



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Μεταβατική Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας
με τη Συμμετοχή Αιολικών Πάρκων**

Διπλωματική Εργασία

Αρβανιτίδης Αθανάσιος Ιωάννης

Επιβλέπων: Μπαργιώτας Δημήτριος

Βόλος 2020



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

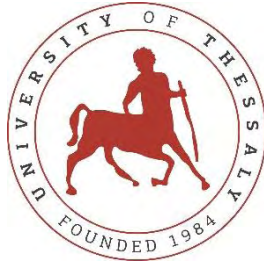
**Μεταβατική Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας
με τη Συμμετοχή Αιολικών Πάρκων**

Διπλωματική Εργασία

Αρβανιτίδης Αθανάσιος Ιωάννης

Επιβλέπων: Μπαργιώτας Δημήτριος

Βόλος 2020



UNIVERSITY OF THESSALY

SCHOOL OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

**Transient Stability Analysis of Power Systems with the
Participation of Wind Parks**

Diploma Thesis

Arvanitidis Athanasios Ioannis

Supervisor: Bargiotas Dimitrios

Volos 2020

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά του γονείς μου που έδειξαν την αμέριστη στήριξή τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου και μου προσέφεραν τις απαραίτητες αρετές και αξίες που διέπουν τη ζωή μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δημήτριο Μπαργιώτα για την δημιουργική μας συνεργασία, για την πολύτιμη καθοδήγησή του και για το εφόδια που μου μετέδωσε, ώστε να συνεχίσω με επιμονή και υπομονή το δρόμο της γνώσης και της μόρφωσης.

Τις ευχαριστίες μου εκφράζω και στους καθηγητές Ελευθέριο Τσουκαλά και Ασπασία Δασκαλοπούλου που δέχτηκαν να είναι μέλη της τριμελούς επιτροπής αξιολόγησης της διπλωματικής μου εργασίας.

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ

«Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής».

Ο Δηλών

Αρβανιτίδης Αθανάσιος Ιωάννης.

Ιούνιος 2020.

Περίληψη

Η παραγωγή, η μεταφορά και η αξιοποίηση της ηλεκτρικής ενέργειας παραμένουν ένας από τους πιο απαιτητικούς και συναρπαστικούς τομείς στην επιστήμη του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού. Οι εκπληκτικές τεχνολογικές εξελίξεις της εποχής μας εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από μια ασφαλή, αξιόπιστη και οικονομική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα τελευταία χρόνια, οι αυξανόμενες τιμές των καυσίμων και οι ανησυχίες σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου έχουν προωθήσει ένα νέο ενδιαφέρον για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Πιο συγκεκριμένα, η αιολική ενέργεια, σε σχέση με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, απαιτεί χαμηλότερες επενδύσεις και χρησιμοποιεί μια φυσική πηγή ενέργειας που είναι συνήθως διαθέσιμη παντού και ιδιαίτερα χρησιμοποιήσιμη στις εύκρατες ζώνες, εκεί όπου βρίσκονται οι περισσότερες βιομηχανικές χώρες. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετάται η συμπεριφορά ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας 9 ζυγών κατά τη διείσδυση ανεμογεννητριών με επαγωγικές γεννήτριες διπλής τροφοδοσίας, δηλαδή γεννήτριες όπου η τάση στον στάτη εφαρμόζεται απευθείας από το δίκτυο, ενώ η τάση στον ρότορα δημιουργείται από το μετατροπέα ισχύος. Στη μελέτη, εξετάζεται λεπτομερώς η ικανότητα του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας να διατηρήσει τη μεταβατική του ευστάθεια κατά την εμφάνιση τριφασικών στερεών βραχυκυκλωμάτων και προσδιορίζεται ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισής τους με την παρουσία ή μη των ανεμογεννητριών. Τέλος, παρουσιάζονται συνοπτικά τα συμπεράσματα από την παραπάνω μελέτη και αξιολογούνται τα οφέλη από τη διείσδυση ανεμογεννητριών στα συμβατικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

Abstract

The generation, delivery, and utilization of electric power and energy remain one of the most challenging and exciting fields of Electrical Engineering. The astounding technological developments of our age are highly dependent upon a safe, reliable, and economic supply of electric power. In recent years, rising fuel prices and concerns about the environmental impact of greenhouse gas emissions have promoted a renewed interest in the production of electrical energy from renewable sources and also from the wind power. This type of energy, with respect to other renewable energies, requires lower investments and uses a natural energy source usually available everywhere and particularly usable in the temperate zones, that is where most of the industrialized countries are. In my thesis, the behaviour of a 9-bus electrical power system during the penetration of wind turbines with doubly fed induction generators is studied, i.e. generators where the voltage in the stator is applied directly by the mains, while the voltage in the rotor is created by the converter. The study examines in detail the ability of the power grid to maintain its transient stability during the occurrence of three-phase solid short circuits and determines the critical clearing time with the presence or absence of wind turbines. Finally, the conclusions from the above study are summarized and the benefits from the penetration of wind turbines in conventional power systems are evaluated.

