισμένες με σύγχρονες γεννήτριες, οι οποίες μπορούν να ελέγχουν την άεργο ισχύ διεγείροντας τη γεννήτρια. Τέλος, είναι εξοπλισμένες με ρυθμιστές του συντελεστή ισχύος για τον έλεγχο της εισροής και της απορρόφησης της άεργου ισχύος, διαφορετικά χρησιμοποιείται μια συστοιχία πυκνωτών για τον ίδιο σκοπό.

Η βύθιση τάσης προκαλείται από σφάλμα στο δίκτυο ή μεταγωγή φορτίων. Κατά τη διάρκεια του σφάλματος δεν πραγματοποιείται αποσύνδεση της αιολικής εγκατάστασης και δεν καταναλώνεται ενεργός ή άεργος ισχύς στη σημείο εγκατάστασης. Οι ίδιοι κανόνες ισχύουν και χρησιμοποιούνται για την αποκατάσταση βλαβών και την αποκατάσταση της τάσης. Για να αποφευχθούν οι αποσυνδέσεις των ανεμογεννητριών, μπορούν να εγκατασταθούν συσκευές στατικής αντιστάθμισης (STACOM) στους κόμβους που εισάγουν την αιολική ενέργεια που παράγεται από το αιολικό πάρκο. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται πιθανά σφάλματα μεταξύ εξαρτημάτων μεταξύ του αιολικού πάρκου και του υποσταθμού όπου γίνεται η σύνδεση.

Οι απότομες άνοδοι παρόλου που διαρκούν μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου μπορούν να προκαλέσουν έντονες ταλαντώσεις. Οι αυξήσεις τάσης προκαλούνται από το άνοιγμα και το κλείσιμο των διακοπών για την ατμοσφαιρική εκφόρτιση ή από την εκκίνηση και τη διακοπή των ανεμογεννητριών σε αιολικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ανάλογα με το μέγεθος και τη διάρκεια της αύξησης της τάσης, τα ηλεκτρονικά συστήματα των ανεμογεννητριών ενδέχεται να επηρεαστούν, εάν δεν είναι εξοπλισμένα με διατάξεις προστασίας από υπερτάσεις.

Για τα παραπάνω προβλήματα τίθενται απαιτήσεις για την ενσωμάτωση των αιολικών σταθμών στο δίκτυο για να είναι αποτελεσματικά. Αυτές ονομάζονται Οδηγίες Σύνδεσης και αποτελούν τις κοινές απαιτήσεις που είναι ανάγκη να τηρούνται για την ομαλή ένταξη του πάρκου στο δίκτυο, και είναι οι παρακάτω:

1. Να υπάρχει ανοχή στις βυθίσεις τάσης και σωστή αντίδραση μετά το σφάλμα αλλά και κατά τη διάρκεια αυτού

2. Έλεγχος συχνότητας και ενεργού ισχύος
3. Έλεγχος τάσης και αέργου ισχύος
4. Ανώτατες τιμές τάσης και συχνότητας
5. Ζητήματα που αφορούν τεχνικά χαρακτηριστικά και διαδικαστικά χαρακτηριστικά

Κεφάλαιο 4: Μοντελοποίηση συστήματος ανεμογεννήτριας

4.1. Επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας (DFIG)

Οι επαγωγικές γεννήτριες διπλής τροφοδότησης (DFIG) αποτελούνται από μια τοροειδή επαγωγική γεννήτρια με ένα τύλιγμα στάτη συνδεδεμένο απευθείας στο δίκτυο και ένα τοροειδές τύλιγμα συνδεδεμένο στο δίκτυο μέσω ενός μετασχηματιστή back-to-back που επιτρέπει την αμφίδρομη ροή ισχύος.

Η διπλή τροφοδοσία οφείλεται στο γεγονός ότι η τάση του στάτη τροφοδοτείται από το δίκτυο και η τάση του διαιρέτη από τον μετασχηματιστή ισχύος, επιτρέποντας τη μεταβολή της τάσης σε ένα ευρύ φάσμα.

Παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα του προσδιορισμού των συνθηκών λειτουργίας εξομάλυνσης-κανονικής και μη εξομάλυνσης του DFIG με βάση το πλάτος τάσης κάθε φάσης ενός τριφασικού συστήματος:

1. με τον έλεγχο του συντελεστή ισχύος, ελέγχεται η ενεργός ισχύς και η άεργη του στάτη,
2. σταθερή τάσης και συχνότητα,
3. μικρότερες φθορές και μηχανικές καταπονήσεις,
4. οι μετατροπείς απαιτούν μικρότερη ονομαστική ισχύς, και
5. ανάλογη μεταβολή της ταχύτητας του δρομέα βάσει της ταχύτητας του ανέμου

Βέβαια εκτός των πλεονεκτημάτων υπάρχουν και μειονεκτήματα, όπως είναι ο έλεγχος και η συντήρηση των ψηκτρών/δαχτυλιδιών, λόγω της φθοράς, και η κατασκευή ενός κυκλώματος αυξημένης προστασίας μετατροπέων για τις περιπτώσεις σφαλμάτων.

4.2 Καταστάσεις λειτουργίας DFIG

4.2.1 Ομαλή λειτουργία

[10] Η μοντελοποίηση της DFIG και οι διάφοροι τύποι που περιγράφουν τις παραμέτρους της βασίζονται στο σύστημα αναφοράς του στάτη. Επομένως, όλες οι παράμετροι ροπής υπολογίζονται με βάση αυτό το σύστημα αναφοράς. Οι τάσεις του τριφασικού δικτύου εκφράζονται με βάση το σταθερό διάνυσμα πλάτους της τάσης του δικτύου V_g είναι:

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

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

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

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

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

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

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

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

Στα πλαίσια αναφοράς του στάτη και του δρομέα Οι εκθέτες s και r δηλώνουν την ανάλυση του διανύσματος χώρου, ενώ οι δείκτες s και r δηλώνουν τον στάτη και τον προσδιοριστή αντίστοιχα. Έτσι, κατά την κανονική λειτουργία της γεννήτριας, το διάνυσμα χώρου της τάσης στάτη, το οποίο περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα ω_s , δίνεται από την εξής σχέση:

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

Η ροή του στάτη υπολογίζεται με βάση τη σχέση μεταξύ των εξισώσεων (4.4) και (4.8), λαμβάνοντας υπόψη ότι η αντίσταση R_s του στάτη είναι πολύ μικρή και δεν λαμβάνεται υπόψη:

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

Στο στάτη το χωρικό διάνυσμα της ροής του έχει σταθερό πλάτους, το οποίο είναι ανάλογο με την τάση του δικτύου και αντιστρόφως ανάλογο με τη σύγχρονη ταχύτητα, περιστρέφεται με σύγχρονες ταχύτητες περιστροφής. Επιπλέον, η ροή του στάτη προκαλεί αλλαγή στη διαμήκη ροή του σπαθιού. Η τάση του βραχίονα δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

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

Αυτή η τάση είναι ανάλογη της ολίσθησης, δηλαδή της διαφοράς ανάμεσα στη σύγχρονη ταχύτητα και την ταχύτητα του δρομέα. Το πλάτος της τάσης του δρομέα εκφράζεται ως συνάρτηση του πλάτους της τάσης του δικτύου μέσω της εξής σχέσης:

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

Καθώς οι DFIG χρησιμοποιούνται κυρίως σε περιορισμένες περιοχές ταχύτητας και ολίσθησης, η τάση του μετασχηματιστή θα είναι σημαντικά χαμηλότερη από την τάση του στάτη.

Όταν το DFIG λειτουργεί σωστά, η τάση του δρομέα περιλαμβάνει το ρεύμα που διαρρέει τον μετατροπέα. Αυτό εξασφαλίζει ότι επιτυγχάνονται οι ονομαστικές τιμές ενεργού και άεργου ισχύος. Ως αποτέλεσμα, η τάση του δρομέα παίρνει την ακόλουθη μορφή:

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

Στην εξίσωση, σ είναι ο συντελεστής διαρροής, δηλαδή ο λόγος της συνολικής ροής προς τη ροή που χρησιμοποιείται. Εάν η αντίσταση του δρομέα και ο όρος $\sigma \cdot L_r$ είναι πολύ μικρά, η τάση του δρομέα υπολογίζεται από την εξίσωση (4.12) και παραμένει η

ίδια με την εξίσωση (4.11). Εάν ο δρομέας είναι ανοιχτοκυκλωμένος, το διάνυσμα της τάσης του δρομέα λόγω της ροής του στάτη δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

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

4.3 Βυθίσεις τάσης

4.3.1 Συμμετρικές βυθίσεις τάσης

Για την μελέτη των βυθίσεων τάσης εξετάζεται η ξαφνική πτώση τάσης για τις τρεις φάσεις του δικτύου, με σταθερό πλάτος σε όλες τις φάσεις. Εάν η χρονική στιγμή της πτώσης τάσης είναι $t=t_0$ και η αρχική τιμή της τάσης του δικτύου είναι $V_{pre} = V_g$, η τελική τιμή της τάσης δικτύου θα είναι $V_{fault} = (1 - p) \cdot V_g$. Υπό αυτές τις προϋποθέσεις είναι δυνατός ο υπολογισμός των μεγεθών και των παραμέτρων της γεννήτριας που είναι υπό μελέτη. Άρα, η τάση του στάτη καθορίζεται ως εξής:

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

με p το πλάτος της βύθισης τάσης.

Η ροή σταθερής κατάστασης του στάτη υπολογίζεται:

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

Συνεπώς, η ροή μεταβατικής κατάστασης υπολογίζεται ως εξής:

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

Η συνολική ροή του στάτη θα υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση, εάν και εφόσον, έχει παραμείνει σταθερή η τιμή του πριν και μετά τη βύθιση της τάσης:

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

όπου $\tau_s = L_s / \square$ είναι η σταθερά χρωματισμού του στάτη και p_{so} είναι η αρχική τιμή του φυσικού ρεύματος. Επομένως, η συνιστώσα του ρεύματος στάτη στη μόνιμη

κατάσταση είναι ανάλογη με την αρχική και την τελική τιμή της τάσης στάτη μετά την εξάλειψη του σφάλματος Vf.

4.3.2 Ασύμμετρες βυθίσεις τάσης

Με την ύπαρξη μη ισορροπημένων συστημάτων, αναπτύχθηκε η ανάγκη για την κατανόηση και την επίλυσή τους. Έτσι, η μέθοδος αυτή τα χωρίζει σε τρία ισορροπημένα υποσυστήματα, με την ανάλυση τους σε θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας, και στηρίζονται στην σχέση:

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

Προκύπτει ότι η ανάλυση των τριφασικών συστημάτων θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας, γίνονται μέσω της σχέσης:

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

Στις διπλά τροφοδοτούμενες επαγωγικές γεννήτριες η συνιστώσα μηδενικής ακολουθίας δεν λαμβάνεται υπόψη. Η συνιστώσα θετικής ακολουθίας είναι στρεφόμενη με την ίδια συχνότητα με το δίκτυο και έχει σταθερό πλάτος. Η συνιστώσα αρνητικής ακολουθίας είναι στρεφόμενη με αντίθετη συχνότητα από το δίκτυο. Αντίθετα με τις άλλες δύο η συνιστώσα μηδενικής ακολουθίας δεν επιφέρει καμία ροή στο σύστημα.

Σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας, το άθροισμα της συνιστώσας θετικής ακολουθίας και το άθροισμα της συνιστώσας αρνητικής ακολουθίας, αποτελούν την ροή του στάτη, που υπολογίζονται από τις σχέσεις:

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

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

Οι δύο ροές συμβάλουν με το πλάτος τους ώστε να δημιουργηθεί μια τάση στον δρομέα, που η τελική της τιμή θα είναι:

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

Με τον υπολογισμό των τάσεων θετικής και αρνητικής ακολουθίας από τις σχέσεις:

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

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

Συμπερασματικά, αφού η τιμή ολίσθησης είναι μικρή, η δεύτερη εξίσωση φαίνεται να μπορεί να γίνει έως και διπλάσια κατά τη βύθιση τάσης.

4.3.3 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα

Σε ένα μονοφασικό βραχυκύκλωμα υποθέτουμε ότι βραχυκυκλώνει η φάση α με τη γη, και έτσι η τάση δικτύου θα υπολογιστεί

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

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

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

εάν αναλυθούν οι εξισώσεις V_a και V_c στις συνιστώσες ακολουθίας θα γίνουν:

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

Τελικώς, προκύπτει ότι οι σχέσεις για την τιμή της τάσης θετικής και αρνητικής ακολουθίας είναι οι εξής:

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

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

Εν κατακλείδι, η χειρότερη στιγμή να γίνει ένα μονοφασικό βραχυκύκλωμα σύμφωνα με τους Abad G. [6] και Lopez J. [9] είναι για χρόνο $t=T/4$. Και αυτό γιατί μετά την επίδραση της μονοφασικής βύθισης τάσης στη συγκεκριμένη χρονική στιγμή, η τροχιά της συνιστώσας θετικής και αρνητικής ακολουθίας είναι ελλειπτικές. Οι τροχιές των συνιστωσών είναι εφαπτόμενες η μία με την άλλη, λόγω της επίδρασης της φυσικής ροής. Η έλλειψη θα επανέλθει στο κέντρο της όταν μηδενιστεί η επίδραση της φυσικής ροής.

4.3.4 Διφασικό βραχυκύκλωμα

Ένα διφασικό βραχυκύκλωμα εξελίσσεται ανάμεσα σε δύο φάσεις, μεταξύ a-b ή a-c ή b-c. Η τάση των δύο αυτών φάσεων, μετά το βραχυκύκλωμα θα είναι μειωμένες. Η φάση ο οποία δεν έχει υποστεί βραχυκύκλωμα, μετά το βραχυκύκλωμα θα έχει την ίδια τιμή με πριν. Αν δηλαδή υπάρχει βραχυκύκλωμα στις φάσεις b-c τότε η τάση στη φάση a θα είναι ίδια. Το γεγονός αυτό συμβαίνει λόγω της ισότητας την σύνθετης αντίστασης της θετικής και της αρνητικής ακολουθίας. Οι τάσεις των τριών φάσεων υπολογίζονται από τους εξής τύπους:

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

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

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

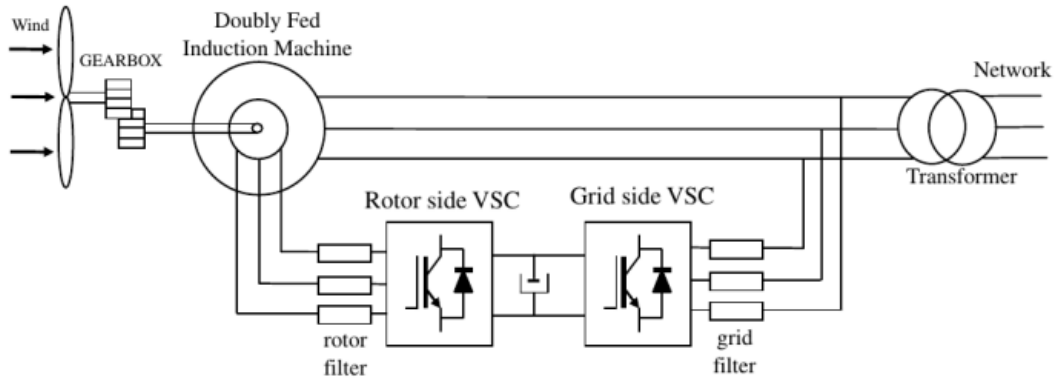
Καταλήγουμε ότι η ανάλυση του τριφασικού συστήματος στη θετική, αρνητική και μηδενική συνιστώσα μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση:

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

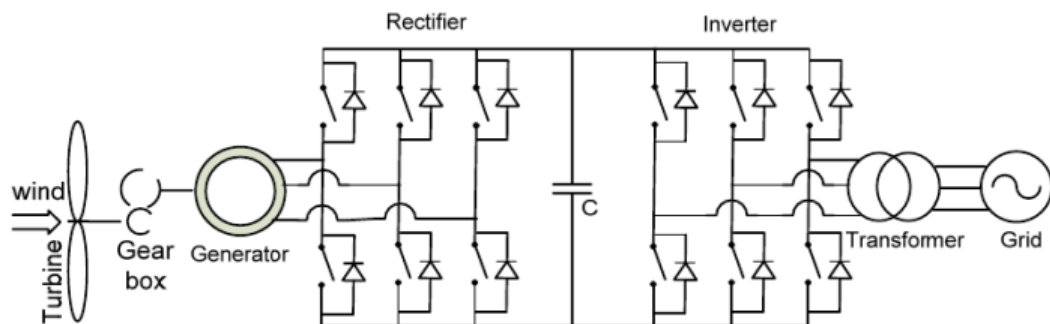
Ειδικότερα, αν αντικαταστήσουμε στην εξίσωση (4.43) τις εξισώσεις (4.25) και (4.26) μπορεί να υπολογιστεί η ροή της θετικής και αρνητικής ακολουθίας, καθώς και με την αντικατάσταση των (4.28) και (4.29) στην (4.43) υπολογίζεται το πλάτος της τάσης θετικής και αρνητικής ακολουθίας σε ένα σύστημα που έχει υποστεί διφασικό βραχυκύκλωμα.

4.4 Μετατροπέας ισχύος DFIG

Με σκοπό την μοντελοποίηση και τη μελέτη των DFIG συστημάτων μελετάται ο μετατροπέας από την πλευρά του δικτύου. Ικανοποιεί τον έλεγχο αέργου ρεύματος και τις απαιτήσεις για σύνδεση στο ελληνικό δίκτυο. Ο τρόπος διασύνδεσης είναι back-to-back converter: [12] [13] [14]



Για τον μετατροπέα ισχύος back-to-back από την πλευρά της μηχανής υπάρχουν δύο μέρη από τα οποία αποτελείται. Το πρώτο είναι από την πλευρά του δρομέα και λειτουργεί ως ανορθωτής τάσης, και το άλλο από την πλευρά του δικτύου που λειτουργεί ως αντιστροφείας πηγής τάσης. Οι μετατροπείς αυτοί συνδέονται μεταξύ τους με έναν πυκνωτή και μία DC σύνδεση, όπου η σύνδεση αυτή προσφέρει τη δυνατότητα να λειτουργήσει ως γεννήτρια σε διαφορετική συχνότητα από αυτή του δικτύου με σκοπό την επίτευξη του σημείου μέγιστης ισχύος. Από την μεριά του ο πυκνωτής πρέπει να διατηρεί σταθερή τάση για την βέλτιστη ισχύς εξόδου. Με την απόζευξη της γεννήτριας και δικτύου πραγματοποιείται ευκολότερα ο έλεγχος κατά τη διάρκεια σφαλμάτων και η μείωση των μεταβατικών φαινομένων.



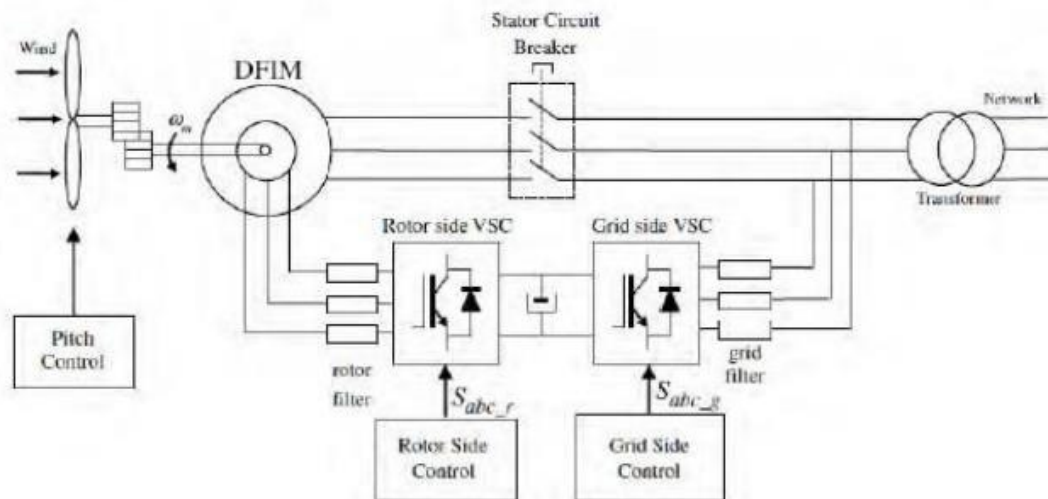
Σχήμα 4.4. Σύστημα back-to-back μετατροπέα της Α/Γ [18]

Η γεννήτρια χρησιμοποιεί έναν δακτυλιοειδή κινητήρα με δακτυλιοφόρο κινητήρα, τα τυλίγματα του οποίου συνδέονται με μετατροπέα AC/DC/AC. Η γωνιακή ταχύτητα είναι ανάλογη της συχνότητας του στάτη και του τυμπάνου και επιτρέπει τη λειτουργία στην περιοχή στροφών του 30% της ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννήτριας. Ο μετατροπέας και οι ελεγκτές είναι τα μέρη που καθορίζουν τη συμπεριφορά της γεννήτριας, κατά την κανονική λειτουργία αλλά και κατά το σφάλμα.

Αποτέλεσμα του ελέγχου αυτού είναι η μείωση των απωλειών και του κόστους, από

την περίπτωση που θα είχε τον πλήρη έλεγχο ο μετατροπέας. Ο κινητήρας παίζει σημαντικό ρόλο ελέγχοντας την άεργο ισχύ και ο ανεξάρτητος έλεγχος του ρεύματος του δρομέα μπορεί να αποσυνδέσει τον έλεγχο της άεργου και της ενεργού ισχύος. Η άεργος ισχύς μπορεί να παραχθεί για την τροφοδοσία του στάτη από έναν αντιστροφέα από την πλευρά του δικτύου με ρυθμιστή συντελεστή ισχύος, χωρίς να συμμετέχει στην ανταλλαγή ισχύος μεταξύ της ανεμογεννήτριας και του δικτύου. Η άεργος ισχύς μπορεί επίσης να καταναλώνεται ή να παράγεται όταν το δίκτυο είναι αδύναμο για τον έλεγχο της τάσης. [13]

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το απλοποιημένο σχήμα μιας DFIM ανεμογεννήτριας. Φαίνεται η back-to-back διάταξη μετατροπέα η οποία συνδέει τον μετατροπέα με το δίκτυο και τον μετατροπέα με τον δρομέα.



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

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

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

Όπου:

L_f : η αυτεπαγωγή του φίλτρου

R_f : η αντίσταση του φίλτρου

V_{ag} , V_{bg} , V_{cg} : τάσεις δικτύου

I_{ag} , I_{bg} , I_{cg} : ρεύματα εξόδου μετατροπέα

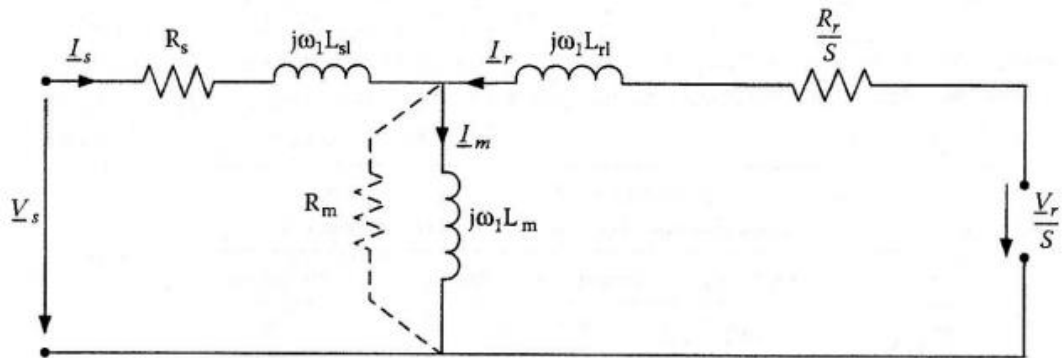
V_a , V_b , V_c : τάσεις εξόδου μετατροπέα

4.4.2 Μετατροπέας από την πλευρά δρομέα

Για τη σύνδεση του δρομέα με την μετατροπέα back-to-back χρησιμοποιείται RSC μετατροπέας, ο οποίος είναι παρόμοιος με αυτόν που χρησιμοποιείται από την πλευρά του δικτύου. Στην πλευρά του δικτύου υπάρχει μετατροπέας που χρησιμοποιεί θυρίστορ, με αρίθμηση συμβατή με τη σειρά αγωγής τους. Αναλυτικότερα, για την πάνω γραμμή S_{a_r} , S_{b_r} , S_{c_r} τα θυρίστορ έχουν ονομασία $D1, D3, D5$ για την ανόρθωση του θετικού μέρους, ενώ αντίστοιχα για κάτω γραμμή $D4, D6, D2$ για την ανόρθωση του αρνητικού μέρους. Για την προστασία της ανεμογεννήτριας ανάμεσα σε δρομέα και μετατροπέα είναι τοποθετημένα ένα φίλτρο και για η σύνδεση των δύο πλευρών του μετατροπέα γίνονται με μία σύνδεση DC με έναν πυκνωτή. Τέλος, ο ρόλος του πυκνωτή αυτού είναι για αποθήκευση ενέργειας και διατήρηση της τάσης σε σταθερά επίπεδα στις απολήξεις του μετατροπέα.

4.5 Ισοδύναμο κύκλωμα της DFIG

Παρακάτω παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα της DFIG με τις απώλειες μαγνήτισης. Απουσιάζουν οι απώλειες πυρήνα και η αντίσταση R_m , συνεπώς παρατίθεται το ισοδύναμο κύκλωμα ασύγχρονης γεννήτριας βραχυκυκλωμένου δρομέα μετά τη βραχυκύκλωση. [12]



Οι εξισώσεις για την περιγραφή των κυκλωμάτων στάτη και δρομέα:

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

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

Εάν πολλαπλασιαστεί η εξίσωση (4.48) με τον λόγο τυλιγμάτων στάτη ή δρομέα θα προκύψει:

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

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

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτουν:

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

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

$$L_{r1} = L_{r1}^r \cdot K_{sr}^2 \quad (4.53)$$

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

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

Με αντικατάσταση της (4.51):

$$\left(\frac{R_r}{s} + j\omega_1 L_{r1}\right)\vec{I}_r - \frac{\vec{V}_r}{s} = \vec{E}_1 \quad (4.56)$$

Μπορεί να υπολογιστεί η ηλεκτρεγερτική δύναμη μετά τον μετασχηματισμό:

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

Τελικώς προκύπτουν:

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

$$\frac{\vec{V}_s}{s} = \frac{R_s}{s} + j \cdot \omega_1 \cdot L_m \cdot \vec{I}_m + j \cdot \omega_1 \cdot L_{r1} \cdot \vec{I}_r \quad (4.59)$$

Οι ροές του δρομέα και του στάτη:

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

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

Με $L_s = L_{s1} + L_m$ και $L_r = L_{r1} + L_m$ θα γίνουν:

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

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

Η ενεργός ισχύς της μηχανής θα είναι:

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

Και η άεργος ισχύς θα είναι:

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

Συμπερασματικά, επιβεβαιώνεται ότι ο στάτης και ο δρομέας προκαλεί τον μαγνητισμό της γεννήτριας.

4.6 Απώλειες μαγνήτισης

Σε συνηθισμένες επαγωγικές μηχανές όταν μειωθεί η τιμή της ροής, τότε είναι εφικτό να μειωθεί και η μαγνήτιση σε χαμηλά φορτία. Το γεγονός αυτό είναι απόρροια της σύνδεσης του στάτη στο δίκτυο με έναν μετατροπέα. Αντίθετα, αυτό δεν μπορεί να συμβεί με τις DFIG, καθώς ο στάτης συνδέεται απευθείας με το δίκτυο και το ρεύμα διατηρείται σταθερό λόγω της σταθερής τάσης του δικτύου. Παρουσιάζονται μερικοί τρόποι για μείωση των απωλειών μαγνήτισης: [12] [13]

- Σε κατάσταση λειτουργίας με χαμηλές ταχύτητες, βραχυκυκλώνεται ο στάτης με σκοπό να μεταφερθεί η ισχύς μέσω του μετατροπέα στον δρομέα. Ένας

διακόπτης αποσυνδέει τη γεννήτρια από το δίκτυο και ένας άλλος διακόπτης βραχυκυκλώνει τον στάτη της γεννήτριας. Με αυτόν τον τρόπο η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια με κλωβό βραχυκυκλώματος, αλλά ο μετασχηματιστής δεν συνδέεται πλέον με τον στάτη αλλά με τον μετασχηματιστή, κι έτσι η τιμή της ροής μειώνεται σε χαμηλές ταχύτητες.

- Σε χαμηλές ταχύτητες συνδέονται τα τυλίγματα του στάτη σε σε τρίγωνο, ενώ στις υψηλές ταχύτητες σε αστέρα. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, αρχικά μηδενίζεται η ισχύς της γεννήτριας και στη συνέχεια με έναν διακόπτη αποσυνδέεται ο στάτης από το τρίγωνο. Πραγματοποιείται η αλλαγή συνδεσμολογίας των τυλιγμάτων και η γεννήτρια συγχρονίζεται ξανά.

4.7 Έλεγχος διανυσματικός DFIG

Η καλύτερη μέθοδος για τον έλεγχο της ταχύτητας και της θέσης των ανεμογεννητριών σε όλο το εύρος ταχυτήτων είναι η τεχνολογία διανυσματικού ελέγχου. Η τεχνολογία διανυσματικού ελέγχου επιτρέπει, μεταξύ άλλων, ακριβέστερη και καλύτερη επιτάχυνση και επιβράδυνση των ανεμογεννητριών, καθώς η μηχανή μπορεί να ελεγχθεί ως μηχανή συνεχούς ρεύματος.

4.7.1 Μοντέλο μετασχηματισμού Park

Στις μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος, οι παρούσες ποσότητες μεταβάλλονται με το χρόνο και αναπαρίστανται ως διανύσματα στο χώρο και το χρόνο στο μιγαδικό επίπεδο. Τα διανύσματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τα περιστροφικά και τα σταθερά, που καθορίζονται σε κάθε περίπτωση από το σύστημα αναφοράς του άξονα που χρησιμοποιείται- για να αναφερθεί το μοντέλο διανύσματος d-q της DFIG, πρέπει επίσης να αναφερθεί ο μετασχηματισμός Park. Η επιλογή αυτή οδηγεί σε ένα σημαντικό πλεονέκτημα: οι εξισώσεις του μοντέλου απλοποιούνται και τα εναλλασσόμενα μεγέθη του πραγματικού συστήματος μετατρέπονται σε συνεχή μεγέθη, με αποτέλεσμα ένα σύστημα d-q, το οποίο διευκολύνει την εφαρμογή τεχνικών αυτόματου ελέγχου.

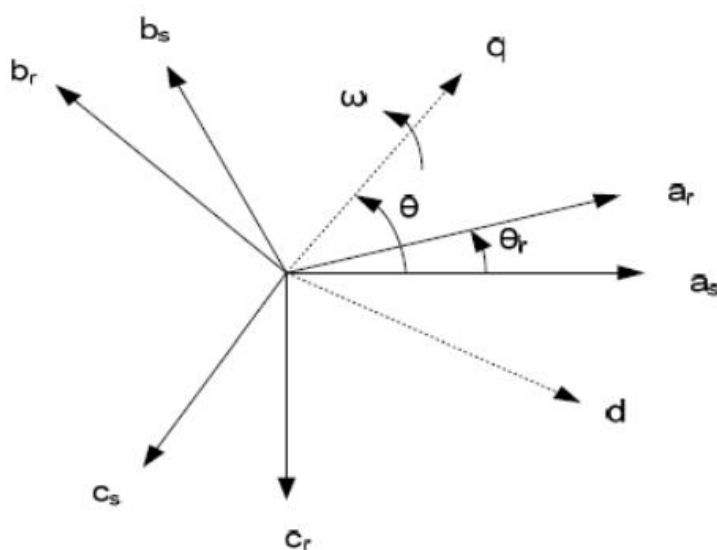
Ο μετασχηματισμός Park θα είναι:

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

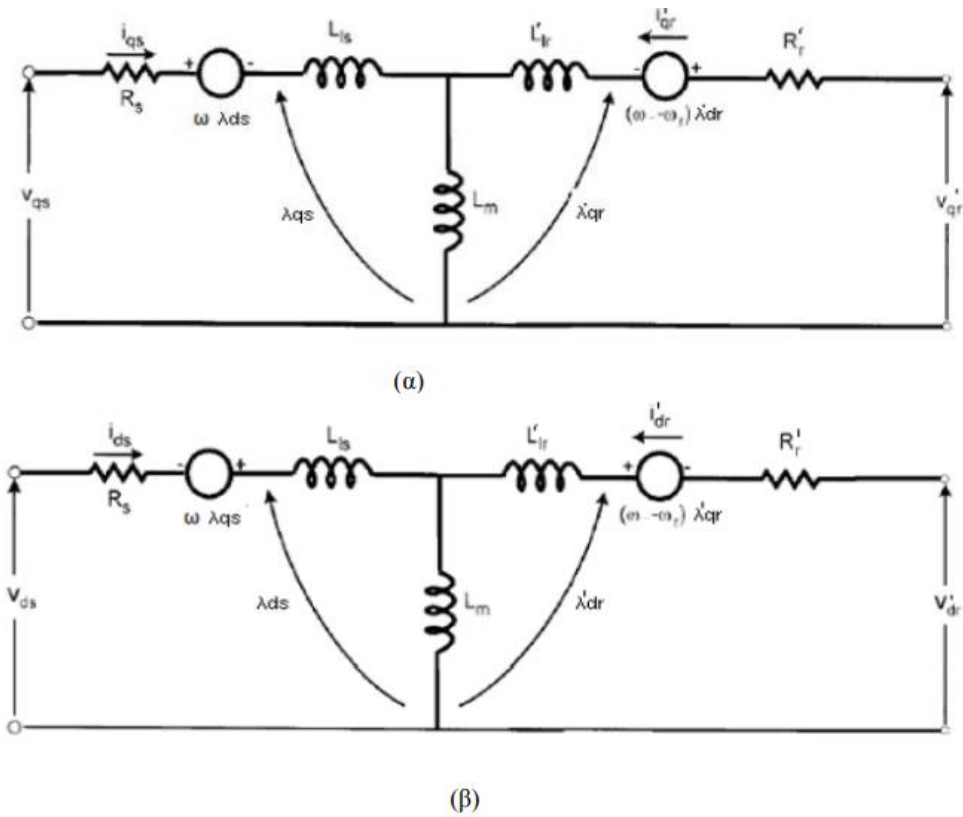
Με αποτέλεσμα η ανάλυση τριφασικού συστήματος στους άξονες d-q να γίνεται με τον πολλαπλασιασμό:

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

Από το παραπάνω σύστημα, παρατηρήστε ότι δεν υπάρχει τρίτος άξονας, γνωστός ως μηδενικός ή μηδενικός άξονας. Αυτός παραλείπεται από τον διανυσματικό έλεγχο επειδή παίρνει μηδενική τιμή για τη συνάρτηση συμμετρίας. Η γωνία που δημιουργείται μεταξύ του άξονα d του νέου συστήματος αναφοράς και του άξονα a του τριφασικού συστήματος ονομάζεται γωνία θ και εμφανίζεται στην εξίσωση (4.71). Η επιλογή της γωνίας θ στον διανυσματικό έλεγχο είναι τέτοια ώστε το νέο σύστημα να περιστρέφεται με σύγχρονη ταχύτητα. οι άξονες d και q είναι κάθετοι μεταξύ τους. ο άξονας d ονομάζεται ορθογώνιος άξονας και ο άξονας q ονομάζεται εγκάρσιος άξονας. Ο άξονας q προηγείται του άξονα d και ο άξονας θ είναι κάθετος στους άλλους δύο άξονες.



Σχήμα 4.9 : Σχηματική απεικόνιση των αξόνων d και q του πλαισίου αναφοράς με αυθαίρετες ταχύτητες περιστροφής [13]



Σχήμα 4.10 : Ισοδύναμο κύκλωμα αξόνων d και q

4.7.2 Μοντέλο d-q στο χώρο κατάστασης

Στο χώρο το μοντέλο d-q της DFIG περιγράφεται ως εξής:

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

Αν αναπτυχθεί η παραπάνω σχέση:

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

Στην παραπάνω σχέση αν αντικατασταθούν τα ρεύματα αντί των ροών στο χώρο κατάστασης τότε το ισοδύναμο μοντέλο θα έχει την εξής μορφή:

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

Από την (4.75) με μετάβαση στις d-q θα προκύψει:

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

Οι εξισώσεις που προαναφέρθηκαν είναι για την αναπαράσταση της DFIG στο χώρο κατάστασης και στο πλαίσιο αναφοράς d-q. Για τις δοσμένες τάσεις εισόδου στάτη και ρόταρα είναι χρήσιμες για την επίτευξη σταθερής κατάστασης. Με τον παρακάτω τύπο υπολογίζεται η ηλεκτρομαγνητική ροπή:

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

4.7.3 Μοντέλο d-q σε στατό πλαίσιο αναφοράς

Θα υπολογιστούν τα μεγέθη σταθερής κατάστασης γνωρίζοντας ότι τα παράγωγα των ροών στη σταθερή κατάσταση ισούται με το μηδέν:

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

Για να καταλήξουμε στις ροές του στάτη και του ρότορα του μοντέλου d-q, θα αντικαταστήσουμε στη σχέση (4.72):

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

Υπολογίζονται τα ρεύματα που περνούν στο στάτη και τον ρότορα με την παρακάτω σχέση αφού είναι γνωστές οι επιβαλλόμενες τάσεις εισόδου στάτη και ρότορα και την ταχύτητα της μηχανής:

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

Η ροπή προκύπτει από:

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

όπου P ο αριθμός των πόλων της μηχανής

4.7.4 Η ισχύς του μοντέλου d-q

Η ενεργός και η άεργος ισχύς θα έχουν την εξής μορφή για το μοντέλο d-q:

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

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

Η ισχύς είναι ανεξάρτητη από την κατάσταση του πλαισίου αναφοράς της μηχανής. Άρα, από τις εξισώσεις βγαίνουν οι εξισώσεις υπολογισμού της ισχύος του στάτη και του δρομέα:

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

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

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

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

Συμπερασματικά, οι ολικές ισχύς της μηχανής προκύπτουν:

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

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

4.8 Σύστημα ελέγχου της DFIG

Με την παρακολούθηση της συμπεριφοράς της ανεμογεννήτριας σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας αλλά και κατά την διάρκεια της βύθισης τάσης πραγματοποιείται ο έλεγχος της DFIG. Από την συλλογή των αποτελεσμάτων, είναι δυνατό να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα που προκλήθηκαν από τις διαταραχές της τάσης ή τις απότομες αλλαγές της ταχύτητας του ανέμου. Οι μεταβολές και οι διαταραχές που δέχεται μία ανεμογεννήτρια ποικίλουν, όπως αρμονικές, βυθίσεις τάσης, όμως υπάρχει απόλυτη εξάρτηση από το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Η πιο συχνή διαταραχή είναι η βύθιση τάσης, η οποία μπορεί να προκαλέσει σημαντικές διαταραχές όπως αποσυνδέσεις της ανεμογεννήτριας. Για να εξαλειφθεί αυτό το πρόβλημα προστίθενται προστατευτικά στοιχεία όπως σύστημα πέδησης των πτερυγίων ή μόχλοι.

4.8.1 Σύστημα ελέγχου από την πλευρά του δρομέα (RSC)

Είναι ένα σύστημα ελέγχου του Μετατροπέα από την πλευρά του ρότορα κατά τη διαδικασία ελέγχου της συμπεριφοράς της ανεμογεννήτριας στις συνθήκες λειτουργίας των υπερσύγχρονων στροφών και την απόδοση του μέγιστου σημείου κέρδους ισχύος. Αυτό το σύστημα ελέγχου είναι αρμόδιο για τον έλεγχο και την παρακολούθηση της χαρακτηριστικής ταχύτητας δύναμης κάθε στροβίλου ανεμοστροβίλων. Ο ενεργός και άεργος Έλεγχος ισχύος πραγματοποιείται μέσω του ρεύματος στον ρότορα. Ο

μετατροπέας στην πλευρά του ρότορα λειτουργεί σε ένα σύστημα συντεταγμένων D-q που κατευθύνεται προς τη ροή του στάτορα, λαμβάνοντας υπόψη ότι ένα συστατικό είναι κάθετο στη ροή του στάτορα και ένα συστατικό είναι παράλληλο με τη ροή του στάτη.

Έλεγχος της ενεργού και της άεργου ισχύος

Η τάση του ευθέως άξονα είναι:

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

εναλλακτικά ως:

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

Η R_s είναι αμελητέα και θα ισχύει $V_{ds} = 0$. Επίσης, ισχύουν:

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

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

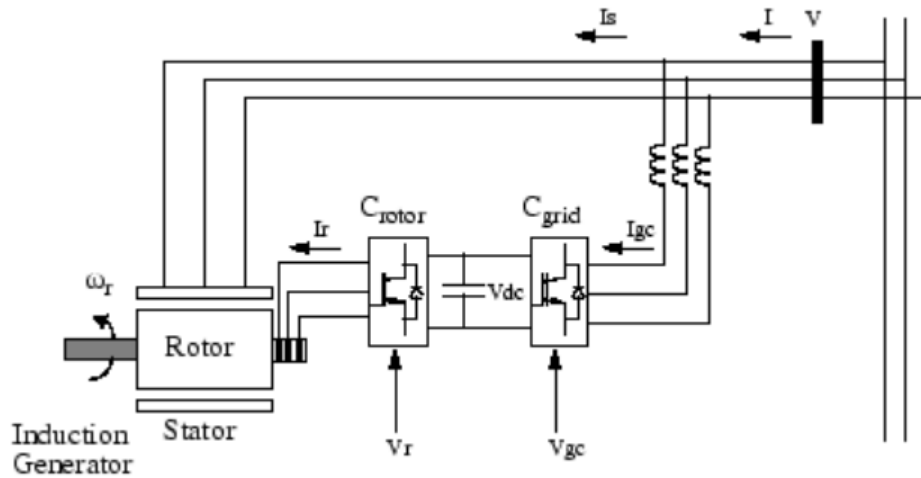
Επομένως, υπολογίζεται η ενεργός ισχύς:

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

η οποία εξαρτάται αποκλειστικά από τη συνιστώσα q και είναι ανάλογη της συνιστώσας ρεύματος q του ρεύματος του κηφήνα. Ομοίως, η άεργος ισχύς υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

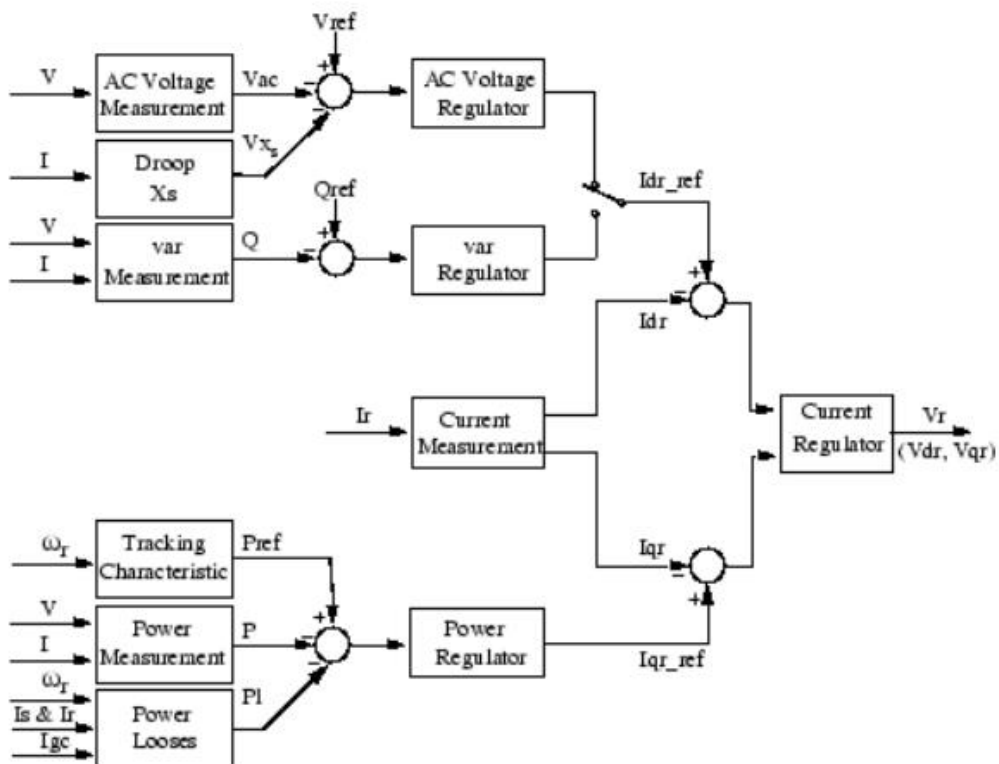
$$Q_s = \frac{3}{2} (V_{qs} I_{ds} + V_{ds} I_{qs}) \xrightarrow{R_s \approx 0, (4.4)} Q_s = \frac{3}{2} V_{qs} \cdot \frac{\psi_{ds} - L_m \cdot I_{dr}}{L_s} \quad (4.95)$$

Στο παρακάτω σχήμα (4.15) παρουσιάζονται οι ροές των ρευμάτων από το δίκτυο προς στην ανεμογεννήτρια:



Σχήμα 4.15 Ροή ρευμάτων από το δίκτυο στην ανεμογεννήτρια

Στο επόμενο σχήμα (4.16) φαίνεται το σύστημα ελέγχου που χρησιμοποιήθηκε για την διεκπεραίωση της εργασίας:

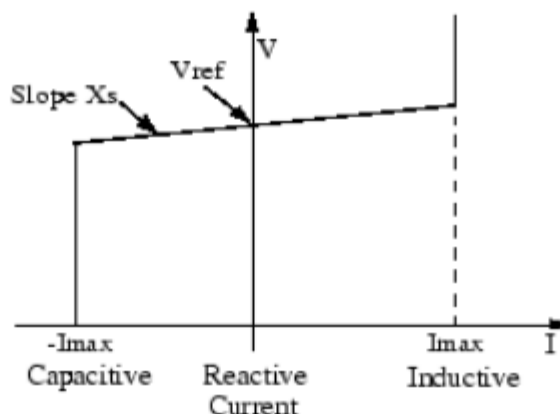


Σχήμα 4.16 Σύστημα ελέγχου του μετατροπέα από τη πλευρά του δρομέα

Με τη χρήση ενός ελεγκτή PI, οι ενεργές τιμές εξόδου που λαμβάνονται από τους ακροδέκτες του δικτύου της ανεμογεννήτριας ελέγχονται, προστίθενται στις συνολικές απώλειες και συγκρίνονται με τη χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-ταχύτητας. Το ρεύμα αναφοράς του δρομέα I_{qr_ref} λαμβάνεται από την έξοδο του ελεγκτή PI και εγχέεται στον δρομέα από τον αντιστροφέα. Ένας δεύτερος ελεγκτής PI χρησιμοποιείται για τη σύγκριση του ρεύματος θετικής ακολουθίας I_q με το I_{qr_ref} προκειμένου να μειωθούν τα σφάλματα. Η έξοδος του δεύτερου ελεγκτή PI αποδίδει την τάση V_{qr} που παράγεται από τον αντιστροφέα- ο ελεγκτής PI τροφοδοτείται με έναν εμπρόσθιο όρο για την πρόβλεψη της τάσης V_{qr} .

Έλεγχος της τάσης της Α/Γ που χρησιμοποιείται

Με τη χρήση της ανεμογεννήτριας υπάρχει η δυνατότητα για δύο ρυθμίσεις. Η μία ρύθμιση είναι της τάσης και η άλλη της αέργου ισχύος. Όταν είναι σε κατάσταση ρύθμισης της τάσης, για τον έλεγχο χρησιμοποιείται η χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος.



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

Τα συμπεράσματα από το σχήμα (4.17) είναι ότι όσο το άεργο ρεύμα παραμένει εντός των I_{max} , I_{max} , η τάση ρυθμίζεται ώστε να παραμένει κοντά στην τιμή τάσης αναφοράς V_{ref} . Παρ'όλα αυτά, χρησιμοποιείται πτώση τάσης (περίπου 1% έως 4% της μέγιστης παραγόμενης αέργου ισχύος), ώστε να έχει η χαρακτηριστική την κλίση του σχήματος. Η χαρακτηριστική υπολογίζεται επίσης και από την εξίσωση:

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

Η ανεμογεννήτρια ελέγχεται από τη ρύθμιση αέργου ισχύος και μέσω ενός ρυθμιστή αέργου ισχύος, η αέργος ισχύς παραμένει σταθερή. Η έξοδος του ρυθμιστή είναι ίση με το ρεύμα αναφοράς του άξονα d, δηλαδή I_{dr_ref} , το οποίο εγχέεται στον μετατροπέα από τον μετατροπέα. Εκτός από οτιδήποτε άλλο, ο ρυθμιστής χρησιμοποιείται επίσης για τη ρύθμιση της συνιστώσας θετικής ακολουθίας με βάση τις ονομαστικές τιμές. Η έξοδος του ελεγκτή ρεύματος εμφανίζει την τάση στον άξονα d (V_{dr}). Επιπλέον, ο ελεγκτής ρεύματος PI υποβοηθείται από έναν όρο feed-forward για την πρόβλεψη της τάσης V_{dr} .

Για τις προσομοιώσεις:

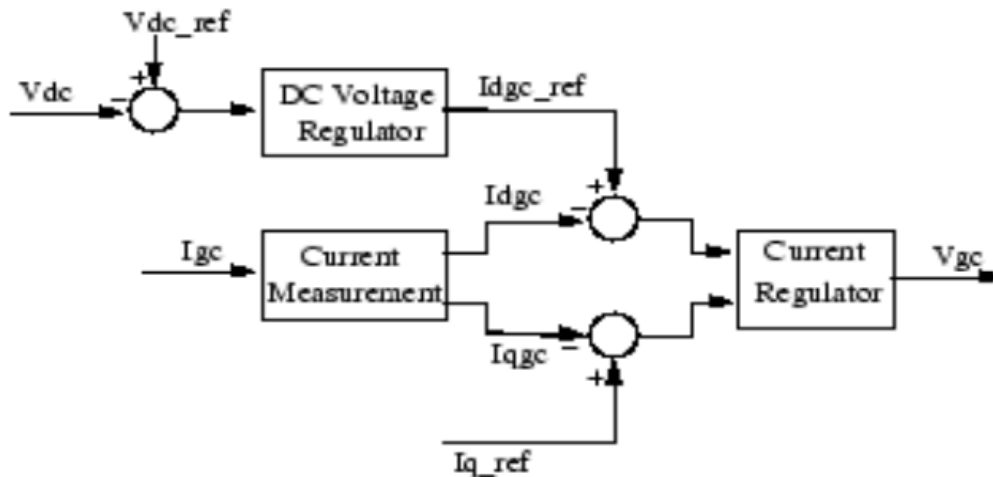
- 1) Στο σύστημα ελέγχου και απόκτησης μετρήσεων ενός μετατροπέα ροπής, ο άξονας d από το περιστρεφόμενο πλαίσιο d-q κλειδώνεται στην αμοιβαία ροή της γεννήτριας με ένα PLL. Αυτό θεωρείται ιδανικό για το μοντέλο φάσης που χρησιμοποιείται.
- 2) Το ρεύμα αναφοράς του δρομέα ισούται με $I_{ref} = \sqrt{I_{dr_ref}^2 + I_{qr_ref}^2}$. Το μέγιστο όριο είναι 1 p.u. Αν τα ρεύματα I_{dr_ref} και I_{qr_ref} πάρουν τιμή τέτοια που θα υπερβαίνει το ρεύμα αναφοράς του δρομέα του ορίου 1 p.u., περιορίζεται η συνιστώσα του ρεύματος I_{qr_ref} με σκοπό να επανέλθει το I_{ref} εντός των ορίων.

4.8.2 Σύστημα ελέγχου από τη πλευρά του δικτύου (GSC)

Τα συστήματα ελέγχου του αντιστροφέα στην πλευρά του δικτύου βοηθούν στη ρύθμιση της τάσης του πυκνωτή στη σύνδεση DC του αντιστροφέα. Γενικότερα, βοηθούν στη διατήρηση της τιμής της σταθερής ανεξάρτητα από τη ροή ισχύος, δηλαδή στη διατήρηση της σταθερότητας σε όλο το δίκτυο. Τα στοιχεία του είναι τα εξής:

1. Το σύστημα μετρήσεων για τη μέτρηση της d και q θετικής ακολουθίας και τον έλεγχο της τάσης V_{dc} .
2. Ένας εξωτερικός βρόχος ελέγχου που περιλαμβάνει έναν ελεγκτή τάσης DC, του οποίου η έξοδος καθορίζει το ρεύμα αναφοράς I_{dgc_ref} για τον ελεγκτή ρεύματος. Το I_{dgc} αντιπροσωπεύει το συμφασικό ρεύμα με το δίκτυο και χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ροής της ενεργού ισχύος.

3. Ένας εσωτερικός βρόχος ελέγχου που περιλαμβάνει έναν ελεγκτή ρεύματος. Αυτός ο ελεγκτής ρυθμίζει το μέγεθος και τη φάση της τάσης (V_{gc}) που παράγεται από τον αντιστροφέα χρησιμοποιώντας το I_{dgc} από τον ελεγκτή τάσης DC και το ρεύμα αναφοράς που καθορίζεται για τη συνιστώσα q (I_{q_ref}).



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

Με τη χρήση του συστήματος ελέγχου εκμηδενίζεται η μεταφορά αέργου ισχύος και έτσι υπάρχει ο μοναδιαίος συντελεστής ισχύος. Όμως, ο μετατροπέας σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιεί την q και d συνιστώσα του ρεύματος, με σκοπό τον καλύτερο έλεγχο της τάσης της DC σύνδεσης και την μεταφορά ή μη της αέργου ισχύος.