Περιεχόμενα

| | |
|---|-----|
| Περίληψη..... | vi |
| Abstract | vii |
| Κεφάλαιο 1 | 10 |
| Εισαγωγή | 10 |
| 1.1 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας | 10 |
| 1.2 Δομή των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας..... | 11 |
| 1.3 Έλεγχος στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας | 13 |
| 1.4 Σύγχρονες και μελλοντικές τάσεις | 14 |
| Κεφάλαιο 2 | 17 |
| Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας..... | 17 |
| 2.1 Ανάλυση Ροής Φορτίου..... | 17 |
| 2.1.1 Μέθοδος Newton – Raphson | 19 |
| 2.1.2 Μέθοδος Gauss - Seidel..... | 20 |
| 2.2 Βραχυκυκλώματα..... | 21 |
| 2.2.1 Συμμετρικές συνιστώσες..... | 22 |
| 2.2.2 Ανάλυση συμμετρικών βραχυκυκλωμάτων..... | 27 |
| 2.2.2.a Τριφασικό συμμετρικό βραχυκύκλωμα – 3 Phase Symmetric Fault..... | 27 |
| 2.2.3 Ανάλυση μη συμμετρικών σφαλμάτων | 28 |
| 2.2.3.a Μονοφασικό βραχυκύκλωμα με τη γη – Single Line to Ground Fault | 28 |
| 2.2.3.b Διφασικό βραχυκύκλωμα – Line to Line Fault..... | 30 |
| 2.2.3.c Διφασικό βραχυκύκλωμα με γη – Double Line to Ground | 31 |
| 2.3 Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας | 33 |
| 2.3.1 Ευστάθεια τάσης..... | 35 |
| 2.3.2 Ευστάθεια συχνότητας..... | 35 |
| 2.3.3 Μεταβατική ευστάθεια..... | 36 |
| 2.3.3.a Η εξίσωση ταλάντωσης..... | 37 |
| 2.3.3.b Σχέση μεταξύ ισχύος και γωνίας..... | 39 |
| 2.4 Μέθοδοι ανάλυσης της μεταβατικής ευστάθειας..... | 40 |
| 2.5 Μέθοδοι Προσομοίωσης | 42 |
| 2.6 Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης | 43 |
| Κεφάλαιο 3 | 45 |
| Αιολική Ενέργεια..... | 45 |
| 3.1 Ανάγκη για Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας | 45 |

| | |
|--|-----|
| 3.2 Ο άνεμος ως πηγή ενέργειας | 45 |
| 3.3 Ιστορική αναδρομή..... | 46 |
| 3.4 Σημερινή κατάσταση | 47 |
| 3.4.1 Η κατάσταση στην Ελλάδα | 48 |
| 3.5 Η αιολική ενέργεια στα ΣΗΕ | 49 |
| 3.6 Οι απαιτήσεις των αιολικών πάρκων από το δίκτυο..... | 50 |
| Κεφάλαιο 4 | 52 |
| Ανεμογεννήτριες..... | 52 |
| 4.1 Τύποι Ανεμογεννητριών | 52 |
| 4.2 Εγκαταστάσεις Ανεμογεννητριών | 53 |
| 4.3 Μηχανικό μοντέλων των ανεμογεννητριών | 55 |
| 4.3.1 Ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας | 57 |
| 4.3.2 Ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας | 58 |
| 4.4 Κατηγορίες γεννητριών | 58 |
| 4.4.1 Ασύγχρονες γεννήτριες | 59 |
| Κεφάλαιο 5 | 63 |
| Προσομοίωση | 63 |
| 5.1 Περιγραφή του προβλήματος..... | 63 |
| 5.2 Διείσδυση ανεμογεννητριών..... | 64 |
| 5.3 Μελέτη μεταβατικής ευστάθειας | 68 |
| 5.4 Προσομοίωση για τον προσδιορισμό του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης | 71 |
| Κεφάλαιο 6 | 135 |
| Συμπεράσματα..... | 135 |
| Βιβλιογραφία | 137 |

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Με τον όρο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) ή σύστημα ηλεκτρικής ισχύος χαρακτηρίζεται ένα σύνολο εξοπλισμού (γεννήτριες, μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς, διακόπτες ισχύος, διατάξεις αντιστάθμισης) που χρησιμοποιείται για να τροφοδοτηθεί με ηλεκτρική ενέργεια ένα σύνολο καταναλωτών. Η κύρια λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι η παραγωγή, η μεταφορά και η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στα σημεία κατανάλωσης, δηλαδή στα σημεία σύνδεσης των καταναλωτών με το ηλεκτρικό δίκτυο.