Θα γίνει η χρήση του στρεφόμενου πλαισίου αναφοράς για να αναλυθούν οι εξισώσεις τάσεων και αέργου ισχύος του μετατροπέα. Οι εξισώσεις τάσεων του στάτη:

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

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

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

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

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

Οι πτώσεις τάσης θα θεωρηθούν αμελητέες:

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

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

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μόνο ο μετασχηματιστής στην πλευρά του δικτύου είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο της άεργου ισχύος. Συνεπώς, η συνολική άεργος ισχύς του στάτη υπολογίζεται με βάση την ακόλουθη σχέση:

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

Γίνεται αντιληπτό ότι η άεργος ισχύς εξαρτάται μόνο από τη συνιστώσα d του ρεύματος του δρομέα και επομένως ελέγχεται μέσω αυτής. Για τον υπολογισμό του ρεύματος DC link, χρησιμοποιούνται ορισμένοι συμβολισμοί. Έστω I_{os} το ρεύμα που ρέει από τον πυκνωτή προς τον στάτη και I_{or} το ρεύμα που ρέει από τον πυκνωτή προς τον δρομέα. Επομένως, ισχύει η ακόλουθη σχέση:

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

Επιπρόσθετα, ισχύει ότι η ισχύς για το συνεχές ρεύμα-τάση στο τριφασικό είναι:

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

Για τον μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου είναι:

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

Συμπερασματικά, οι ακόλουθες εξισώσεις προκύπτουν για το ρεύμα που ρέει από τον πυκνωτή στον στάτη και το ρεύμα σύνδεσης DC, το οποίο εξαρτάται από τη συνιστώσα q του ρεύματος στον μετασχηματιστή ρεύματος:

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

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

Για τον υπολογισμό του ρεύματος αναφοράς του μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου I_{gc_ref} χρησιμοποιείται η σχέση:

$$\sqrt{I_{dgc_ref}^2 + I_{qref}^2}$$

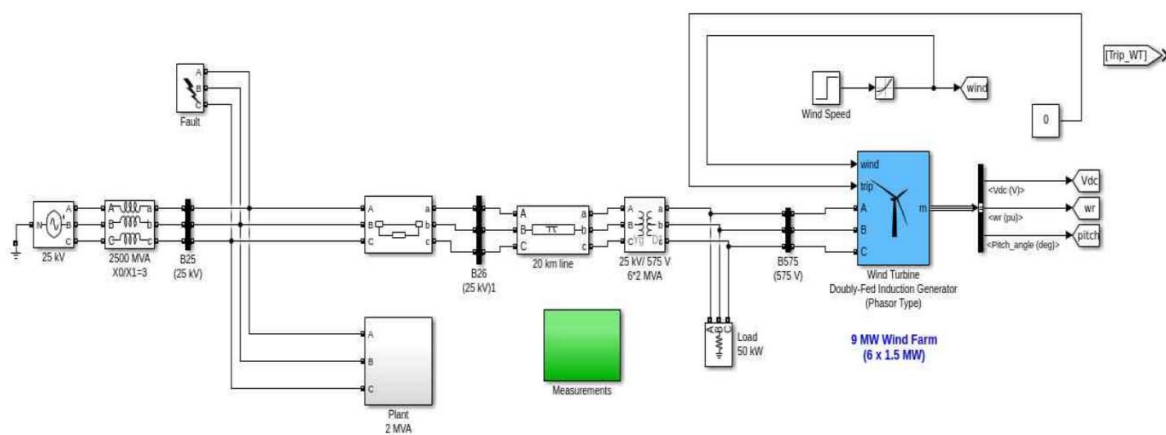
Η μέγιστη τιμή της ισχύος του μετατροπέα καθορίζει την μέγιστη τιμή του ρεύματος που αναφέρθηκε, όταν ο μετατροπέας λειτουργεί υπό ονομαστική τάση. Εάν τα ρεύματα I_{dgc_ref} και I_{q_Ref} είναι τέτοια ώστε η ένταση ρεύματος μετατροπέα I_{gc_Ref} από την πλευρά του δικτύου να υπερβαίνει τη μέγιστη επιτρεπόμενη μέγιστη τιμή τότε

η συνιστώσα I_{q_ref} μειώνεται με σκοπό να επαναφέρει την ένταση του ρεύματος στη μέγιστη τιμή που αρμόζει.

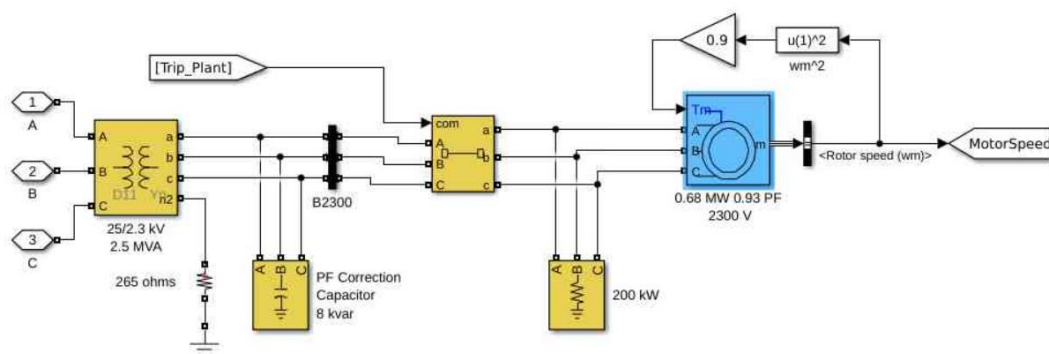
Κεφάλαιο 5: Προσομοίωση αιολικού πάρκου

5.1 Περιγραφή συστήματος

Το παρακάτω μοντέλο που αναλύεται είναι αποτελούμενο από ένα αιολικό πάρκο συνολικής ισχύος 9MW το οποίο έχει 6 ανεμογεννήτριες ξ κάθε μία από 1.5 MW. Συνδέεται με το δίκτυο που είναι 25 kV με μία γραμμή μεταφοράς 20 km και τάση 25 kV. Μετά τη γραμμή των 20 km και μετά τον κόμβο B26, είναι τοποθετημένος ένας διακόπτης φάσης τον οποίο ρυθμίζουμε manual για να μπορούμε να βγάλουμε εκτός τη μία φάση για πειραματικούς λόγους. Έπειτα υπάρχει ένα υποσύστημα που ονομάζεται “plant” στο οποίο είναι συνδεδεμένα ένας κινητήρας των 300 W και ένα φορτίο 200 W με συντελεστή ισχύος 0.93 επαγωγικό. Από εκεί και πέρα στο σύστημα συνδέεται με το δίκτυο μετά το κόμβο B25.



5.1 Τριφασικό μοντέλο προσομοίωσης του αιολικού πάρκου



5.2 Τριφασικό μοντέλο εγκατάστασης του αιολικού πάρκου

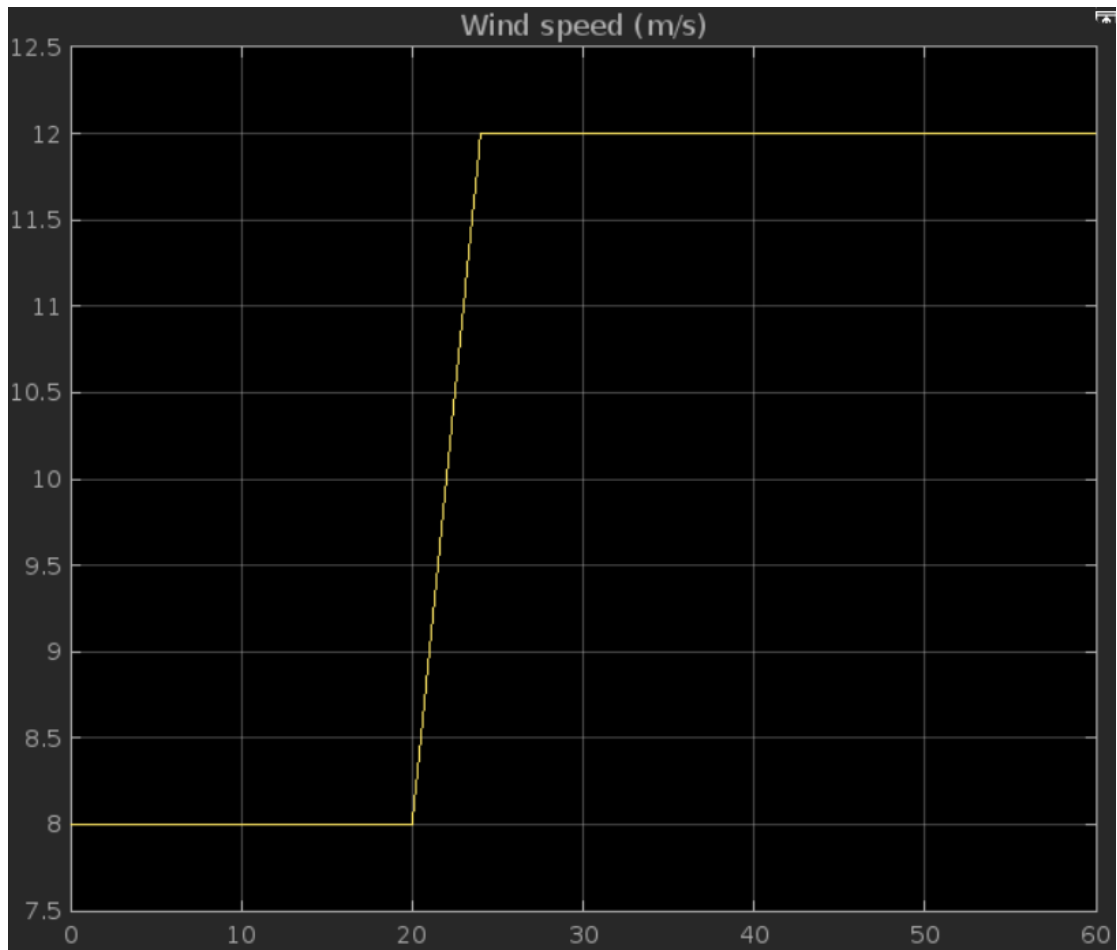
Με τη μοντελοποίηση του συστήματος προσπαθήσαμε να αναλύσουμε σε διαφορετικές συνθήκες τη συμπεριφορά του συστήματος των ανεμογεννητριών. Για τις διαδικασίες και τα «πειράματα» αυτά, δοκιμάστηκαν τιμές αντιστάσεων των καλωδίων που αντιστοιχούν σε εναέρια γραμμή αλλά και σε υπόγεια γραμμή. Αρχικά, σε συνθήκες ιδανικής λειτουργίας χωρίς σφάλματα μεταξύ των φάσεων, έγινε εναλλαγή της ταχύτητας από τα 8 μέτρα ανά δευτερόλεπτο στα 12 μέτρα ανά δευτερόλεπτο. Η αλλαγή αυτή δοκιμάστηκε και τις δύο περιπτώσεις αντιστάσεων για τα καλώδια. Ύστερα με σταθερή την ταχύτητα του ανέμου στην ονομαστική της τιμή (12 μέτρα ανά δευτερόλεπτο) προσθέτουμε 3φασικό σφάλμα στα 45 δευτερόλεπτα. Το σφάλμα θα έχει διάρκεια 0.09 δευτερόλεπτα, αρκετός χρόνος ώστε το σύστημα να μη βγει εκτός και να μπορέσει να λειτουργήσει κανονικά.

5.2 Συνθήκες αλλαγής ταχύτητας

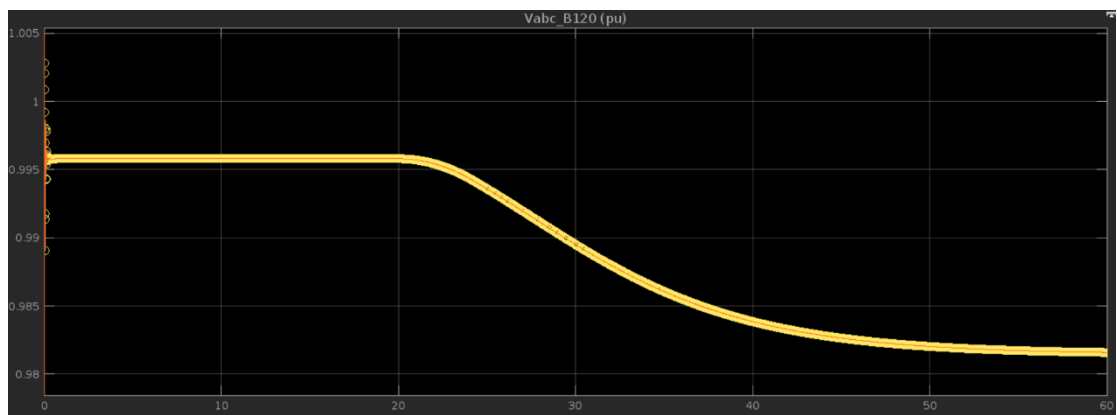
5.2.1 Αλλαγή ταχύτητας σε εναέριο καλώδιο χωρίς σφάλμα

Για να πραγματοποιηθεί η υλοποίηση του εναέριου μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν αντιστάσεις καλωδίων οι οποίες είναι κοντά στις πραγματικές τιμές.

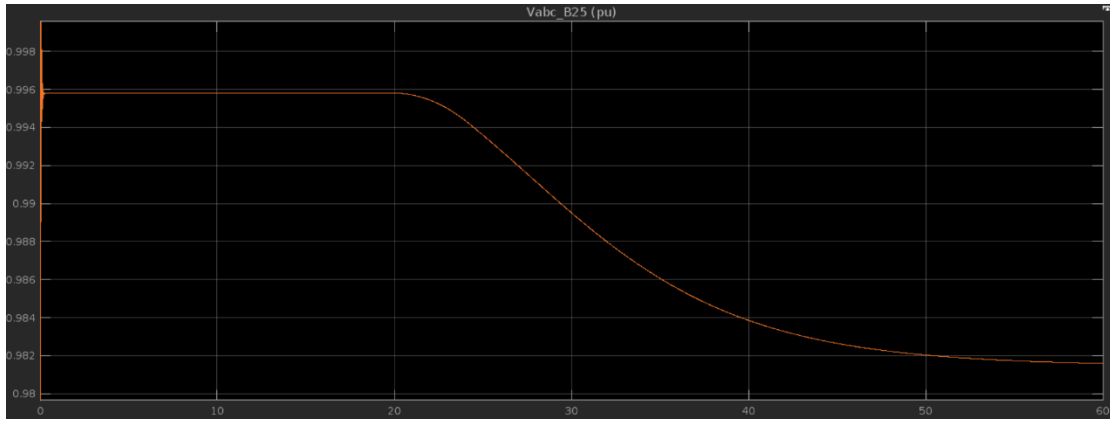
| Αντίσταση | Τιμή αντίστασης |
|-----------|-----------------------|
| R1-R0 | 0.215 - 0.86 Ω/Km |
| L1-L0 | 0,88e-3 - 3.2e-3 H/Km |
| C1-C0 | 11.33e-9 - 45e-9 F/Km |



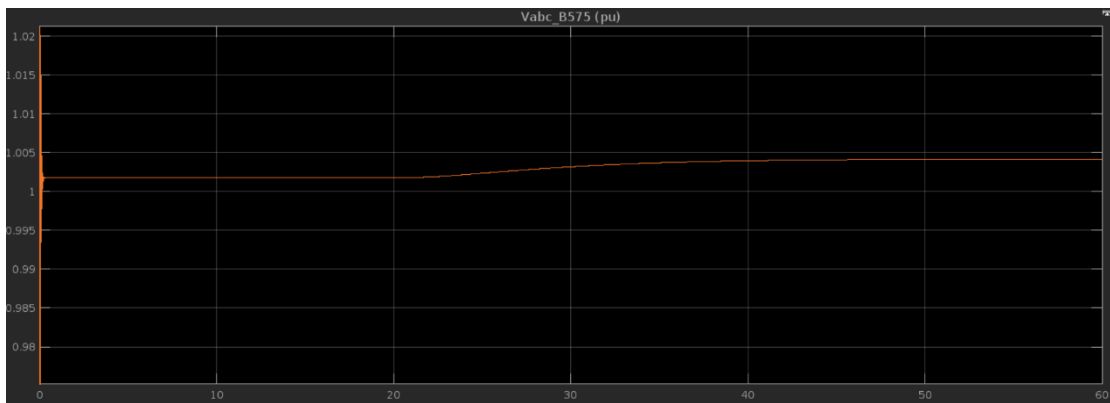
5.3 Η αλλαγή στην τιμή της ταχύτητας του ανέμου



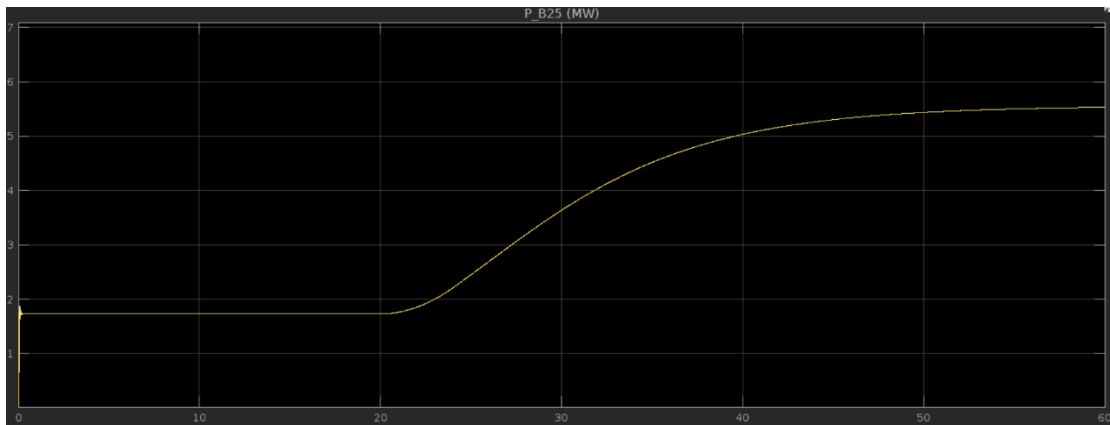
5.4 Η τάση στο ζυγό B25



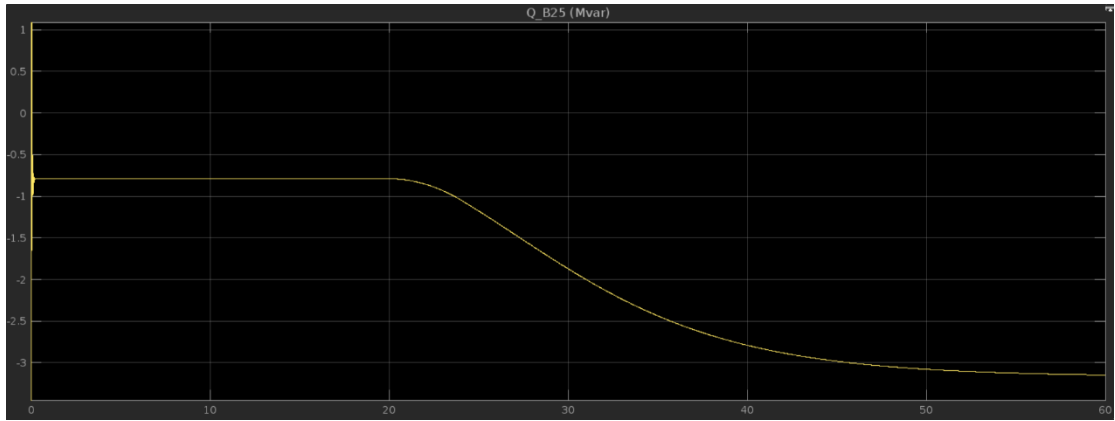
5.5 Η τάση στο ζυγό B26



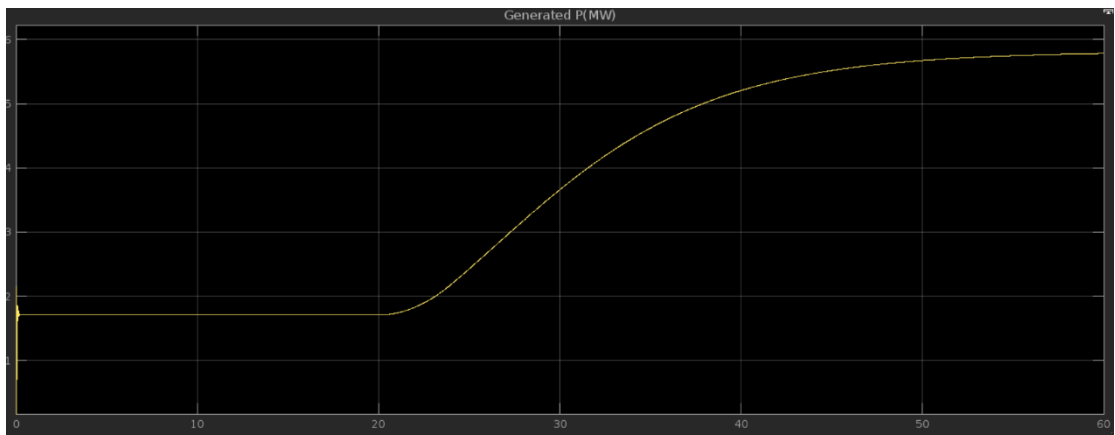
5.6 Η τάση στο ζυγό B575



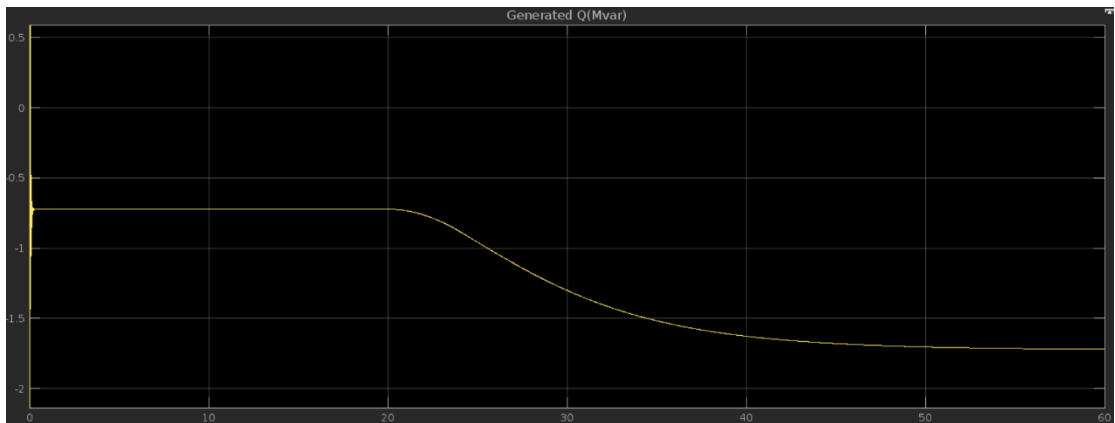
5.7 Η ενεργός ισχύς στο ζυγό B25



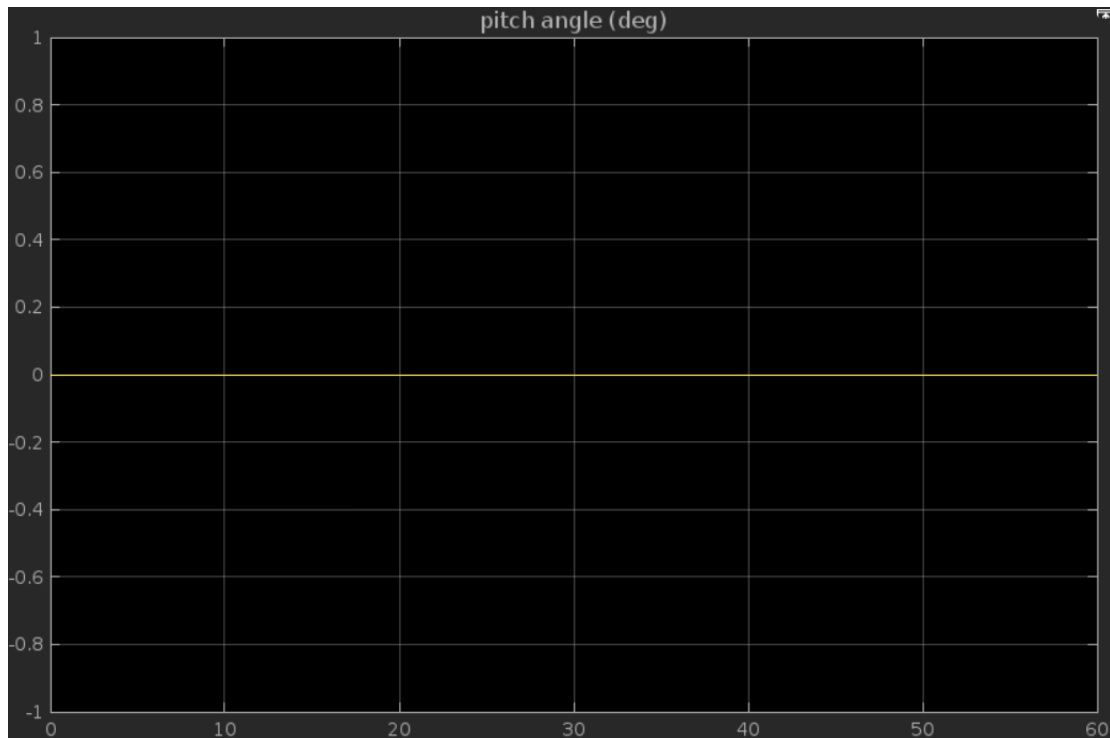
5.8 Η άεργος ισχύς στο ζυγό B25



5.9 Η παραγόμενη ενεργός ισχύς



5.10 Η παραγόμενη άεργος ισχύς



5.11 Η γωνία βήματος

Σχετικά με τις τάσεις παρατηρείται διαφοροποίηση στην αντίδραση των ζυγών B25 και B26 με τον ζυγό B575. Στους πρώτους 2 η τάση μειώνεται κατά 0.018 pu ενώ για το ζυγό κοντά στο σύστημα ανεμογεννητριών παραμένει σχεδόν σταθερή. Η πτώση τάσης οφείλεται στο χωρητικό χαρακτήρα που έχουν τα καλώδια, την μεγάλη απόσταση που διανύουν για να φτάσουν στο δίκτυο και τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που δημιουργούνται.

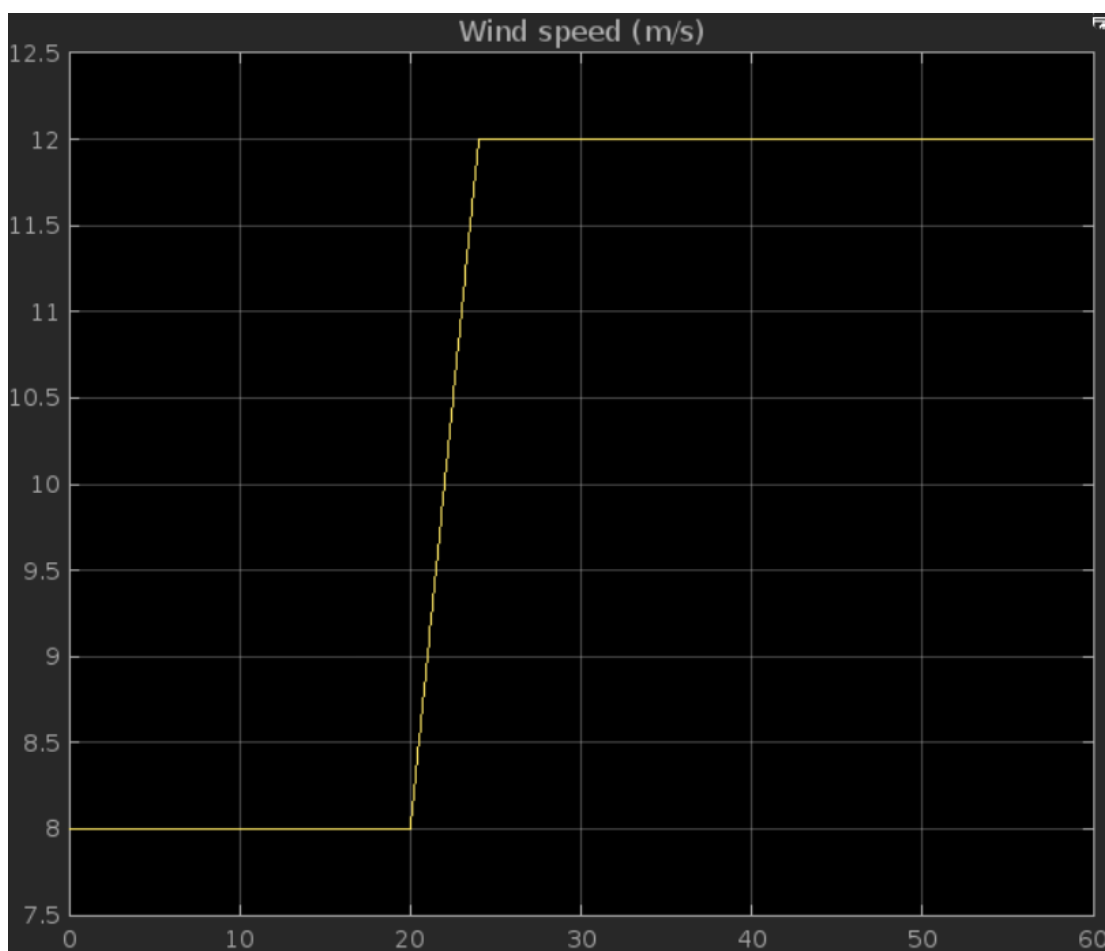
Από τα αποτελέσματα των συναρτήσεων για την ενεργό και την άεργο ισχύς, συμπεραίνεται ότι με ταχύτητα ανέμου 8 μέτρα ανά δευτερόλεπτο η ανεμογεννήτρια υπολειτουργεί με ενεργό ισχύς στα 2 MW περίπου. Στην αλλαγή ταχύτητας του ανέμου η ενεργός ισχύς αυξάνεται και τελικά σταθεροποιείται στα 6 MW.