Για να είναι πρακτικό ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να σχεδιαστεί και να λειτουργεί κατά τέτοιον τρόπο ώστε να είναι ασφαλές, αξιόπιστο, φιλικό προς το περιβάλλον και να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια καλής ποιότητας στη χαμηλότερη κατά τον δυνατόν τιμή. Η αξιοπιστία αναφέρεται όχι μόνο στην ποσοτική κάλυψη των συνολικών αναγκών των καταναλωτών, αλλά και στην ικανοποίηση των χρονικών και τοπικών διακυμάνσεων του φορτίου. Η ποιότητα αναφέρεται στην τήρηση θεσμοθετημένων ορίων διακύμανσης της τάσης και της συχνότητας, τα οποία συνήθως είναι 5% και 0,5% αντίστοιχα.

Ένα σωστά σχεδιασμένο και δομημένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας οφείλει να πληροί τις παρακάτω βασικές προϋποθέσεις, ώστε να είναι λειτουργικό:

- Το σύστημα οφείλει να ανταποκρίνεται στις συνεχόμενες αλλαγές στη ζήτηση για ενεργή και άεργη ισχύ των φορτίων.
- Το σύστημα θα πρέπει να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια σε χαμηλά επίπεδα κόστους και με ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.
- Η ισχύς, που παρέχεται από το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, οφείλει να είναι υψηλής ποιότητας και εξαρτάται από τη σταθερότητα της τάσης, τη σταθερότητα της συχνότητας του δικτύου και την αξιοπιστία του συστήματος.

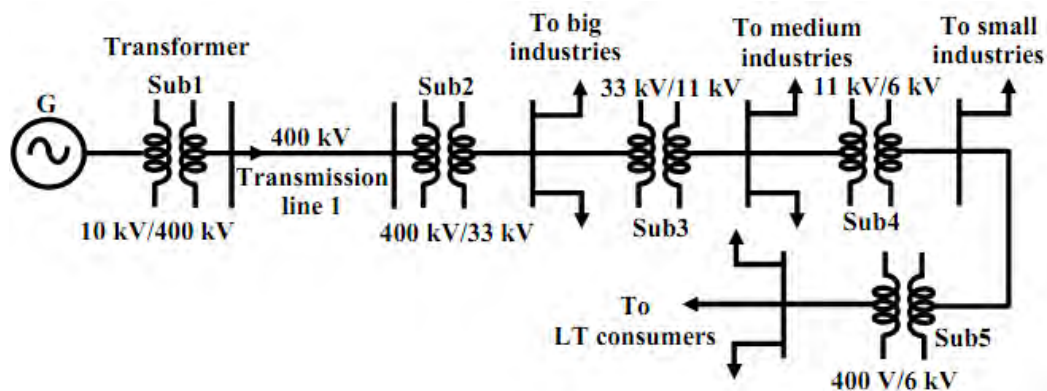
Αν και τα περισσότερα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας διαφέρουν μεταξύ τους ως προς το μέγεθος και τα δομικά στοιχεία που χρησιμοποιούν (γεννήτριες, μετασχηματιστές, αυτομετασχηματιστές κ.τ.λ.) έχουν, ωστόσο, ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά:

- Είναι τριφασικά εναλλασσόμενα συστήματα που λειτουργούν αυστηρά υπό συγκεκριμένα επίπεδα τάσης. Η παραγωγή και η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται σε τριφασικό εξοπλισμό. Τα βιομηχανικά φορτία είναι απαρэгκλιτα τριφασικά, ενώ τα υπόλοιπα φορτία, όπως οι οικιακές συσκευές, είναι συνήθως μονοφασικά.
- Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται με σύγχρονες μηχανές (γεννήτριες).
- Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας στις διάφορες περιοχές των καταναλωτών απαιτεί την ύπαρξη υποσυστημάτων που λειτουργούν σε διαφορετικά επίπεδα τάσης.

1.2 Δομή των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας

Για την επίτευξη του κύριου σκοπού του αλλά και των παραπάνω απαιτήσεων, κάθε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (Εικόνα 1) χωρίζεται στις παρακάτω συνιστώσες:

- Στους σταθμούς παραγωγής
- Στο δίκτυο μεταφοράς
- Στο δίκτυο διανομής



Εικόνα 1: Μονογραμμικό διάγραμμα συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, όπου απεικονίζονται οι σταθμοί παραγωγής, το σύστημα μεταφοράς και το σύστημα διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας.