Για την άεργο ισχύς στο εναέριο βλέπουμε ότι ξεκινάει και απορροφά άεργο από 0.5 MVar από την αρχή και καταλήγει να τραβάει μέγιστο 1.7 MVar

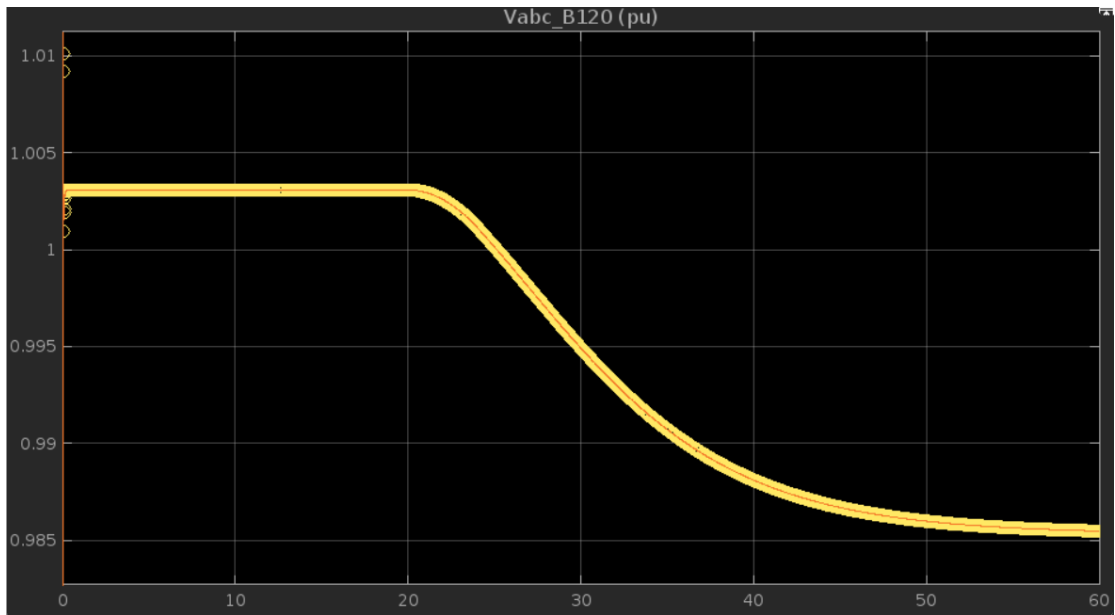
5.2.2 Αλλαγή ταχύτητας σε υπόγειο καλώδιο χωρίς σφάλμα

Για να πραγματοποιηθεί η υλοποίηση του εναέριου μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν αντιστάσεις καλωδίων οι οποίες είναι κοντά μας πραγματικές τιμές.

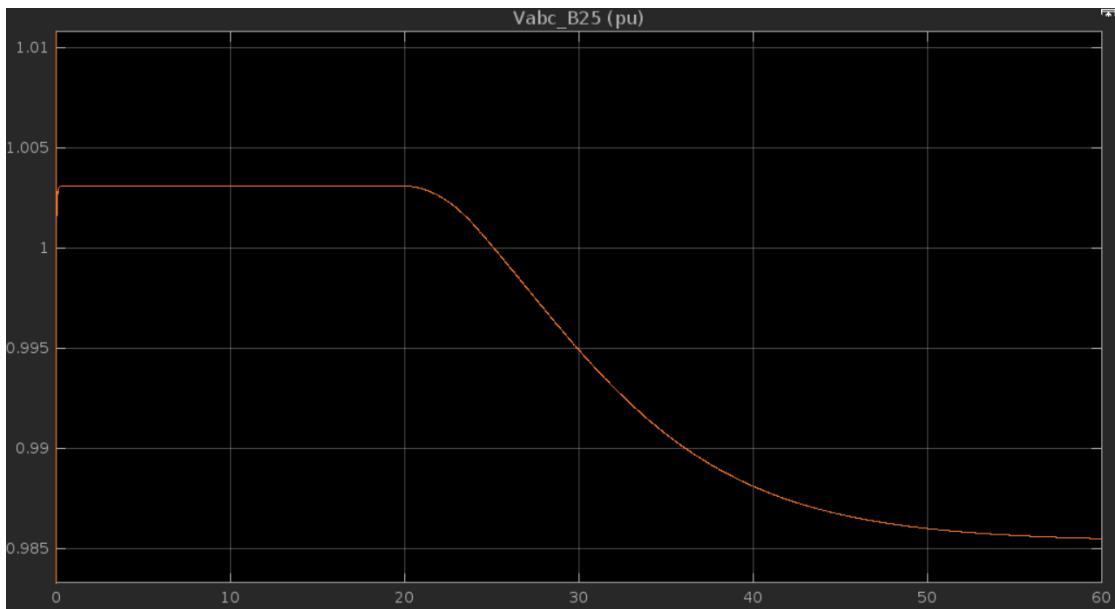
| Αντίσταση | Τιμή αντίστασης |
|-----------|------------------------|
| R1-R0 | 0.199 - 0.8 Ω/Km |
| L1-L0 | 0,403e-3 - 1.2e-3 H/Km |
| C1-C0 | 0,235e-6 - 1e-6 F/Km |



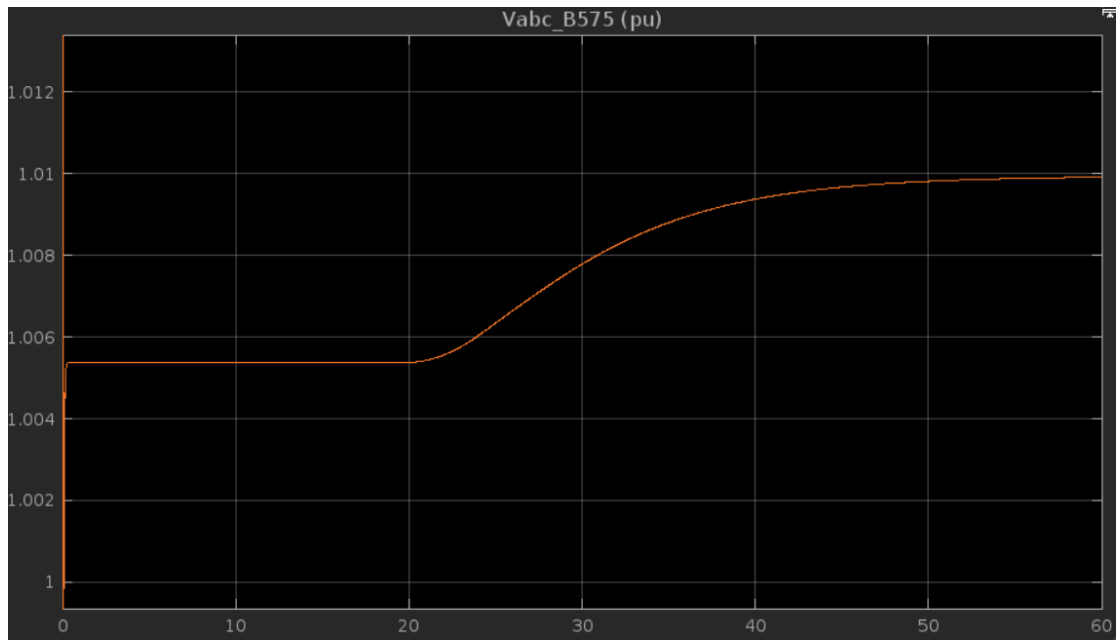
5.12 Η αλλαγή στην τιμή μας ταχύτητας του ανέμου



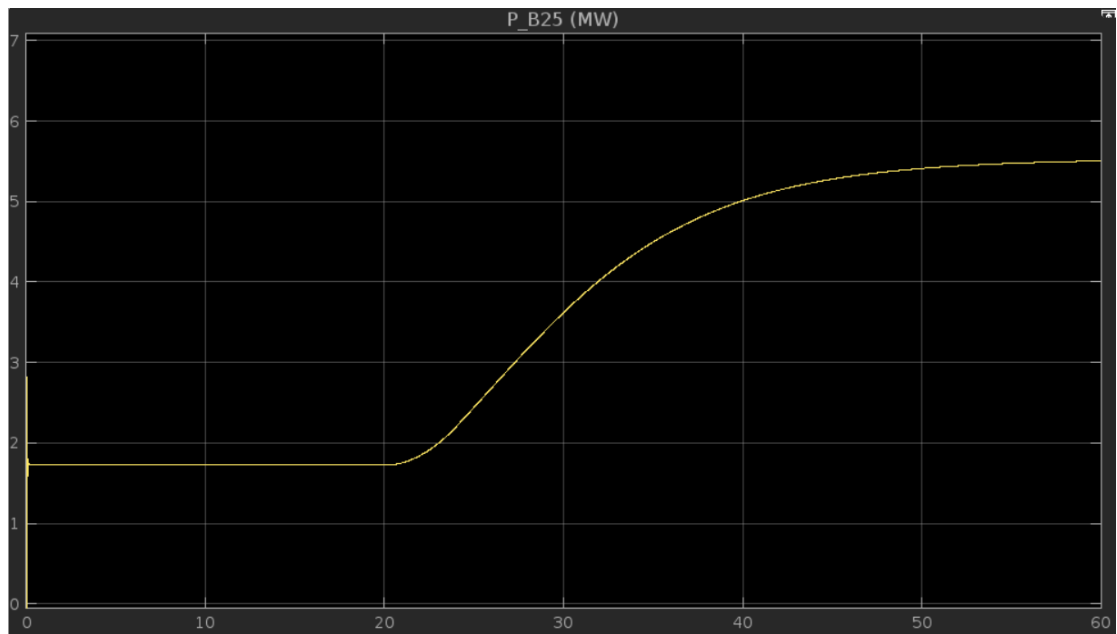
5.13 Η τάση στο ζυγό B25



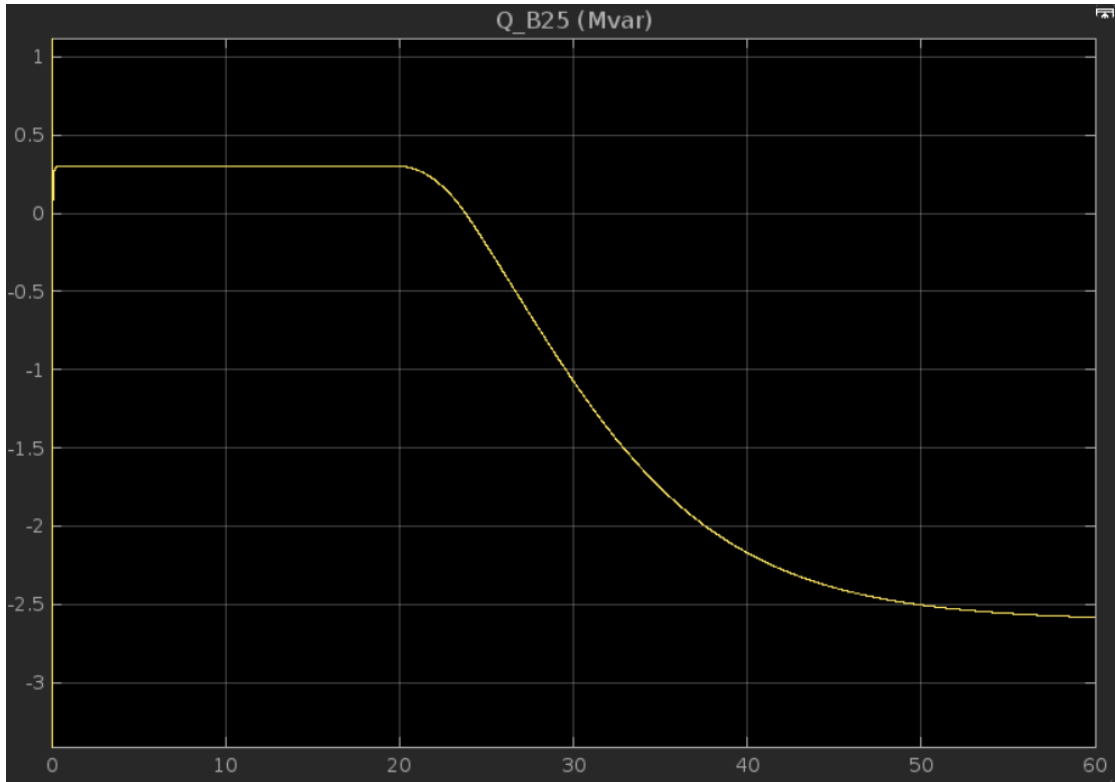
5.14 Η τάση στο ζυγό B26



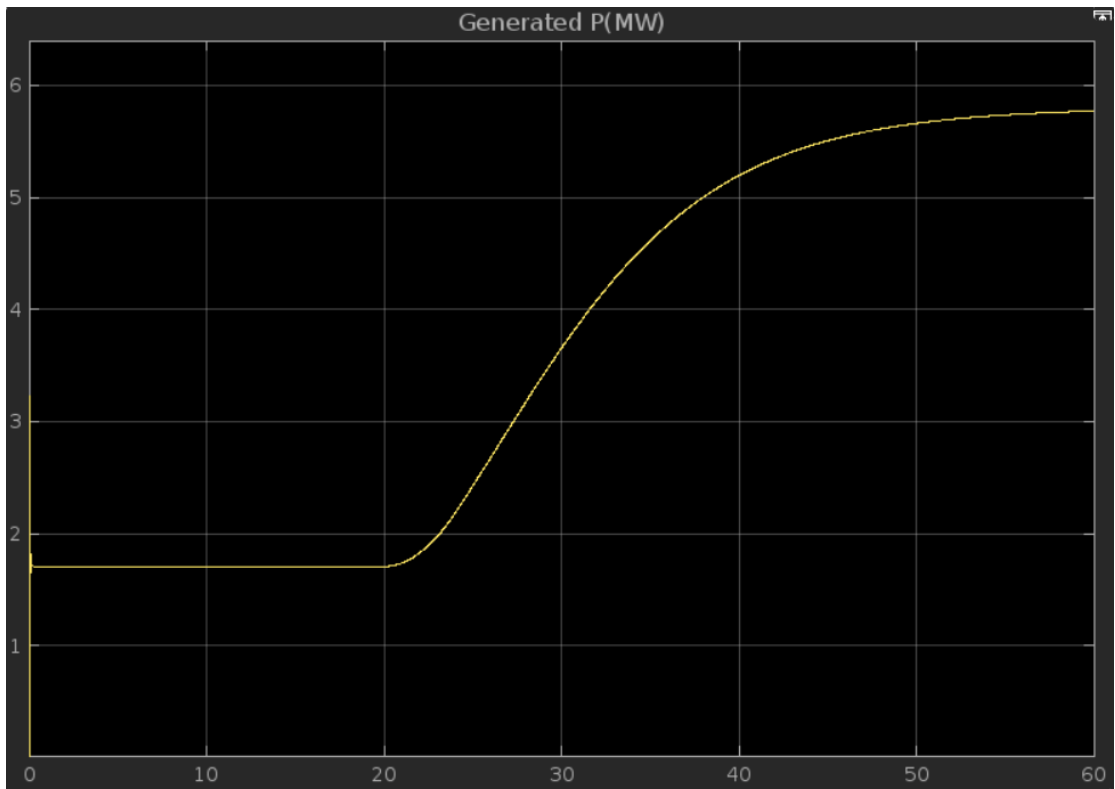
5.15 Η τάση στο ζυγό B575



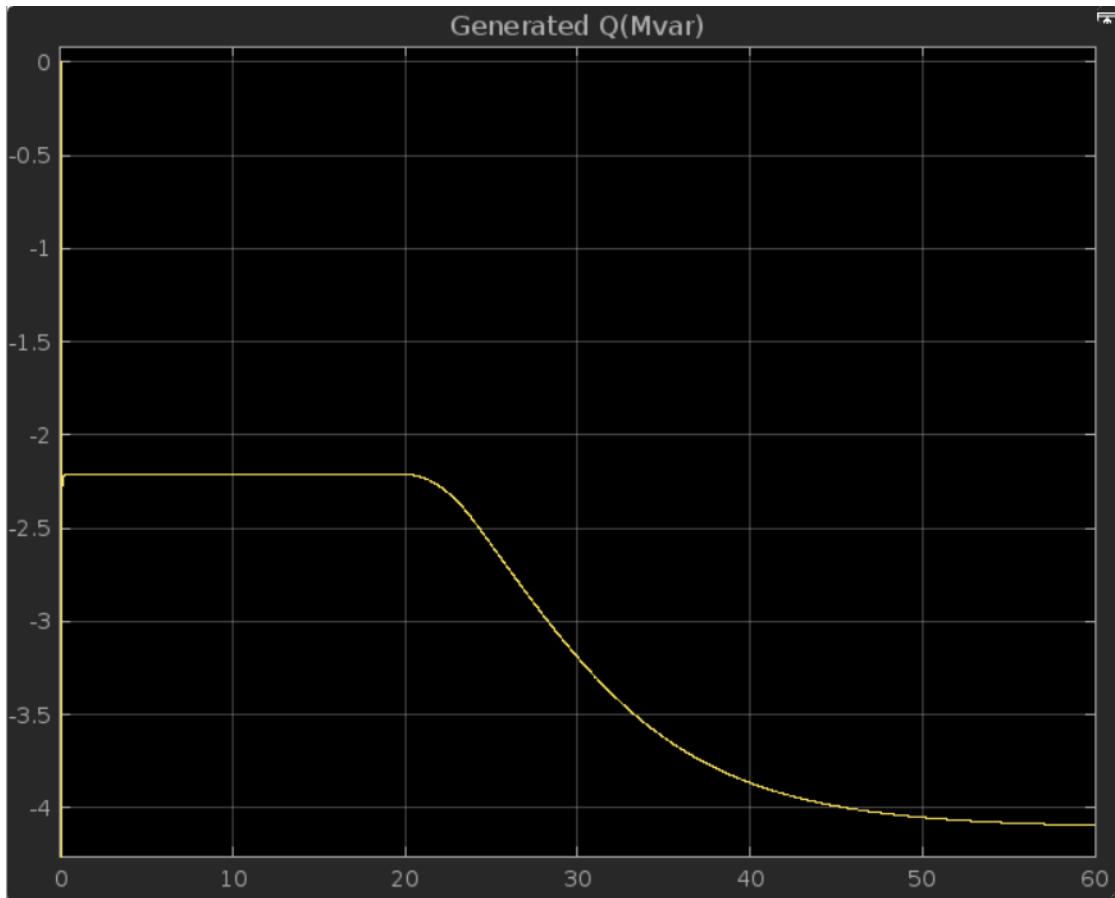
5.16 Η ενεργός ισχύς στο ζυγό B25



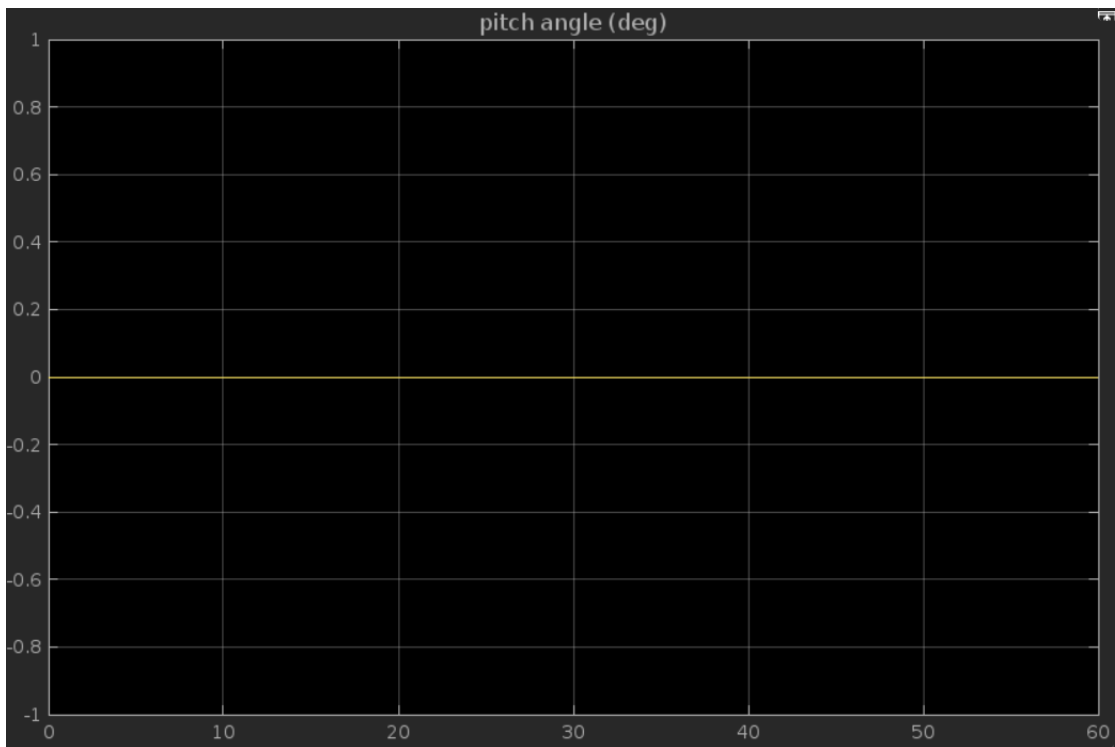
5.17 Η άεργος ισχύς στο ζυγό B25



5.18 Η παραγόμενη ενεργός ισχύς



5.19 Η παραγόμενη άεργος ισχύς



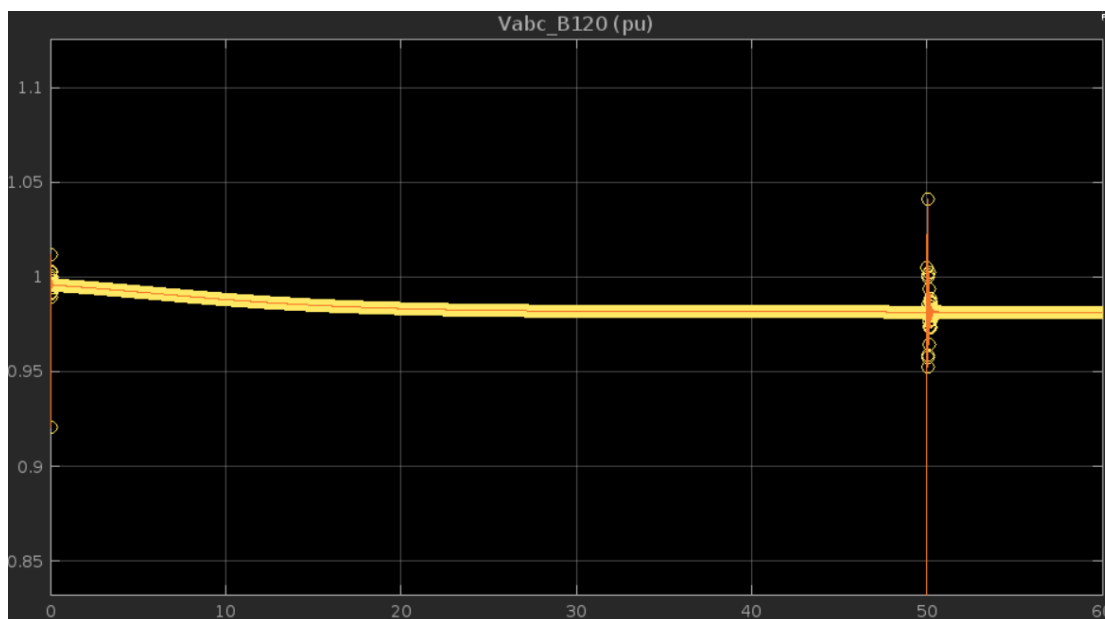
5.20 Η γωνία βήματος

Τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με αυτά μας εναέριας γραμμής. Βέβαια, στην περίπτωση του υπόγειου καλωδίου, η πτώση τάσης είναι μικρότερη αλλά όχι αισθητά πολύ ώστε να μας απασχολήσει ή να κάνει διαφορά στο σύστημα.

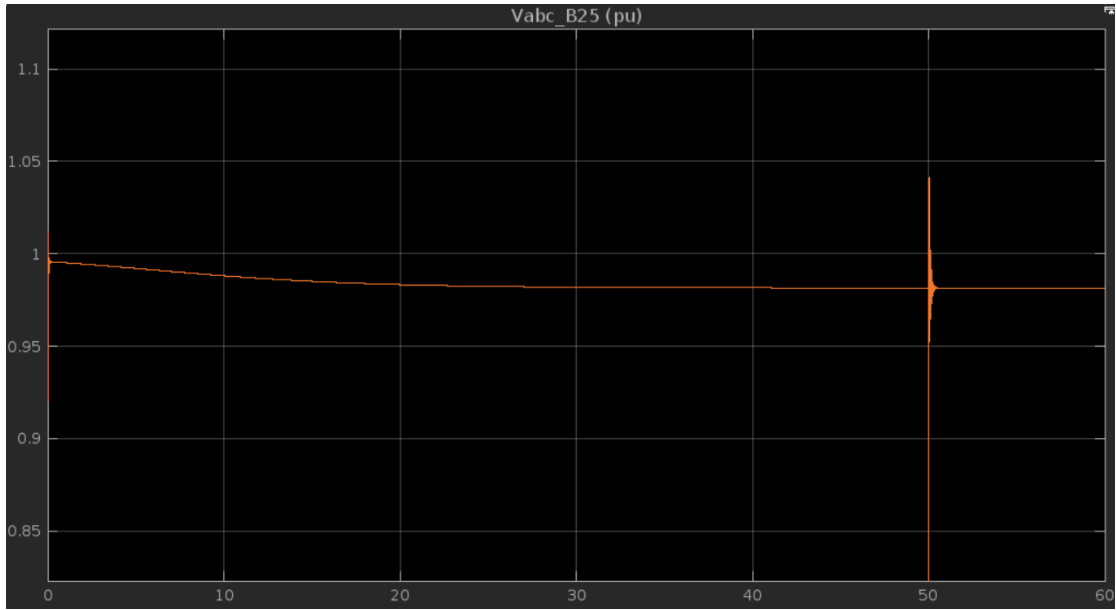
Η ενεργός ισχύς είναι σταθερά στα 6 MW μετά την αλλαγή του ανέμου, αλλά η άεργος ισχύς είναι εκείνη που παρουσιάζει την μεγαλύτερη αλλαγή. Ξεκινώντας, σαν αρχική τιμή έχει τα -2.2 Mvar και καταλήγει να φτάνει στα -4.2. Η απορρόφηση άεργου ισχύος στην περίπτωση του υπογείου καλωδίου είναι πολύ μεγαλύτερη. Πράγμα που σημαίνει ότι το σύστημα χρειάζεται περισσότερη ενέργεια.

5.3 Συνθήκες τριφασικού σφάλματος

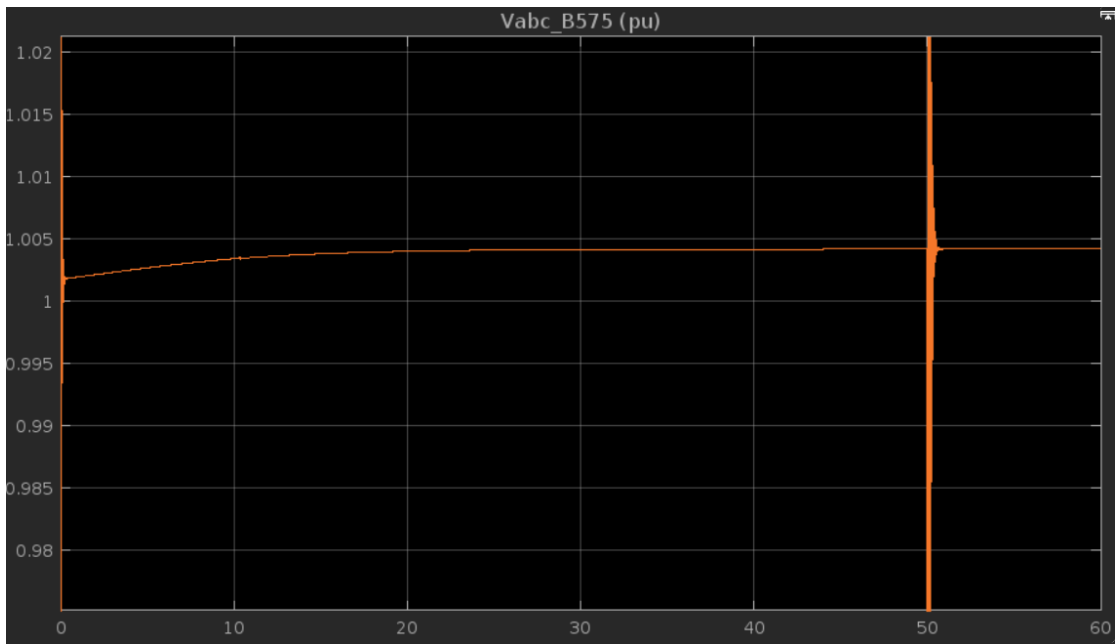
5.3.1 Εναέριο καλώδιο σε τριφασικό σφάλμα



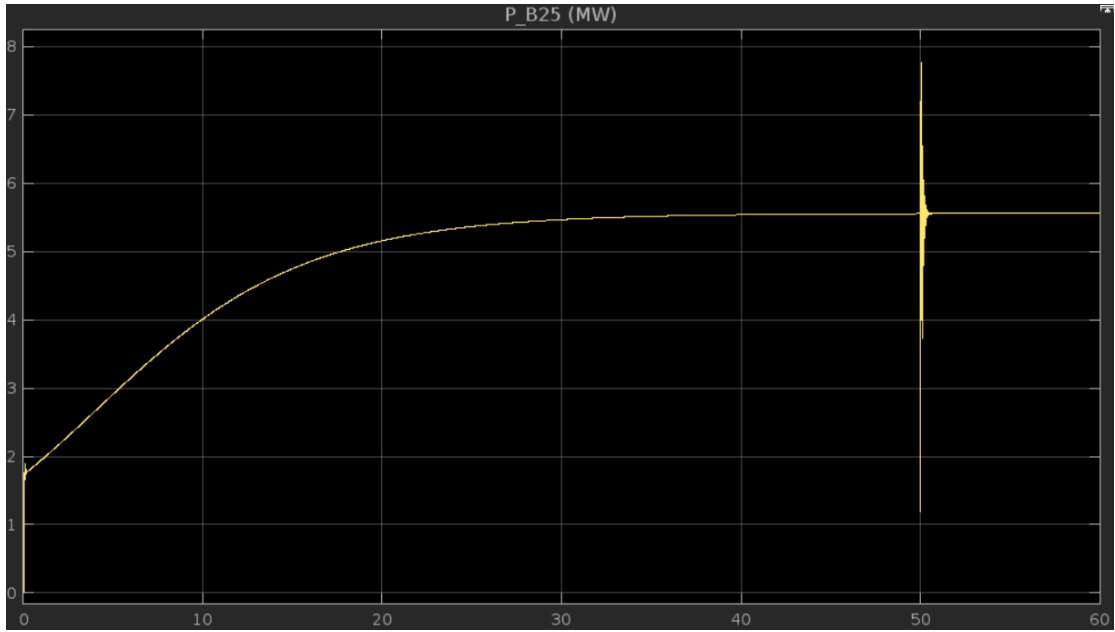
5.21 Η τάση στο ζυγό B25



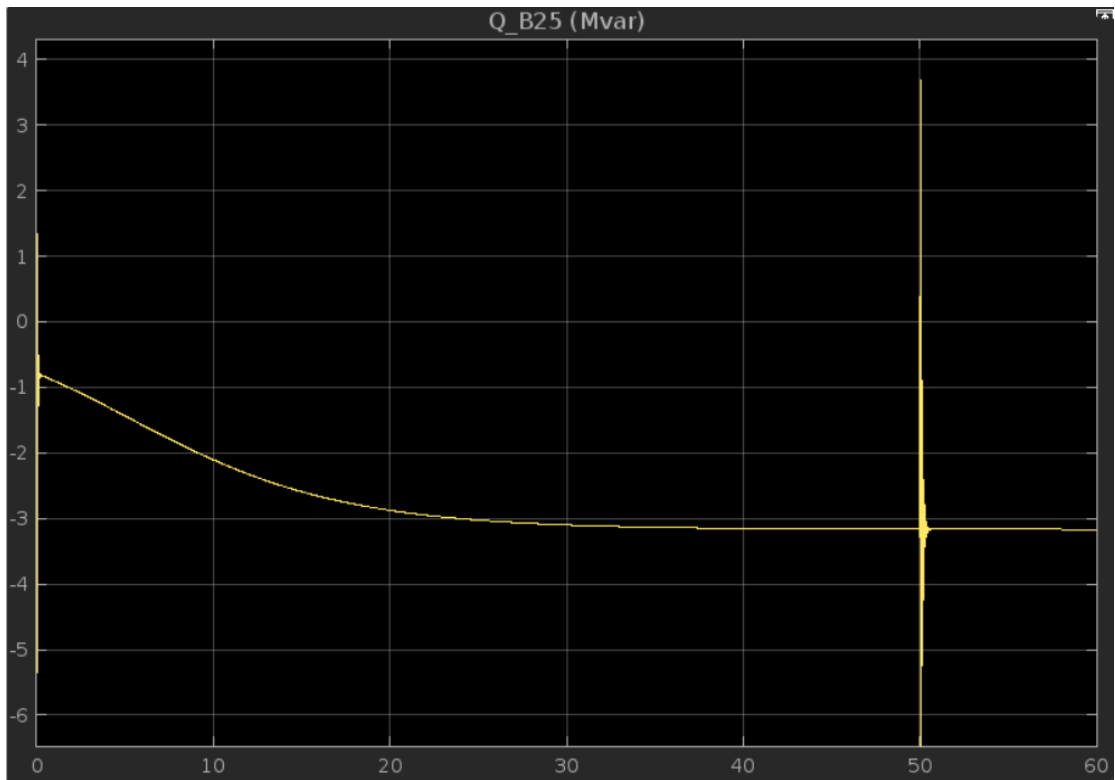
5.22 Η τάση στο ζυγό B26



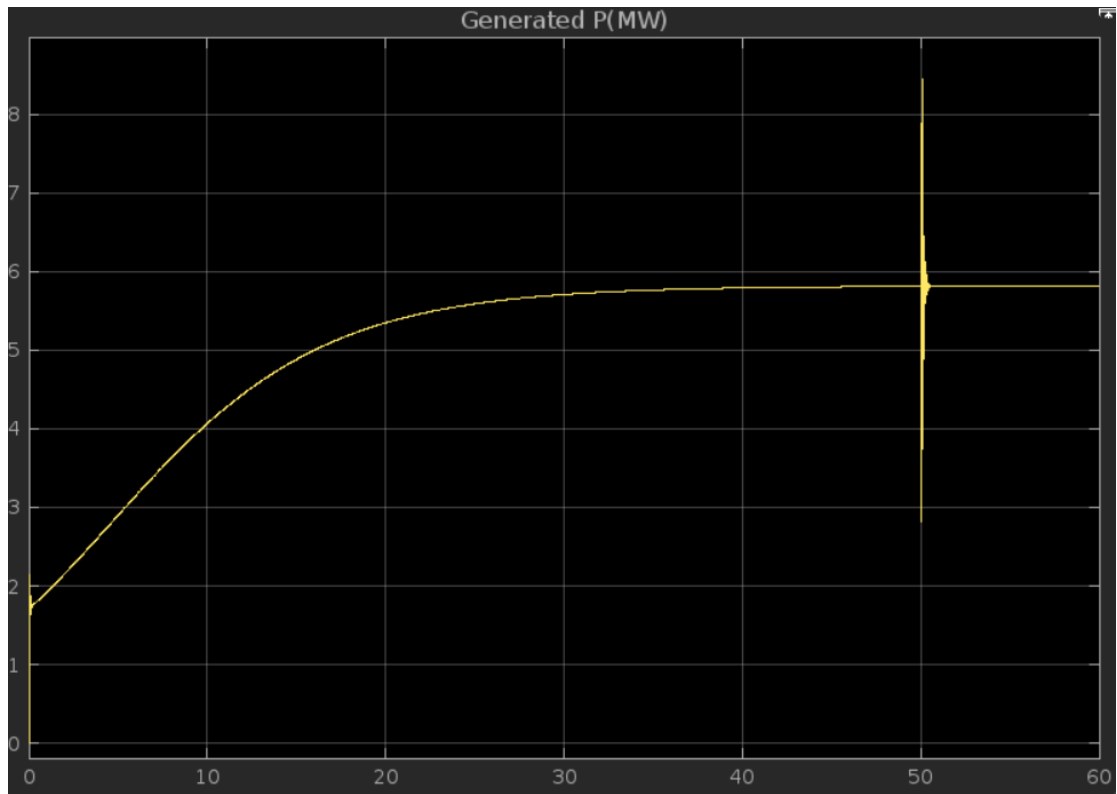
5.23 Η τάση στο ζυγό B575



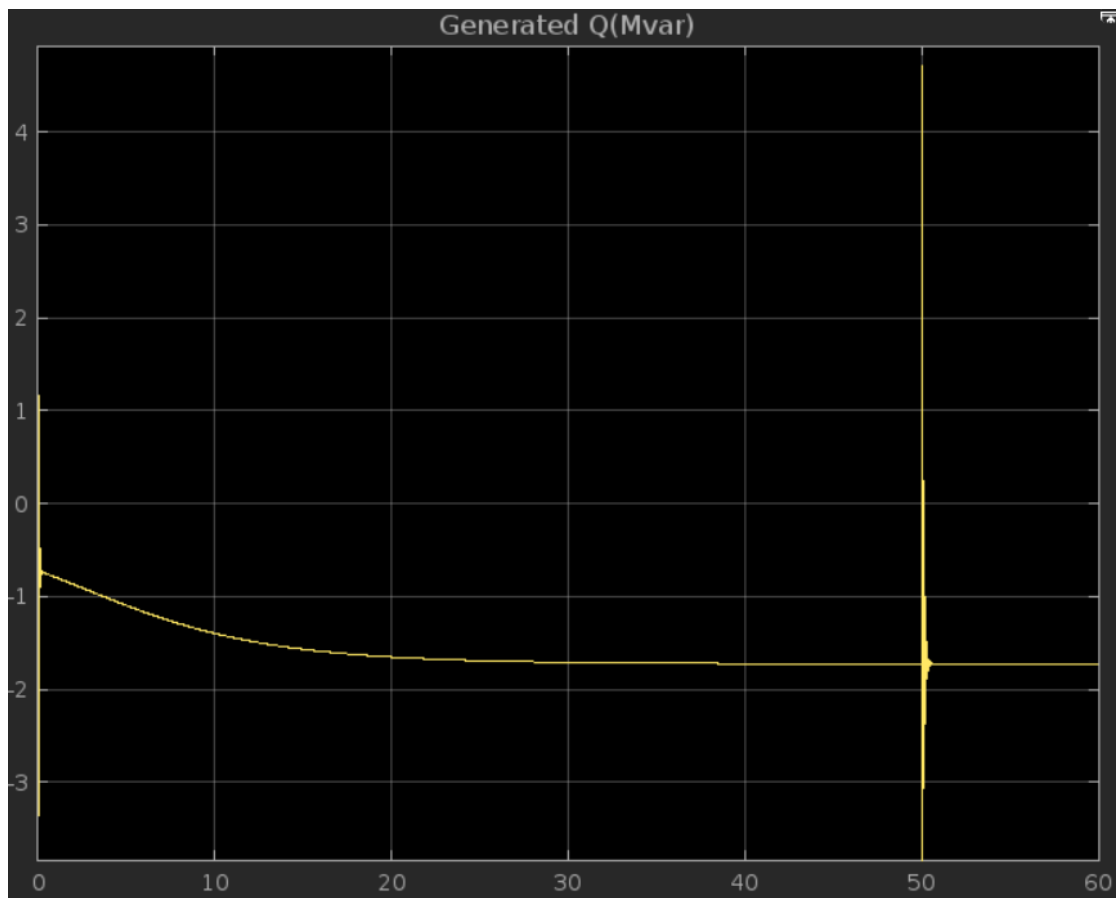
5.24 Η ενεργός ισχύς στο ζυγό B25



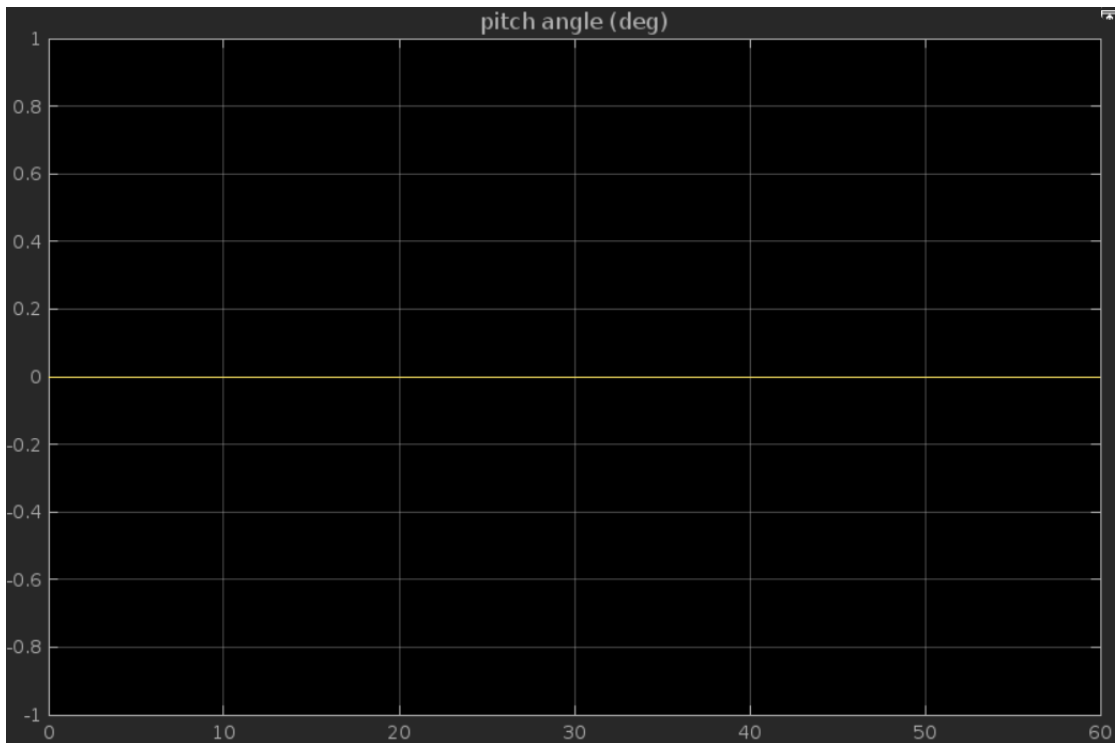
5.25 Η άεργος ισχύς στο ζυγό B25



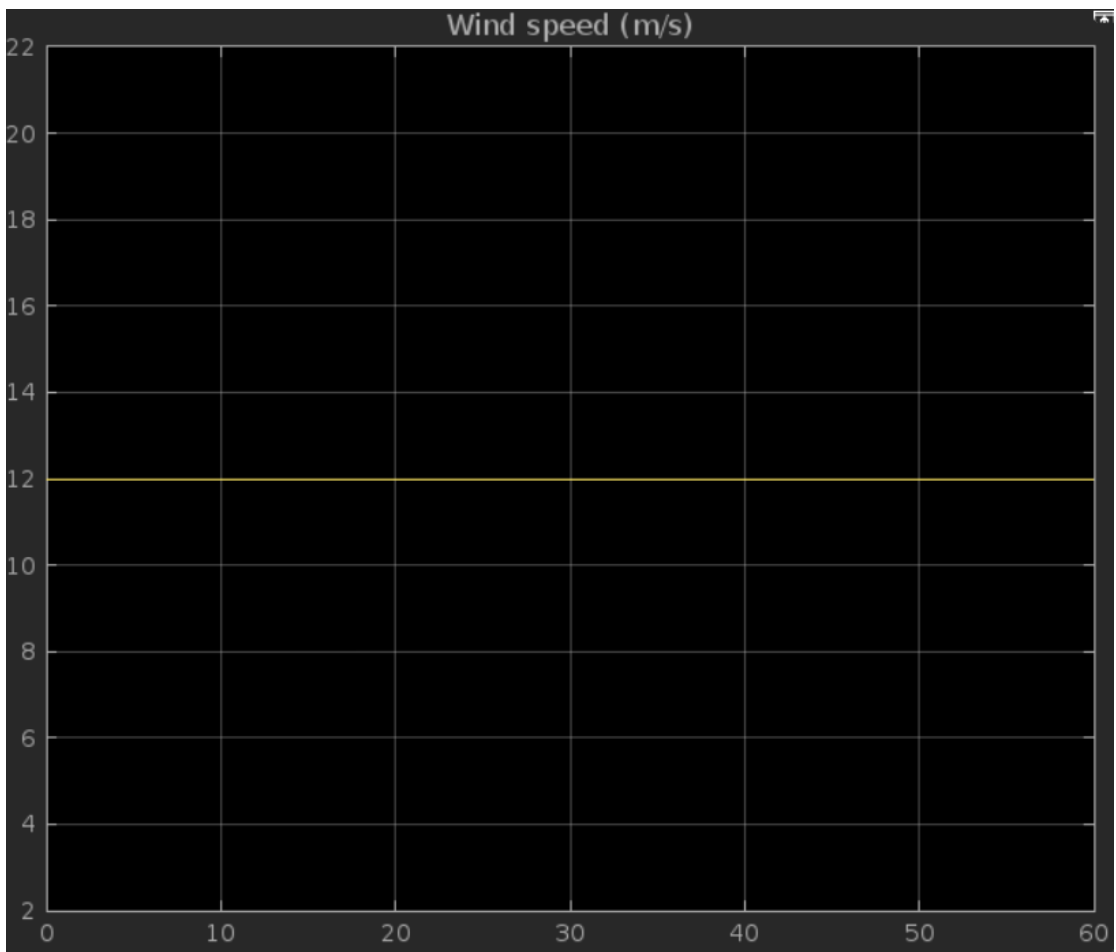
5.26 Η παραγόμενη ενεργός ισχύς



5.27 Η παραγόμενη άεργος ισχύς



5.28 Η γωνία κλίσης



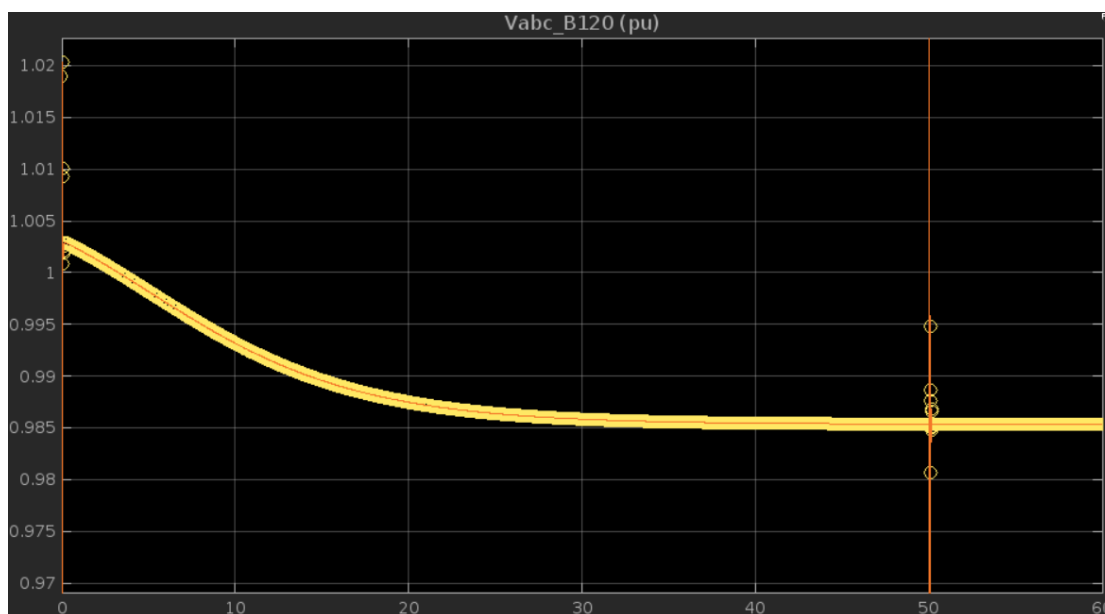
5.29 Η τάση στο ζυγό B26

Με την εφαρμογή 3φασικού βραχυκυκλώματος στην περίπτωση του εναέριου καλωδίου, οι παρατηρήσεις είναι εμφανείς κυρίως για την στατικότητα του συστήματος κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Αρχικά το σφάλμα έχει διάρκεια 0.09 δευτερόλεπτα, αρκετός χρόνος ώστε το σύστημα να μην βγει εκτός. Κατά τη διάρκεια του σφάλματος φαίνεται έντονα ότι το σύστημα αντιμετωπίζει μεταβατικά φαινόμενα, τα οποία εξομαλύνονται με το πέρασμα του χρόνου και τελικά το σύστημα έρχεται σε ισορροπία.

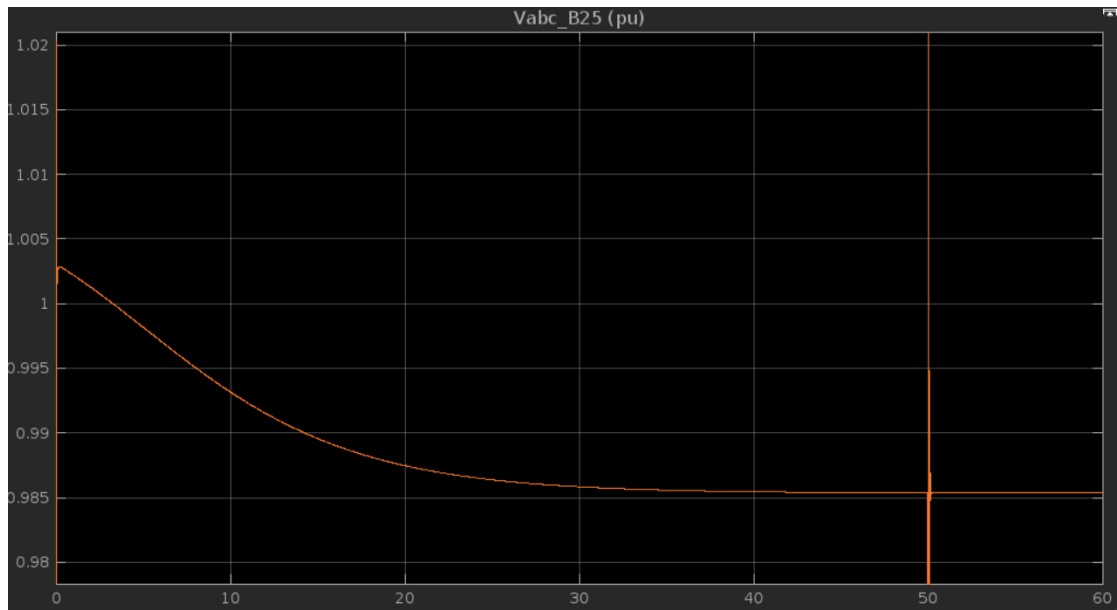
Η τάση σε όλες τις περιπτώσεις δεν αντιμετωπίζει κάποιο ιδιαίτερο πρόβλημα εκτός των μεταβατικών φαινομένων. Έχει την ίδια συμπεριφορά με την κατάσταση λειτουργίας χωρίς σφάλμα, ακόμα και στο ποσοστό της πτώσης της.

Η ισχύς, τόσο η ενεργός όσο και η άεργος, δεν έχουν επιβαρύνσεις ή διαφορές με την κατάσταση λειτουργίας σε ιδανικές συνθήκες. Ξανά η ενεργός ισχύς σταθεροποιείται στα 6 MW με την πάροδο του σφάλματος ενώ το ίδιο συμβαίνει και για την άεργο ισχύς στα 2 MVar περίπου.

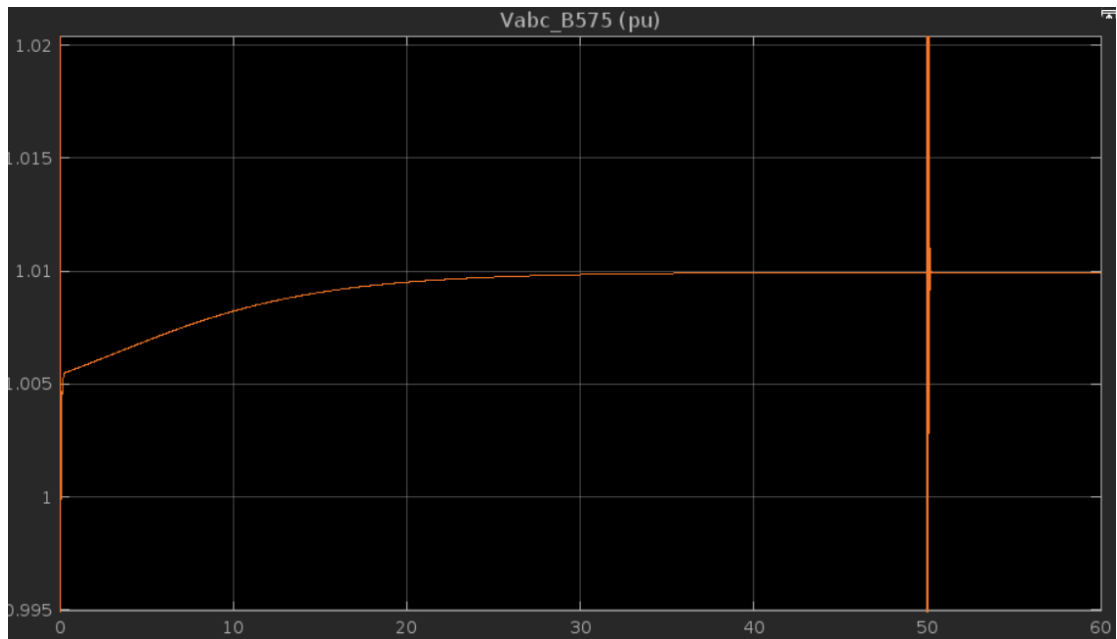
5.3.2 Υπόγειο καλώδιο σε τριφασικό σφάλμα



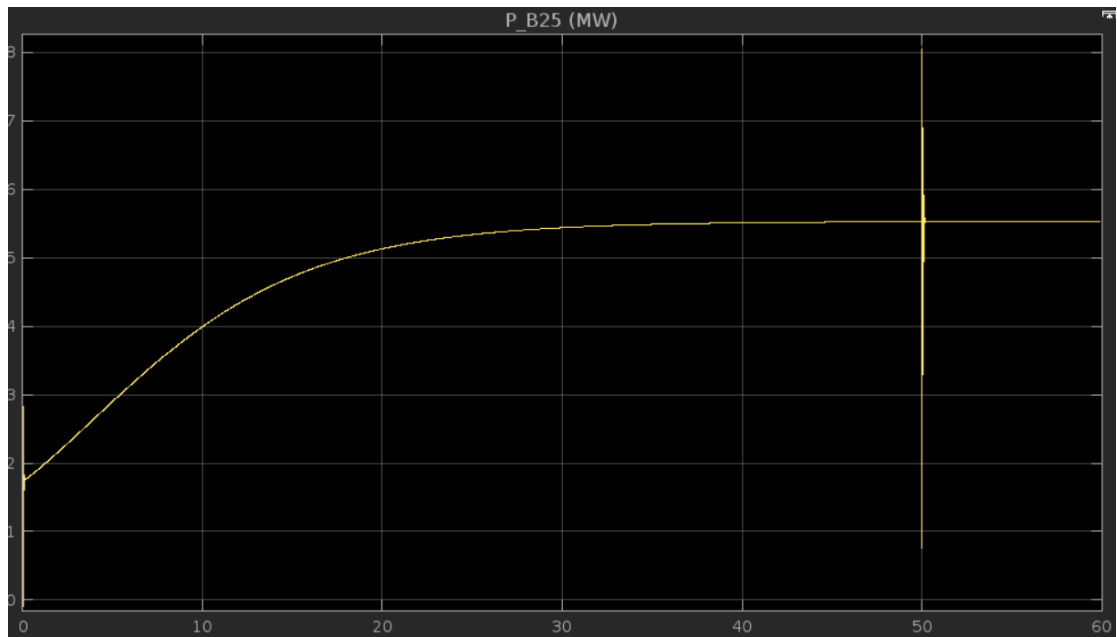
5.30 Η τάση στο ζυγό B25



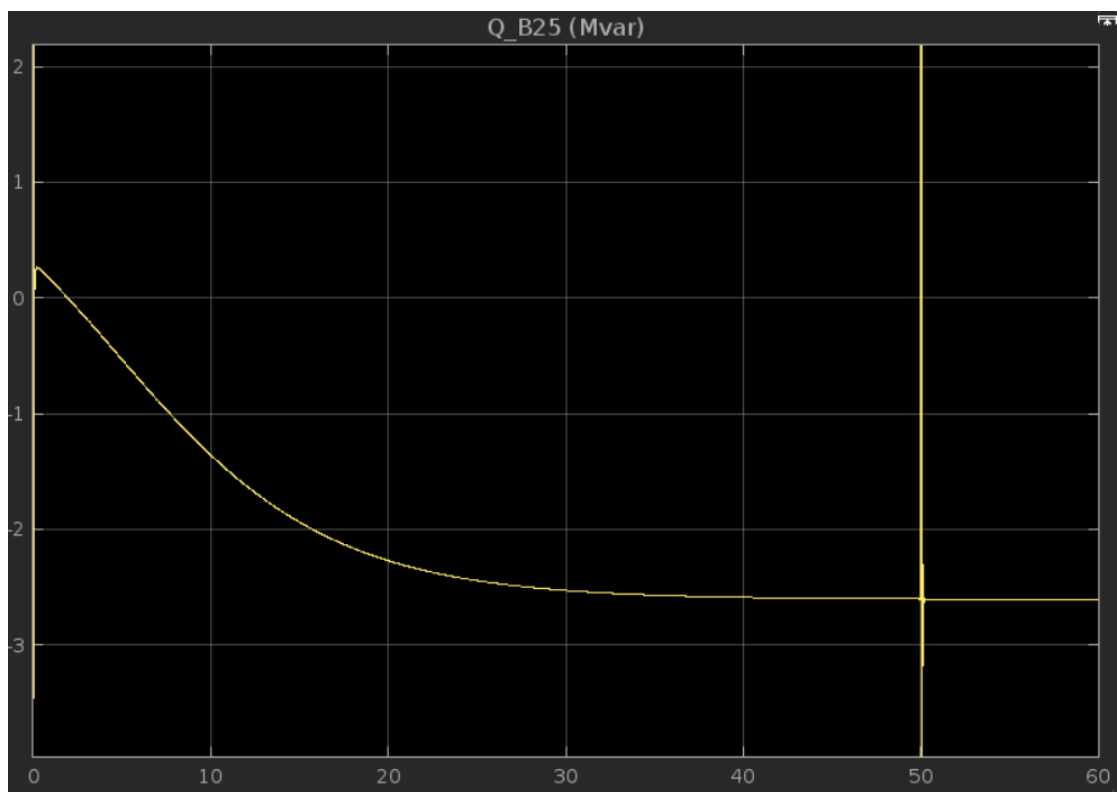
5.31 Η τάση στο ζυγό B26



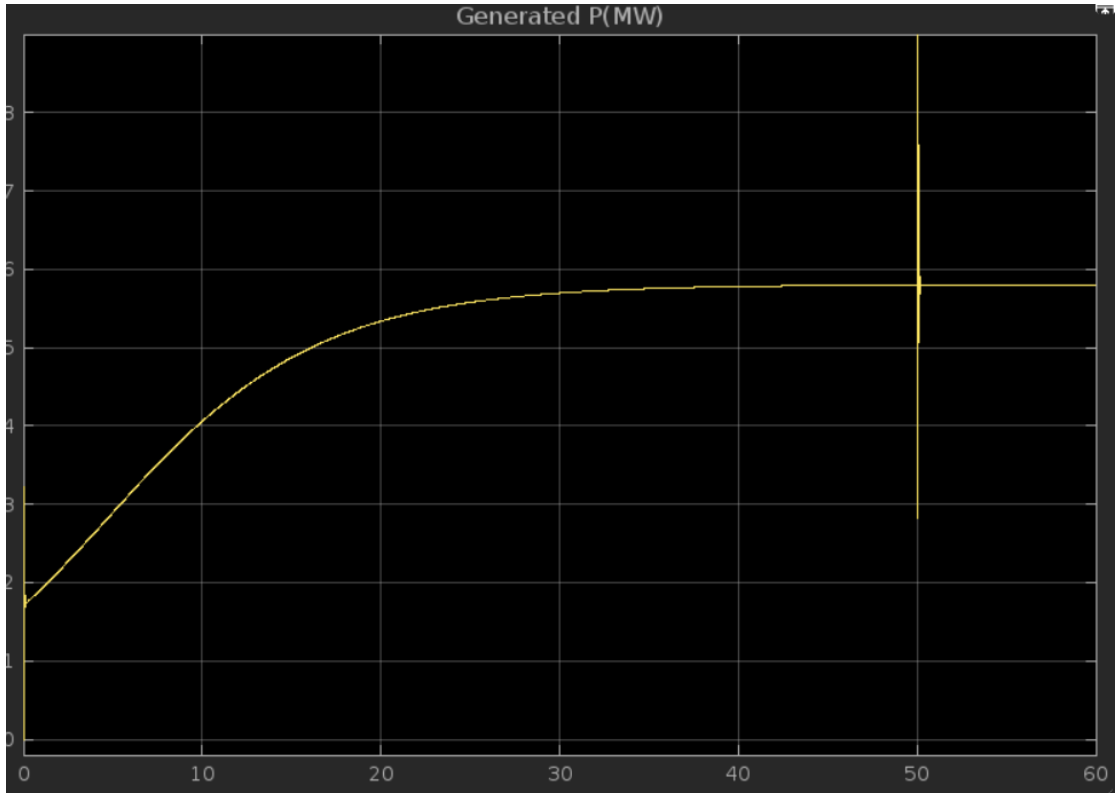
5.32 Η τάση στο ζυγό B575



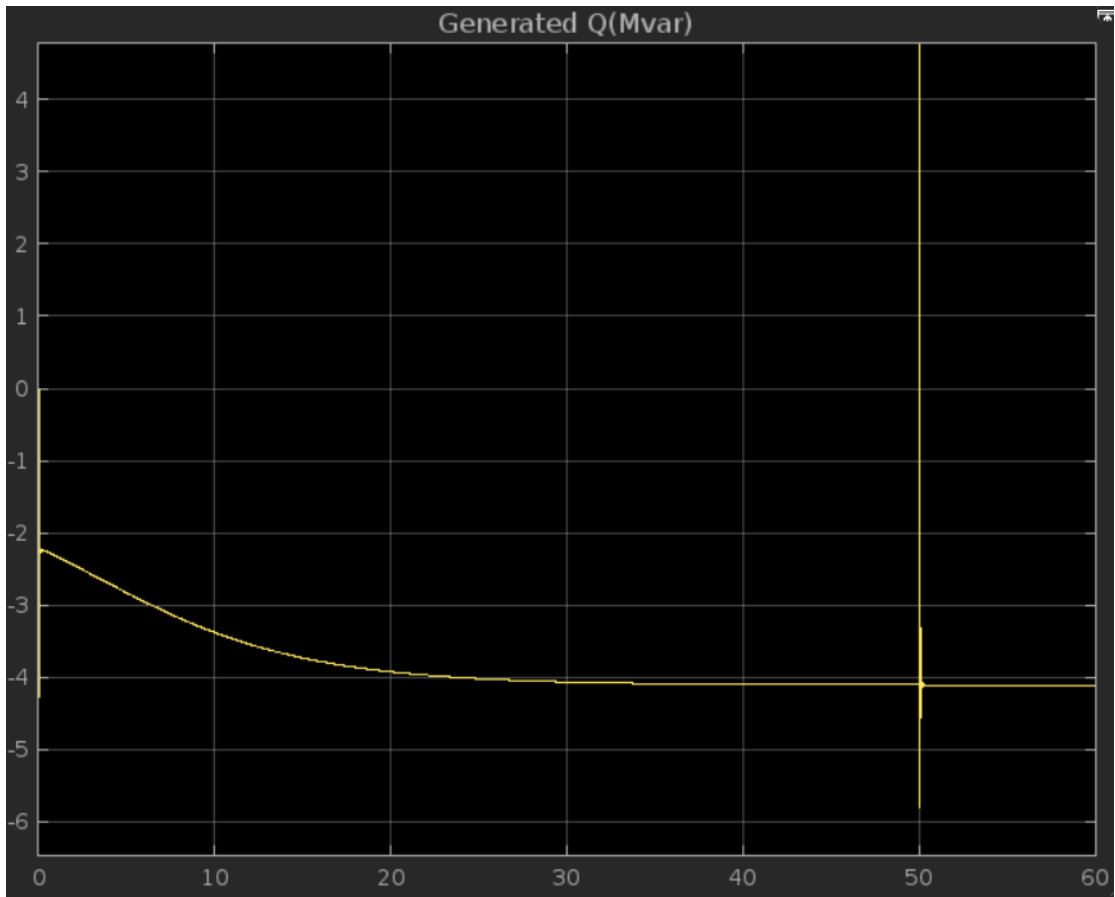
5.33 Η ενεργός ισχύς στο ζυγό B25



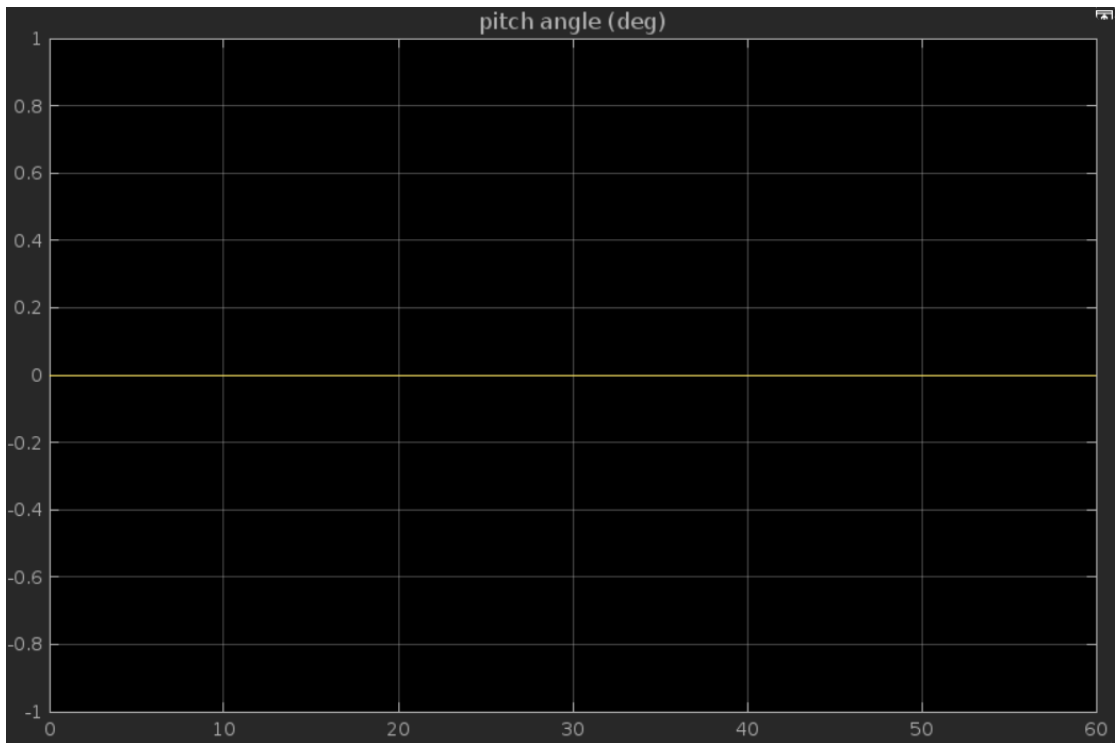
5.34 Η άεργος ισχύς στο ζυγό B25



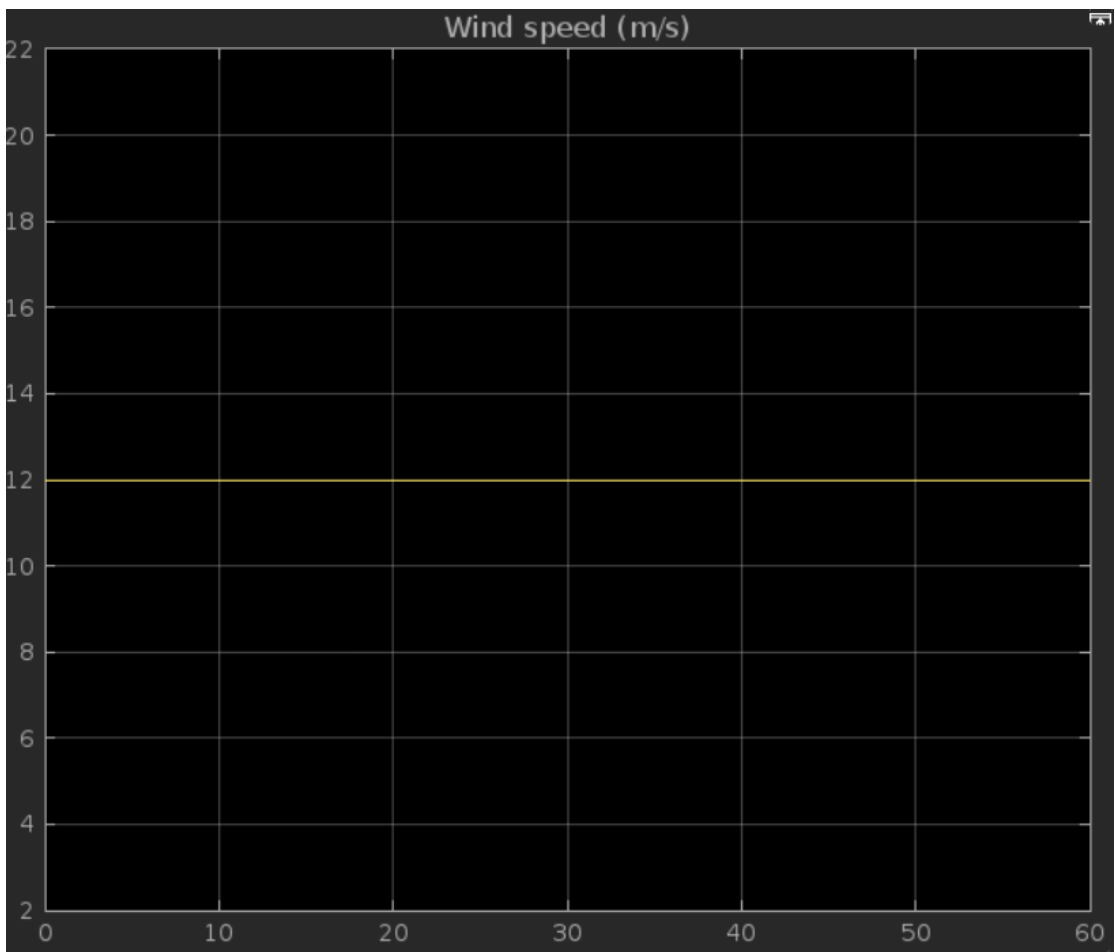
5.35 Η παραγόμενη ενεργός ισχύς



5.36 Η παραγόμενη άεργος ισχύς



5.37 Η γωνία βήματος

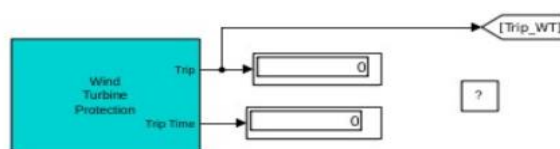


5.38 Η τιμή της ταχύτητας του ανέμου

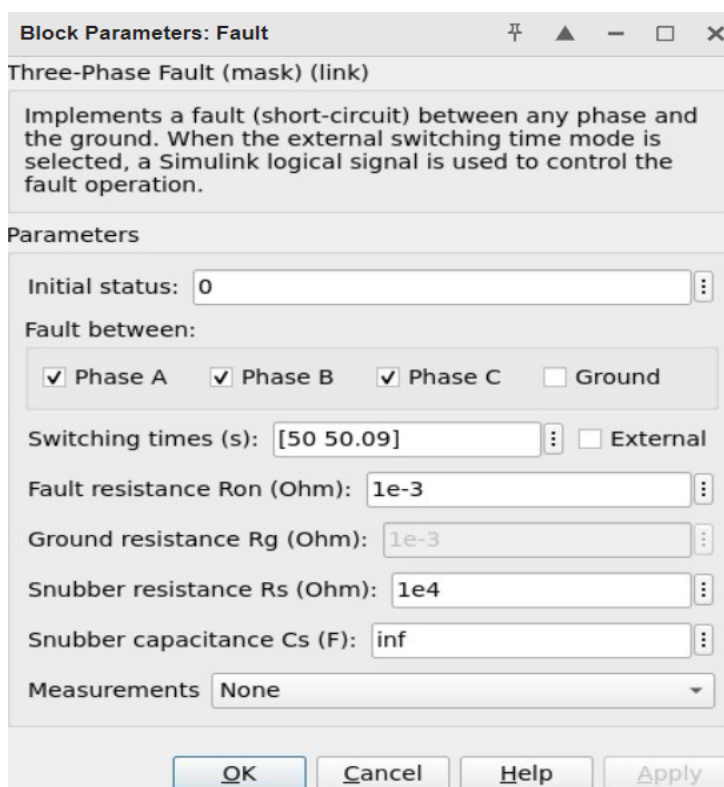
Όπως και στην περίπτωση με ιδανικές συνθήκες λειτουργίας δεν έχουν μεταβληθεί τα μεγέθη. Η μόνη αλλαγή είναι η μεταβατικές συνθήκες που αντιμετωπίζει το κάθε μέγεθος. Η τάση είναι ξανά ίδια μόνο που σταθεροποιείται μετά την εξομάλυνση των μεταβατικών φαινομένων σε μία σταθερή τιμή, η οποία είναι μειωμένη. Η ισχύς παραμένει σταθερή και μετά το σφάλμα. Η ενεργός ισχύς σταθεροποιείται στα 6 MW και η άεργος ισχύς σταθεροποιείται στα 4 Mvar περίπου.

5.4 Επιρροή της διάρκειας του σφάλματος στο σύστημα.

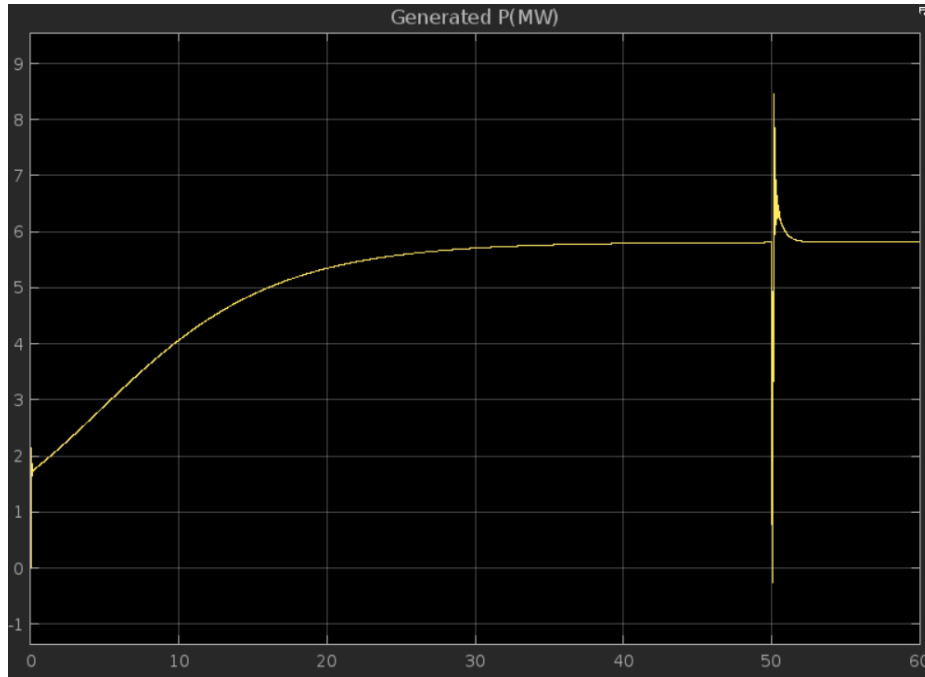
Εμφανίζονται παρακάτω το πως η διάρκεια του σφάλματος επηρεάζει το σύστημα και θέτει εκτός λειτουργίας ολόκληρη τη γραμμή:



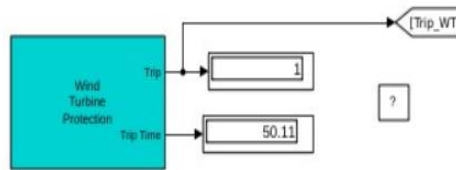
5.39 Ένδειξη σφάλματος σε ποιο χρονικό σημείο



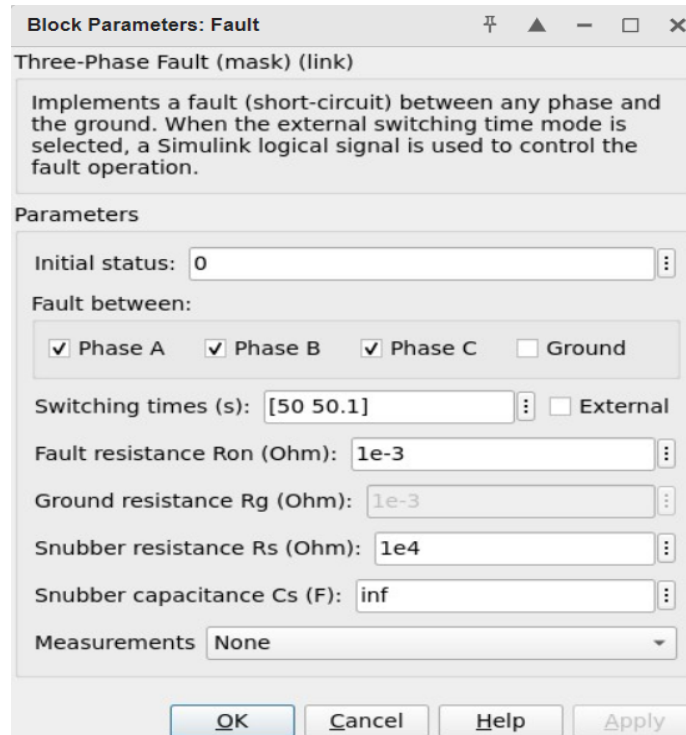
5.40 Διάρκεια σφάλματος



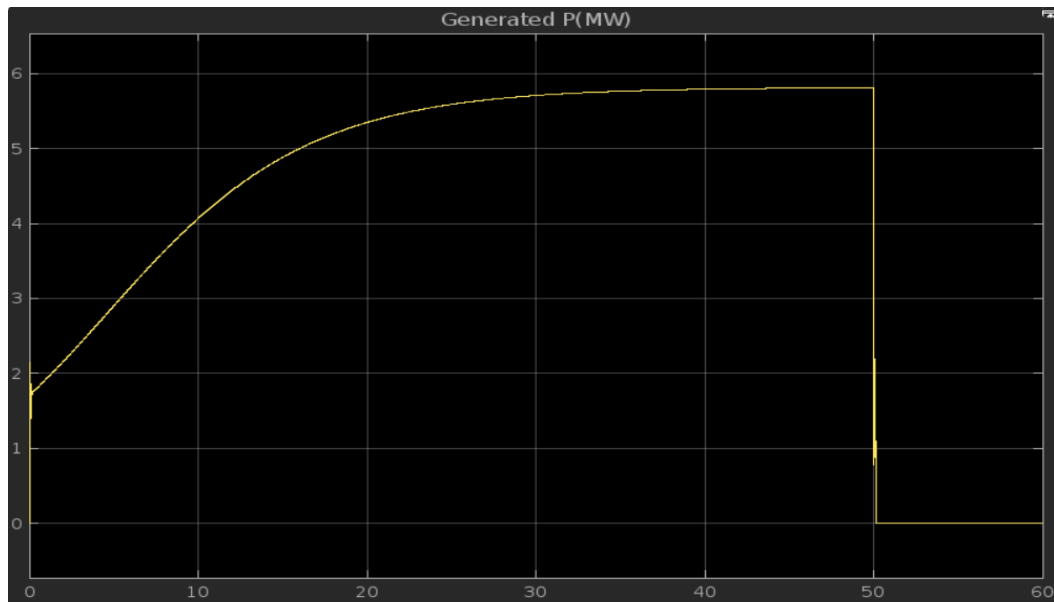
5.41 Αντίδραση συστήματος



5.42 Ένδειξη σφάλματος σε ποιο χρονικό σημείο



5.43 Διάρκεια σφάλματος



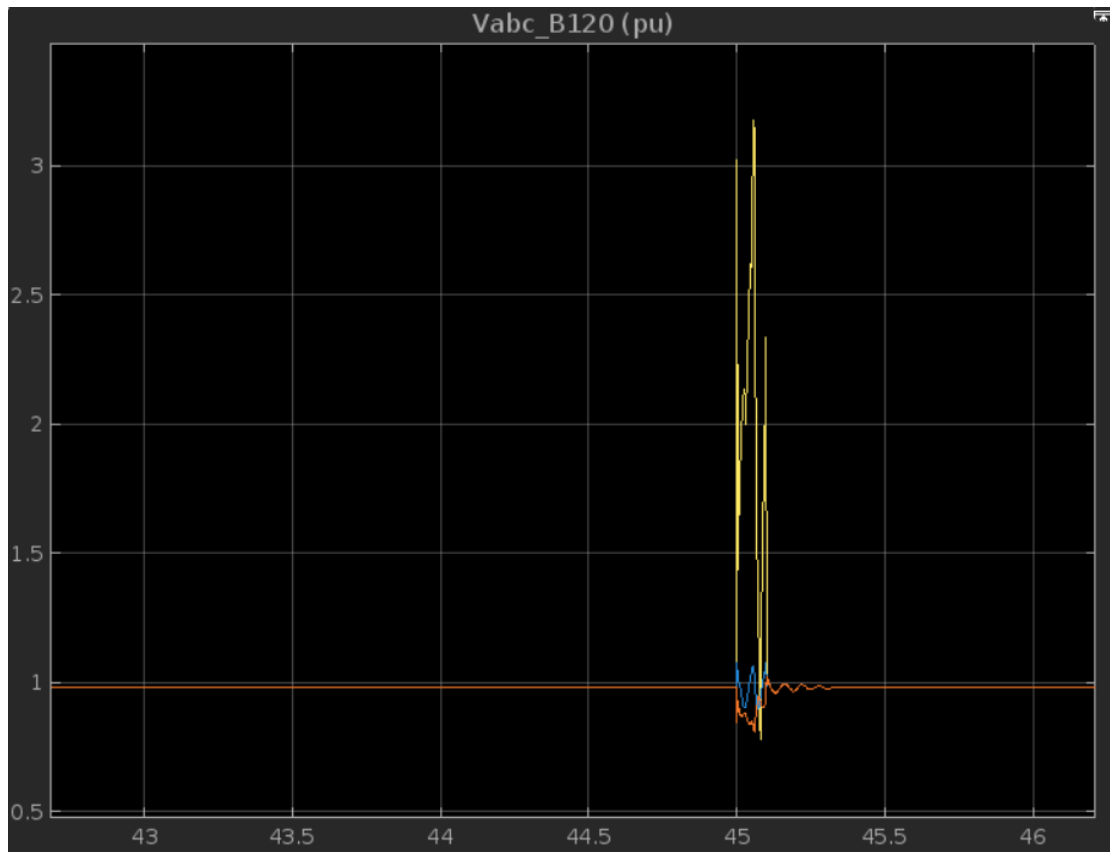
5.44 Αντίδραση συστήματος

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των παραπάνω «πειραμάτων» μπορεί να γίνει αντιληπτό το γεγονός ότι ο χρόνος για τη διάρκεια του σφάλματος δε μπορεί να ξεπερνάει τα 0,9 δευτερόλεπτα, διότι πάνω από το χρόνο αυτό το σύστημα βγαίνει εκτός της γραμμής. Συμπερασματικά λοιπόν, η μέγιστη διάρκεια σφάλματος που αντέχει το σύστημα είναι 0,9 δευτερόλεπτα χωρίς να υπάρξουν συνέπειες όπως να βγει εκτός γραμμής το σύστημα.

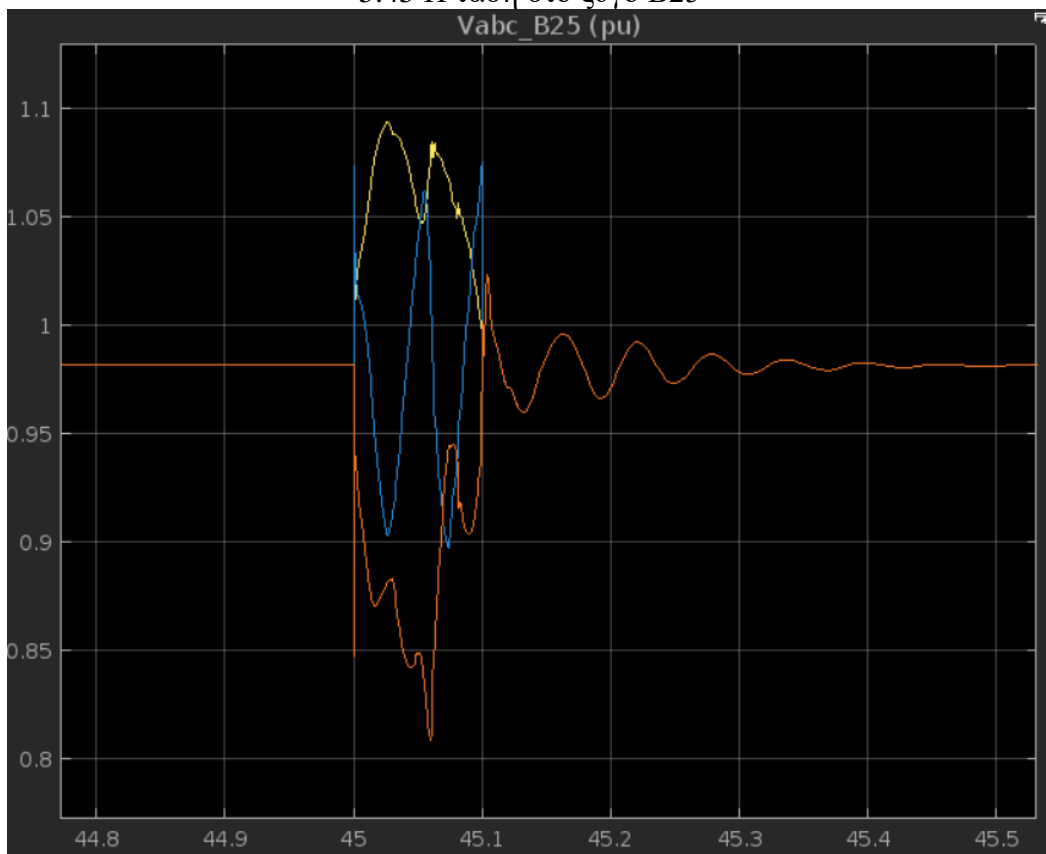
5.5 Σφάλματα με διακόπτη

Τελευταίος πειραματισμός πραγματοποιήθηκε με την κατασκευή ενός χρονικού διακόπτη. Ο διακόπτης αυτός είναι ικανός να θέτει εκτός λειτουργίας, για όσα δευτερόλεπτα θέσει ο χρήστης, όσες από τις 3 γραμμές χρειαστεί και να παρατηρηθεί η κατάσταση που θα βρεθεί το σύστημα. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα η γραμμή θα τεθεί εκτός για 0.1 δευτερόλεπτα και στη συνέχεια θα τεθούν εκτός δύο από τις τρεις φάσεις.

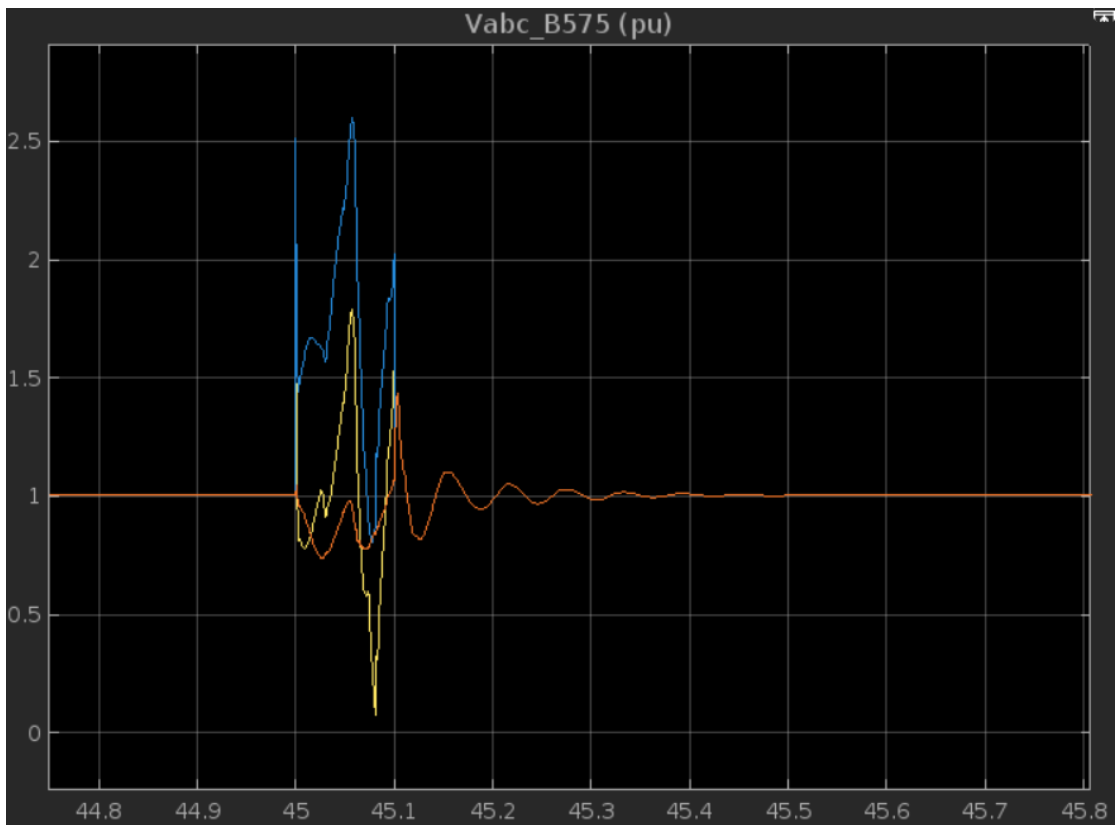
5.5.1 Θέτεται εκτός μία φάση για 0.1 δευτερόλεπτα.



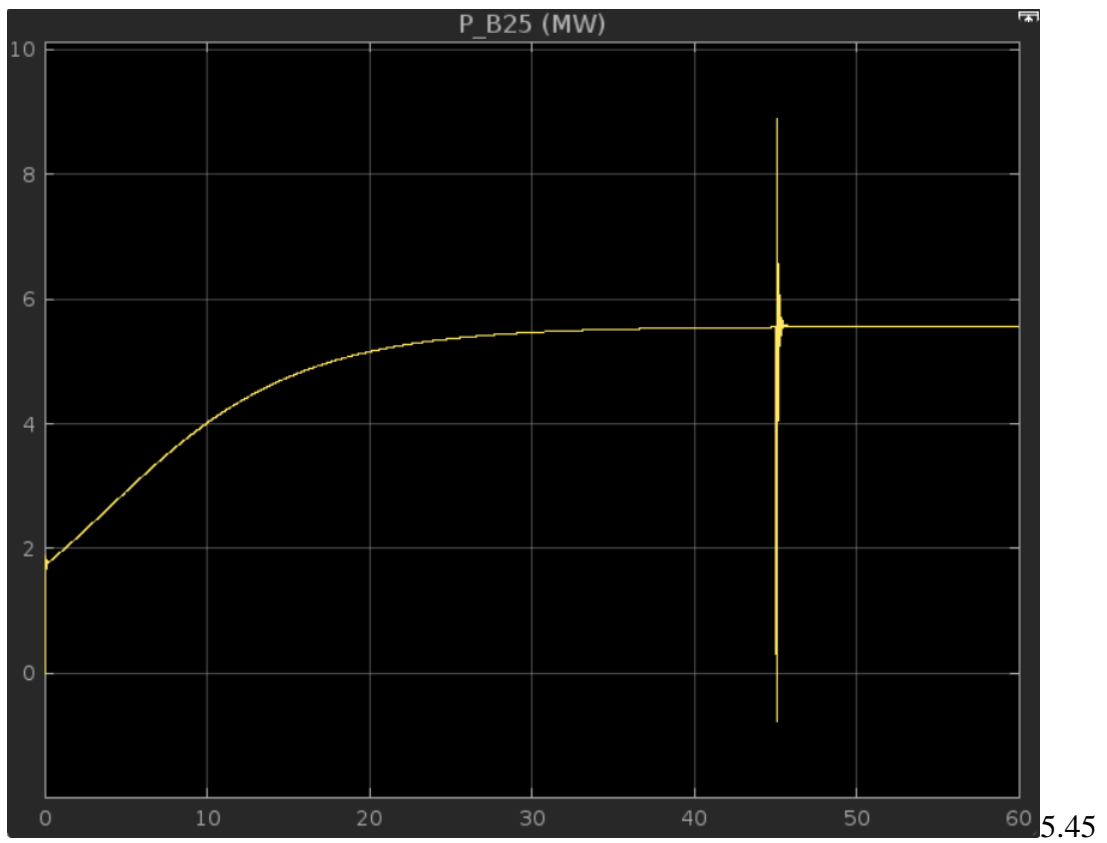
5.45 Η τάση στο ζυγό B25



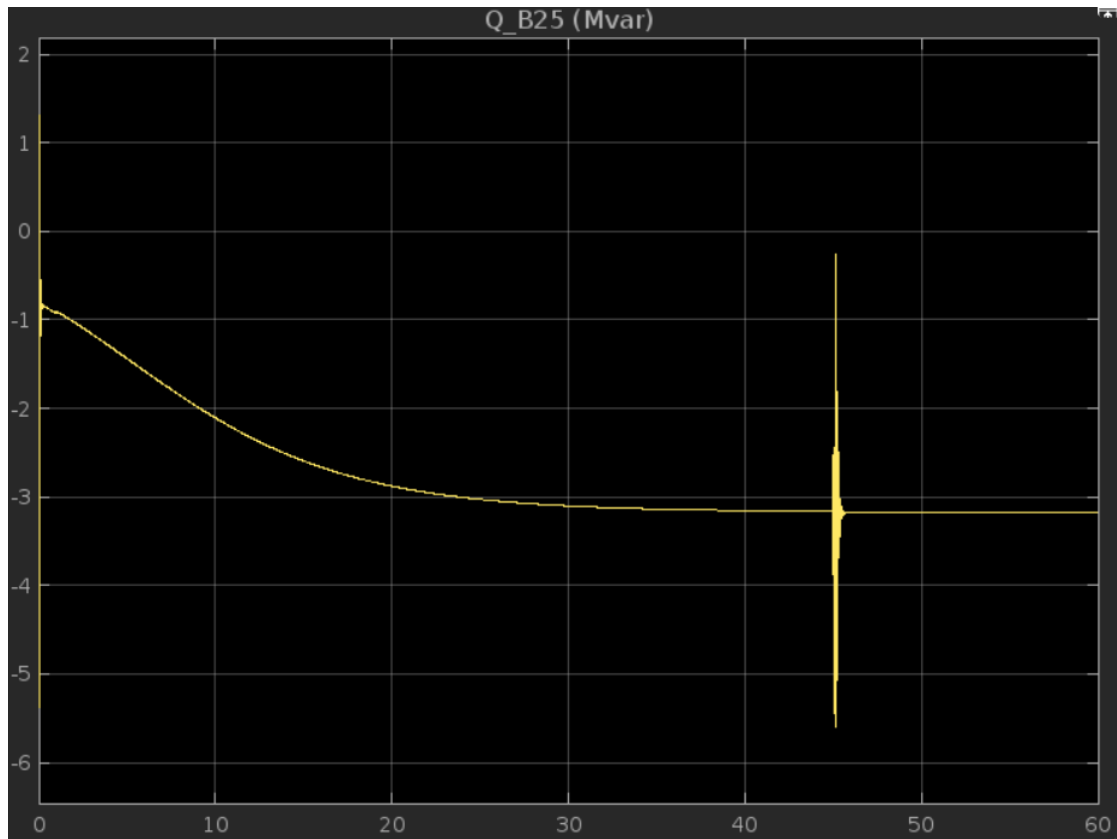
5.46 Η τάση στο ζυγό B26



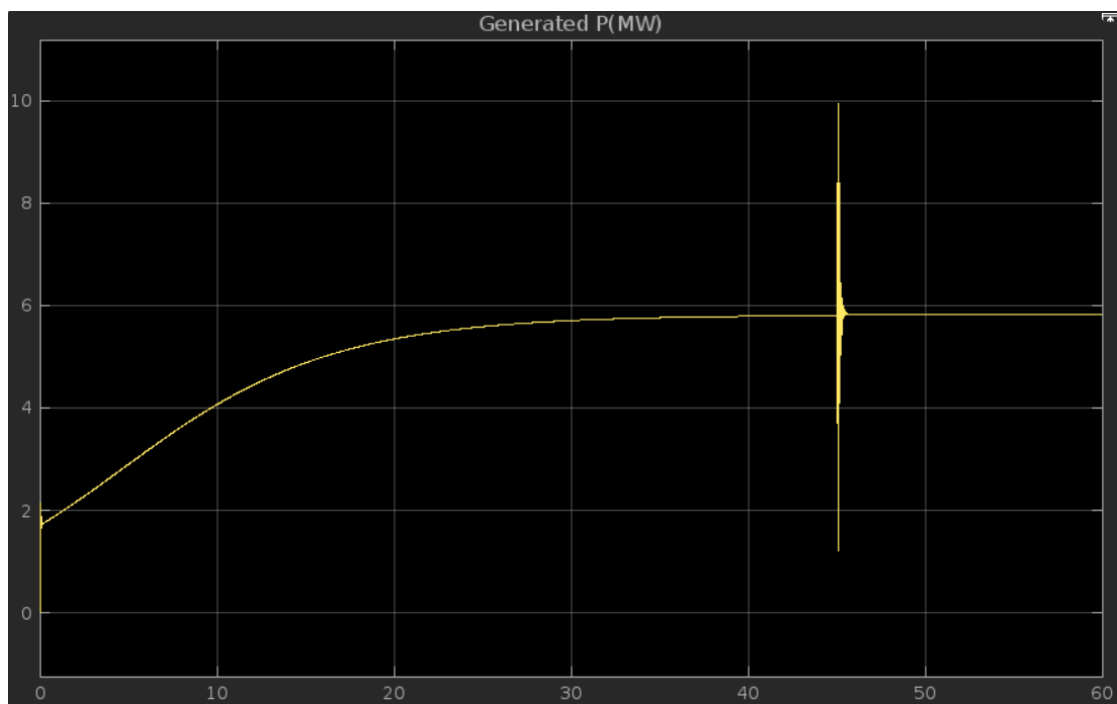
5.47 Η τάση στο ζυγό B575



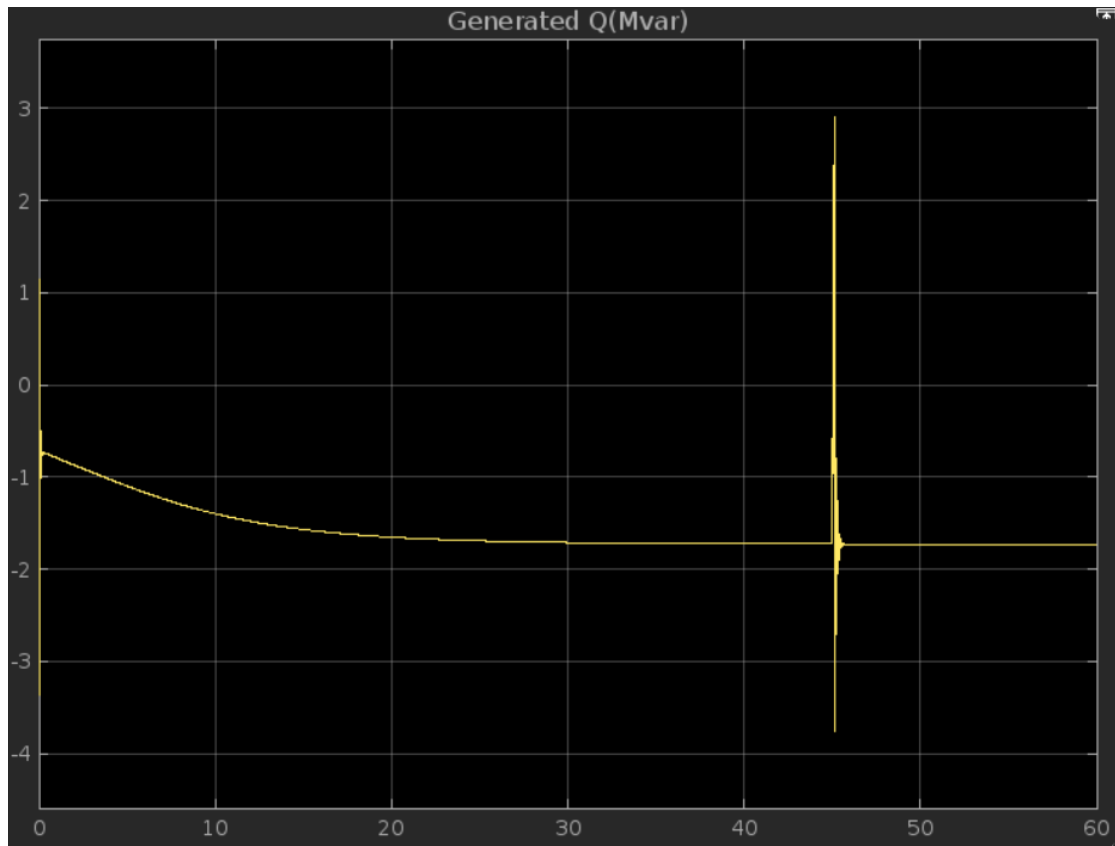
5.48 Η ενεργός ισχύς στο ζυγό B25



5.49 Η άεργος ισχύς στο ζυγό B25



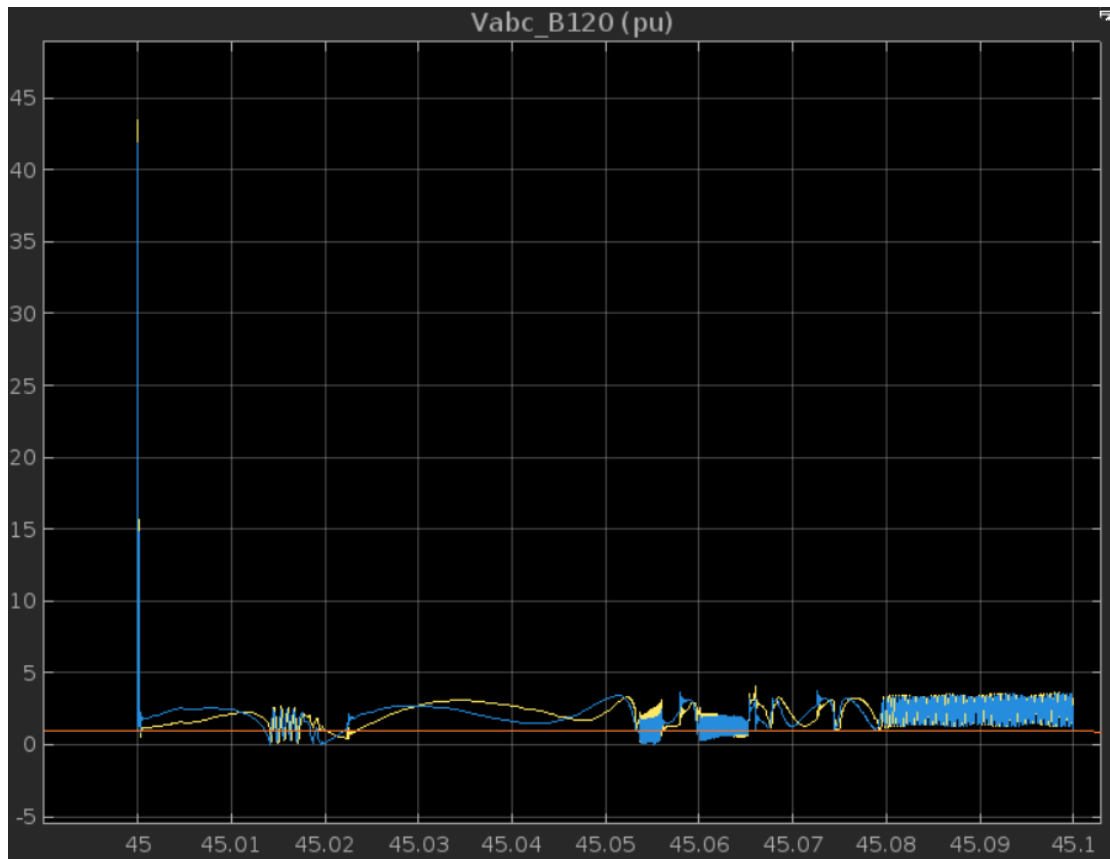
5.50 Η παραγόμενη ενεργός ισχύς



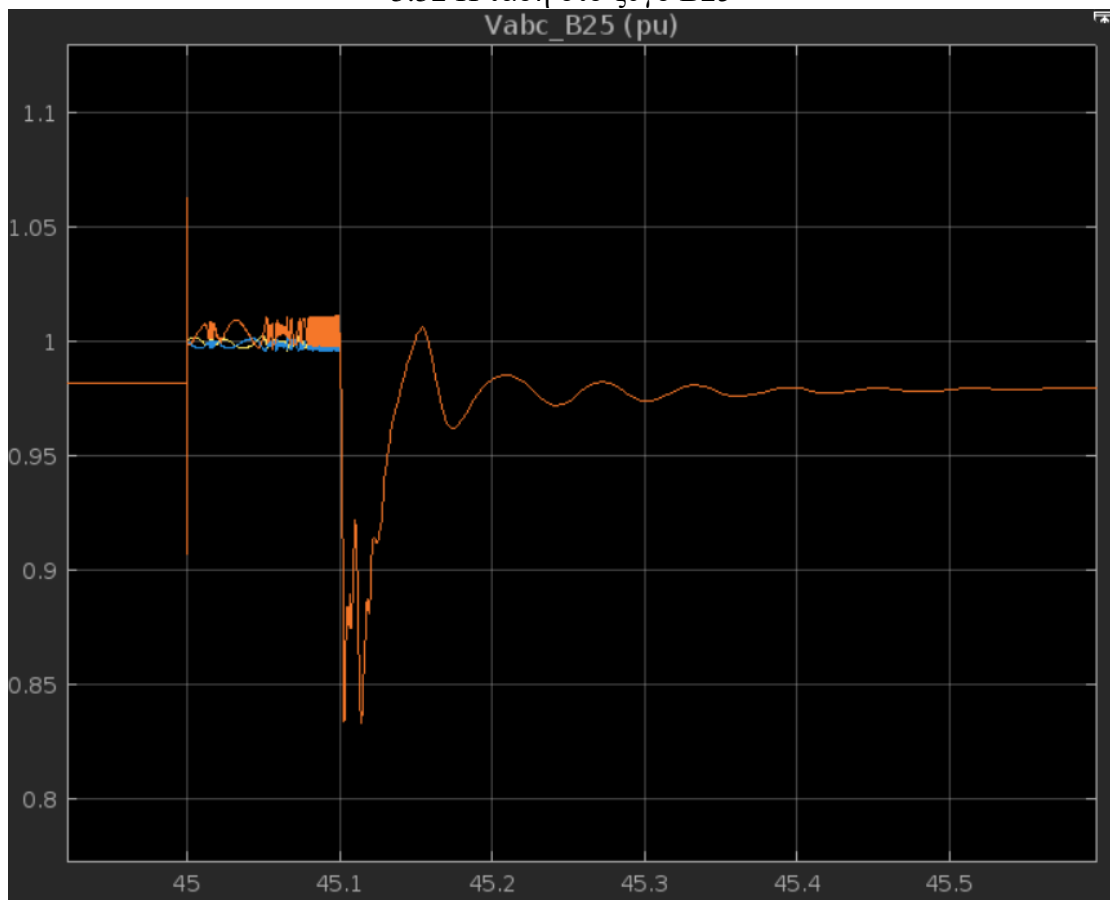
5.51 Η παραγόμενη άεργος ισχύς

Με την αποτύπωση των αποτελεσμάτων γίνεται αντιληπτό ότι και με την αφαίρεση της μιας φάσης από το σύστημα, δεν υπάρχει κάποια επιβάρυνση η οποία θα είναι αρκετή ώστε να βγει το πάρκο ανεμογεννητριών εκτός. Τα μεταβατικά φαινόμενα είναι έντονα κατά την αποσύνδεση της φάσης, με την τάση να έχει πτώση αλλά και ανύψωση. Με την επανασύνδεση της φάσης εξομαλύνεται στο σύστημα και συνεχίζει να δουλεύει όπως δουλεύει σε ιδανικές συνθήκες. Η ενεργός ισχύς είναι σταθερή στα 6MW χωρίς να επηρεάζεται από τα μεταβατικά φαινόμενα. Η άεργος στον ζυγό B25 δέχεται την μεγαλύτερη πτώση, γεγονός το οποίο σημαίνει ότι το σύστημα «ζορίζεται» και ζητά ενέργεια από το δίκτυο για να συνεχίσει να λειτουργεί με τιμή κοντά στα 3 MVar.

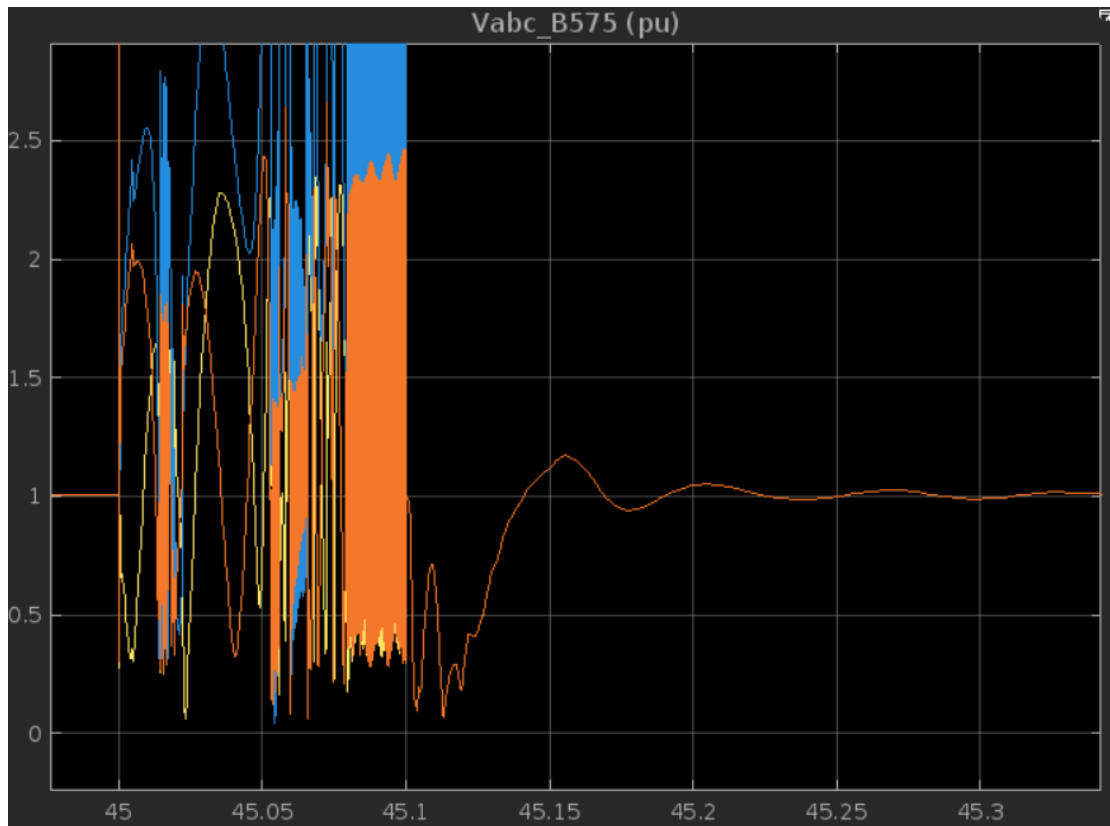
5.5.2 Θέτονται εκτός δύο φάσεις για 0.1 δευτερόλεπτα



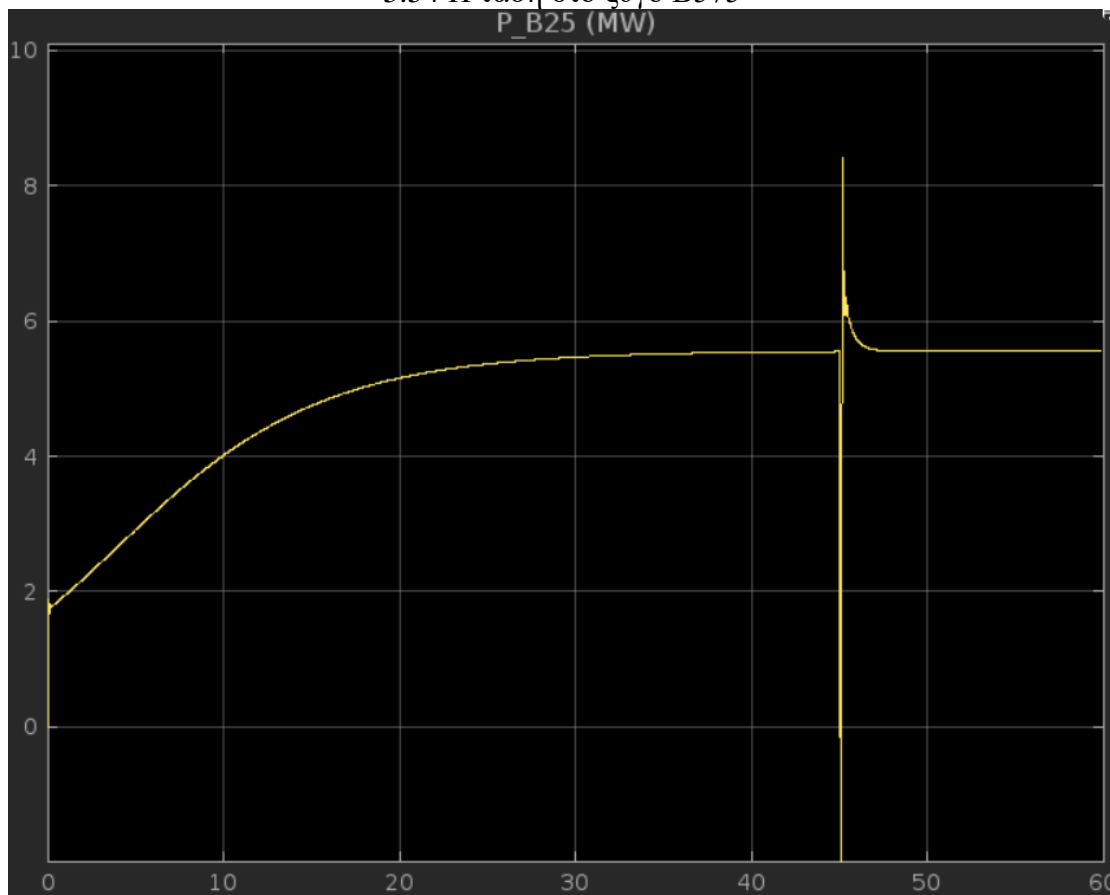
5.52 Η τάση στο ζυγό B25



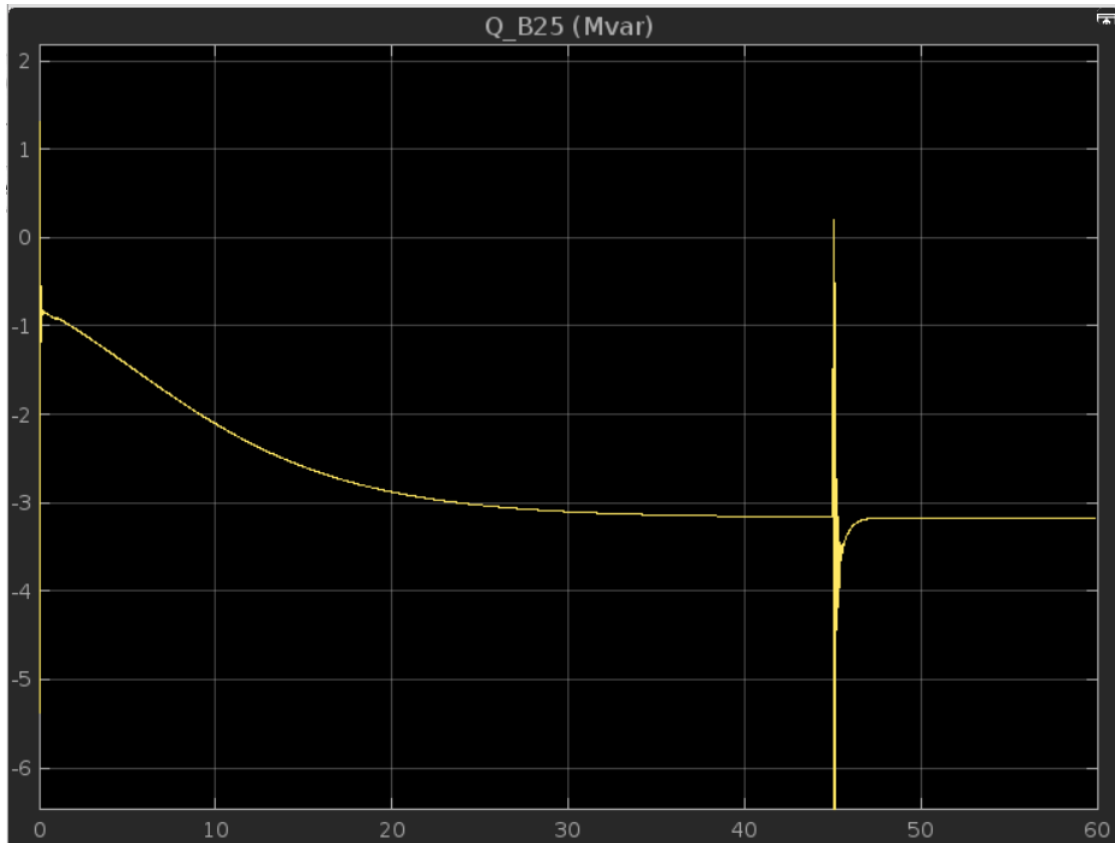
5.53 Η τάση στο ζυγό B26



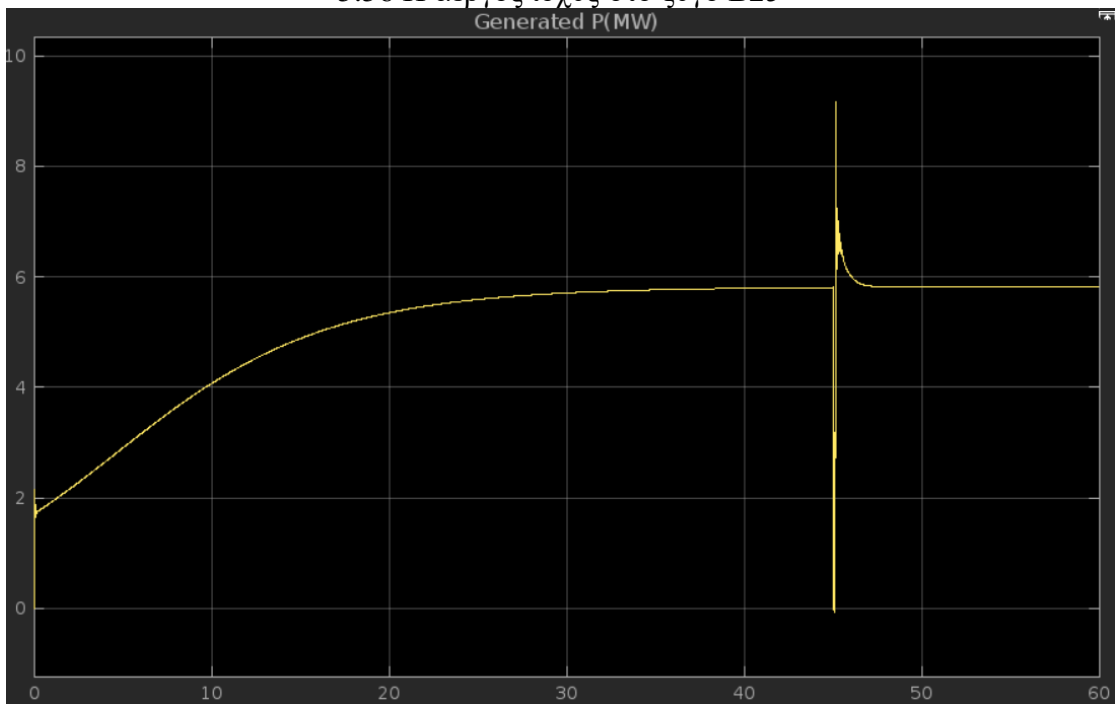
5.54 Η τάση στο ζυγό B575



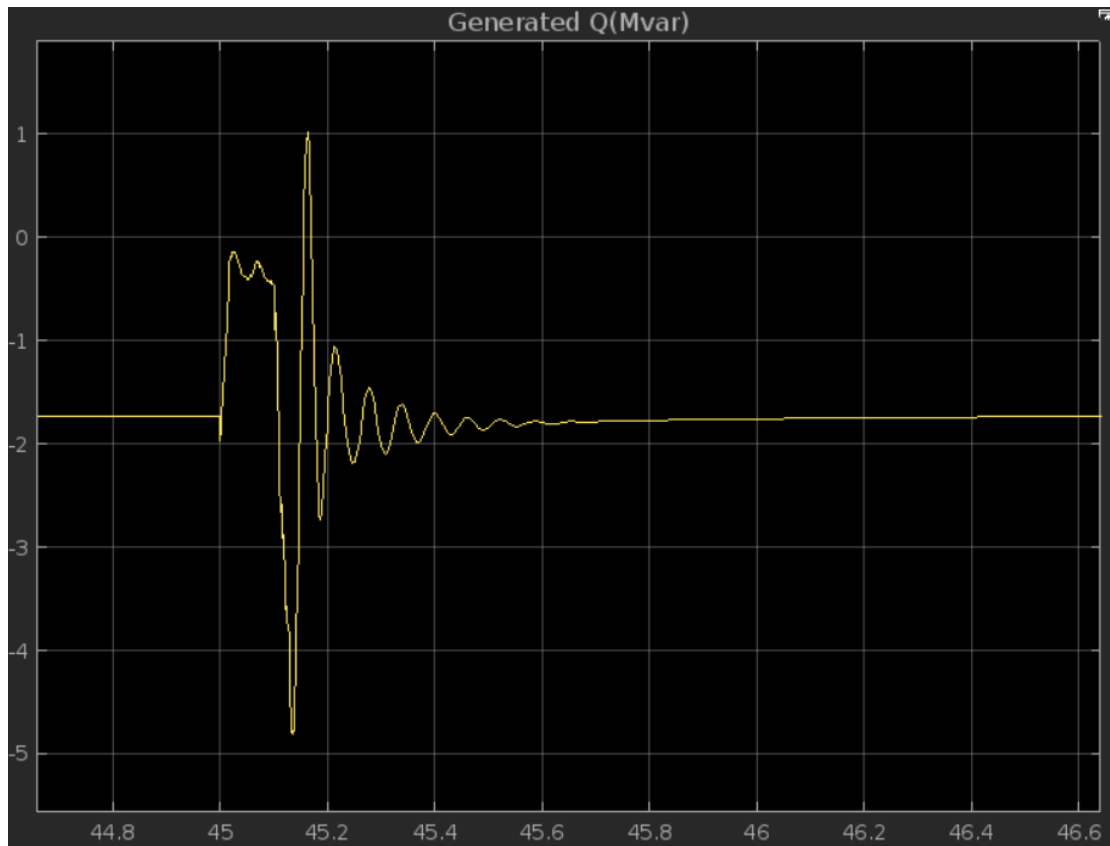
5.55 Η ενεργός ισχύς στο ζυγό B25



5.56 Η άεργος ισχύς στο ζυγό B25



5.57 Η παραγόμενη ενεργός ισχύς



5.58 Η παραγόμενη άεργος ισχύς

Όταν βγαίνουν εκτός γραμμής δύο από τις τρεις φάσεις, οι αλλαγές που παρατηρούνται στο σύστημα σε σχέση με το παράδειγμα που βγήκε εκτός η μία φάση, δεν είναι μεγάλες. Αρχικά, η τάση σε όλους του ζυγούς έχει την ίδια αντίδραση με το προηγούμενο παράδειγμα με τη μόνη διαφορά ότι για κλάσματα δευτερολέπτου σημειώνονται μεγαλύτερες κορυφές. Το γεγονός αυτό μπορεί να φανεί επικίνδυνο για το σύστημα αν έχει μεγαλύτερη διάρκεια, όμως για παρόν χρονικό διάστημα δεν επηρεάζεται. Η ενεργός ισχύς παραμένει ίδια και σταθερή και για τον ζυγό B25 αλλά και η παραγόμενη, ενώ η άεργος ισχύς παρόλο που είναι απαράλλαχτη για τον ζυγό B25, η παραγόμενη τιμή της σημειώνει μεγάλη σταθερότητα σε μικρή τιμή, εκτός των μεταβατικών φαινομένων που εμφανίζονται.

Συμπερασματικά, και στις δύο περιπτώσεις, είτε τεθεί μία φάση εκτός είτε τεθούν δύο φάσεις εκτός, το σύστημα θα έχει σχεδόν ίδια συμπεριφορά χωρίς κάποια περίπτωση να επηρεάζει το σύστημα περισσότερο από την άλλη.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

Στην εργασία που μελετήθηκε παρουσιάστηκε η μοντελοποίηση του αιολικού πάρκου 9MW και η λειτουργία του υπό μεταβατικών φαινομένων. Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε σύστημα με DFIG γεννήτρια.

Από τις προσομοιώσεις που έγιναν γίνεται άμεσα αντιληπτό το γεγονός ότι σε ένα πάρκο ανεμογεννητριών η καλύτερη συνθήκη λειτουργίας για μέγιστη αποδοτικότητα είναι η συνθήκη σταθερού άνεμου στην ονομαστική τιμή. Μέσω των δοκιμών στα κεφάλαια 5.2.1 και 5.2.2 στις οποίες η ανεμογεννήτρια δοκιμάστηκε σε αλλαγές της ταχύτητας του ανέμου από τα 8 μέτρα/δευτερόλεπτο στα 12 μέτρα/δευτερόλεπτο, τόσο σε εναέριο όσο και σε υπόγειο καλώδιο, παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά. Το σύστημα καταφέρνει να διατηρήσει την απόδοσή του με την απορρόφηση άεργου ισχύος. Στην περίπτωση του εναέριου καλωδίου, η ροή της άεργου ισχύος είναι μικρότερη από αυτήν της περίπτωσης του υπόγειου καλωδίου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην μεγάλη απόσταση που διανύουν τα καλώδια (20 km) αλλά και στην χωρητική συμπεριφορά που εμφανίζει το υπόγειο καλώδιο και κατ' επέκταση στην μαγνητική ροή που σχηματίζεται. Συμπέρασμα λοιπόν είναι ότι το εναέριο έχει καλύτερη συμπεριφορά στη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς η ανεμογεννήτρια απορροφά λιγότερη άεργο ισχύ και έχει μικρότερες απώλειες.

Στο κεφάλαιο 5.3 αναλύθηκε η επίδραση του τριφασικού σφάλματος στη σύστημα αλλά και στην τάση. Οι συνθήκες λειτουργίας για την ανεμογεννήτρια είναι ιδανικές μέχρι μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή που επέρχεται το τριφασικό σφάλμα. Το σφάλμα έχει διάρκεια 0.09 δευτερόλεπτα, καθώς όπως θα δούμε είναι το ανώτατο όριο χρονικής διάρκειας που το σύστημα αντέχει το σφάλμα. Μετά το τριφασικό σφάλμα, που μελετήθηκε και για την περίπτωση του εναέριου αλλά και για την περίπτωση του υπόγειου καλωδίου, παρατηρήθηκαν οι επιπτώσεις στο σύστημα. Οι αλλαγές ήταν ίδιες και για τα δύο είδη καλωδίου. Πιο συγκεκριμένα, η τάση υφίσταται μία διαταραχή στην τιμή της, επηρεαζόμενη από τα μεταβατικά φαινόμενα. Με την εξομάλυνση της, επέρχεται η ισορροπία και η σταθεροποίηση σε πιο χαμηλά επίπεδα. Για την ισχύ, την ενεργό αλλά και την άεργο, οι τιμές είναι παρόμοιες για τα δύο παραδείγματα. Η ενεργός έχει μία σταθερή άνοδο, η οποία στιγμιαία αναταράσσεται λόγω του σφάλματος, αλλά με το πέρας των μεταβατικών φαινομένων σταθεροποιείται στην τιμή των 6 MW. Παρόμοια είναι η κατάσταση και για την άεργο ισχύς. Η πορεία της είναι

«πτωτική» όσο απορροφά το σύστημα. Την χρονική τη στιγμή του σφάλματος διαταράσσεται η ισορροπία της και όταν επέλθει η ηρεμία, σταθεροποιείται στην τιμή των -4MVar περίπου. Συμπέρασμα τις παραπάνω εξομοίωσης είναι ότι σε συνθήκες τριφασικού σφάλματος, το σύστημα αντέχει να δεχτεί σφάλμα έως 0.09 δευτερόλεπτα προτού αποσυνδεθούν οι ανεμογεννήτριες. Η επίδοση και η απόδοση του συστήματος των ανεμογεννητριών παραμένει ίδια είτε για εναέριο είτε για υπόγειο καλώδιο.

Μελετήθηκε επίσης, η αντοχή στη χρονική διάρκεια του σφάλματος. Παρουσιάστηκε η μελέτη που πραγματοποιήθηκε, και σαν συμπέρασμα απορρέει ότι η μέγιστη χρονική διάρκεια σφάλματος δεν θα πρέπει να παρεμβαίνει την τιμή των 0.09 δευτερολέπτων. Αν η διάρκεια είναι μεγαλύτερη τότε το σύστημα «βγάζει» εκτός το σύνολο των ανεμογεννητριών και το σύστημα μηδενίζει.

Τέλος, έγινε μελέτη για την απουσία των φάσεων στο σύστημα, αρχικά για την απουσία μίας φάσης και ύστερα για την απουσία δύο φάσεων. Η διάρκεια της απουσίας ήταν για 0.1 δευτερόλεπτα και προσομοιώθηκε για εναέριο καλώδιο. Η τάση του συστήματος και στις δύο περιπτώσεις δέχεται στιγμιαία καταπόνηση, αλλά κατά την σταθεροποίηση του συστήματος σταθεροποιείται και η τάση. Η διαφορά δεν εντοπίζεται στις τελικές τιμές της τάσης ή της ισχύος, καθώς είναι ίδιες, αλλά εντοπίζεται στις πιο έντονες κορυφές που σημειώνει η τάση κατά την απουσία των δύο φάσεων. Η συνθήκη αυτή ίσως είναι και επικίνδυνη για το σύστημα, αλλά το χρονικό διάστημα που συμβαίνει είναι τόσο μικρό που δεν προλαβαίνει να αποβεί μοιραίο.

Βιβλιογραφία

- [1] *Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας*. (2024). Allaboutenergy.gr.
<https://www.allaboutenergy.gr/Piges23.html>
- [2] <http://www.hellasres.gr/greek/giati-ape/giati-ape.htm>
- [3] <http://www.allaboutenergy.gr/Piges23.html>
- [4] <https://novavolt.gr/blogs/ananeosimes-piges-energeias/ti-einai-ananeosimes-piges-energeias>
- [5] Renewable Energy Edited by Roland Wengenmayr and Thomas Bührke
- [6] <https://eletaen.gr/deltio-typou-i-statistiki-tis-aiolikis-energeias-stin-elladgia-to-2023/>
- [7]
<https://greenagenda.gr/%CF%80%CE%B5%CF%81%CE%B9%CE%B2%CE%B1%CE%BB%CE%BB%CE%BF%CE%BD%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AD%CF%82-%CE%B5%CF%80%CE%B9%CF%80%CF%84%CF%8E%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82-%CE%B1%CF%80%CF%8C-%CF%84%CE%B7%CE%BD-%CE%BA/>
- [8] <https://www.electrical4u.com/working-principle-of-wind-turbine/>
- [9] https://eclass.uop.gr/modules/document/file.php/1022/%CE%91%CE%A0%CE%95%20%CE%92%CE%99%CE%92%CE%9B%CE%99%CE%9F_2.pdf
- [10]
http://www.pspa.eu/images/files/ergasies_mathiton/technologia/agymn/2014-15/dimisianou.pdf
- [11] <http://artemis.library.tuc.gr/DT2000-0122/DT2000-0122.pdf>
- [12]
https://ikee.lib.auth.gr/record/290630/files/%CE%91%CE%BD%CE%AC%CE%BB%CF%85%CF%83%CE%B7%2C_%CE%9C%CE%BF%CE%BD%CF%84%CE%B5%CE%BB%CE%BF%CF%80%CE%BF%CE%AF%CE%B7%CF%83%CE%B7_%CE%BA%CE%B1%CE%B9_%CE%88%CE%BB%CE%B5%CE%B3%CF%87%CE%BF%CF%82_DFIG.pdf
- [13]
<http://artemis.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/bitstream/123456789/13626/1/DT2017-0286.pdf>
- [14] Γκιαουράκης, Δ. (n.d.). “Διερεύνηση Λειτουργικής Συμπεριφοράς ενός Συστήματος Μετατροπής Αιολικής Ενέργειας σε Ηλεκτρική Αποτελούμενου από Ασύγχρονη

Γεννήτρια Διπλής Τροφοδοσίας και Ηλεκτρονικούς Μετατροπείς Ισχύος.” Retrieved October 22, 2024, from <https://www.iene.gr/energy-development2010/articlefiles/PosterSession/giaourakis.pdf>

[15] J.F. MANWELL, J.G. MCGOWAN, A.L. ROGERS “Wind Energy Explained, Theory, Design and Application”
https://ee.tlu.edu.vn/Portals/0/2018/NLG/Sach_Tieng_Anh.pdf

[16] “Renewable and Efficient Electric Power Systems”
Gilbert M. Masters Stanford University
http://www.a-ghadimi.com/files/Courses/Renewable%20Energy/REN_Book.pdf

[17] Renewable Energy Edited by Roland Wengenmayr and Thomas Bührke
<https://www.perlego.com/book/1001148/renewable-energy-sustainable-energy-concepts-for-the-energy-change-pdf>

[18] Συνέντευξη — Παραγωγοί-καταναλωτές και ενεργειακή κρίση: η συμβολή των πολιτών στην ενεργειακή μετάβαση της Ευρώπης. (2014). European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/el/articles/synteneyksi-2014-paragogoi-katanalotes-kai>

[19] Ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές | Θεματολογικά δελτία για την Ευρωπαϊκή Ένωση | Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο. (2024, February 29). Europa.eu.
<https://www.europarl.europa.eu/factsheets/el/sheet/70/%CE%B5%CE%BD%CE%B5%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1-%CE%B1%CF%80%CE%BF-%CE%B1%CE%BD%CE%B1%CE%BD%CE%B5%CF%89%CF%83%CE%B9%CE%BC%CE%B5%CF%82-%CF%80%CE%B7%CE%B3%CE%B5%CF%82>

[20] Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. (2024). Allaboutenergy.gr.
<https://www.allaboutenergy.gr/Piges23.html>

[21] Κάτακόρυφη Ανεμογεννήτρια / Ανεμογεννήτρια Κατακόρυφου Αξονα. (2024). Windturbinestar.com. <https://www.windturbinestar.com/Katakoryfi--Anemogenni-tria-Anemogenni-tria-Katakoryfou-Axona.html>

[22] Ανεμογεννήτριες και τύποι ανεμογεννητριών όλα όσα θέλετε να ξέρετε. (n.d.). ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ-ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ-Eshops.gr. <https://www.eshops.gr/typoi-anemogennitrias/>