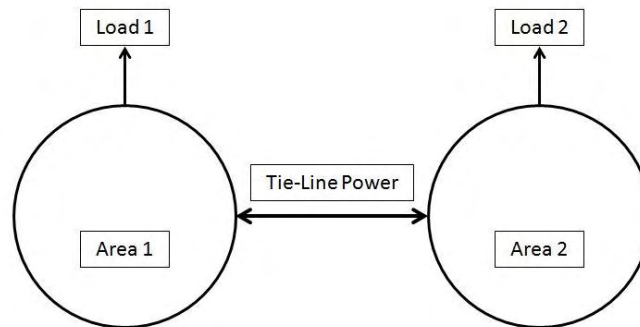
Οι σταθμοί παραγωγής είναι οι εγκαταστάσεις στις οποίες μια μορφή πρωτογενούς ενέργειας μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Η πρωτογενής μορφή ενέργειας είναι κυρίως θερμότητα, που προέρχεται από την καύση συμβατικών ορυκτών καυσίμων. Η θέση εγκατάστασης των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καθορίζεται από τεχνικοοικονομικούς παράγοντες. Έτσι οι λιγνιτικοί σταθμοί κατασκευάζονται δίπλα στο πεδίο εξόρυξης, οι υδροηλεκτρικοί και οι αιολικοί σταθμοί όπου υπάρχει εκμεταλλεύσιμο υδραυλικό ή αιολικό δυναμικό.

Το δίκτυο μεταφοράς αποτελεί την κύρια διασύνδεση μεταξύ των σταθμών παραγωγής και του δικτύου διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας και περιλαμβάνει τις γραμμές μεταφοράς υπερευψηλής (400 kV) και υψηλής τάσης (150 kV) και τους υποσταθμούς ανύψωσης και υποβιβασμού. Κύρια λειτουργία του συστήματος μεταφοράς είναι η ανύψωση της τάσης από τους σταθμούς παραγωγής για την μεταφορά της ισχύος. Για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται εναέριες γραμμές ή υπόγεια καλώδια τριφασικού εναλλασσόμενου ρεύματος. Σε σπανιότερες περιπτώσεις και κυρίως για διασυνδέσεις με υποθαλάσσια καλώδια, χρησιμοποιείται το συνεχές ρεύμα.

Το δίκτυο διανομής αποτελείται και αυτό από το σύνολο των εναέριων γραμμών και υπόγειων καλωδίων, καθώς και των υποσταθμών υποβιβασμού της τάσης. Επίσης, περιλαμβάνει και τα φορτία, δηλαδή τους καταναλωτές της ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτά μπορεί να είναι οικιακοί και μικροί βιοτεχνικοί καταναλωτές ή μεγαλύτεροι βιομηχανικοί πελάτες. Ανάλογα με την εγκατεστημένη ισχύ του καταναλωτή μεταβάλλεται η τάση και ο τρόπος της τροφοδοσίας του. Έτσι, το σύστημα διανομής είναι υπεύθυνο για τον υποβιβασμό της τάσης, αρχικά στη μέση τάση (20 kV) και εν συνεχεία στη χαμηλή τάση (230 V για του μονοφασικούς καταναλωτές και 400 V για τους τριφασικούς), και την διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές.

Η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα ΣΗΕ βρίσκεται σε εμβρυϊκό στάδιο και είναι μια πολυδάπανη και δύσκολη διαδικασία. Για το λόγο αυτό επιδιώκεται η συνεχής προσαρμογή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη ζήτηση των καταναλωτών. Καθώς αυτό δεν είναι πάντα τεχνικά δυνατό ή και οικονομικά βέλτιστο, έχει θεσπιστεί η διασύνδεση των εθνικών δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας (Εικόνα 2) με κατάλληλες γραμμές μεταφοράς, που ονομάζονται διασυνδετικές γραμμές (tie lines). Μέσα από τις διασυνδέσεις αυτές γίνονται προγραμματισμένες

αγοραπωλησίες ηλεκτρικής ενέργειας και παράλληλα προσφέρεται η δυνατότητα υποστήριξης γειτονικών δικτύων σε περιπτώσεις σφαλμάτων.



Εικόνα 2: Διασυνδεδεμένες περιοχές.

1.3 Έλεγχος στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας

Η εύρυθμη λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί την παρουσία ορισμένων μονάδων ελέγχου που ενεργούν απευθείας στον εξοπλισμό του δικτύου. Οι δύο κύριες κατηγορίες είναι ο έλεγχος στις μονάδες παραγωγής του συστήματος και ο έλεγχος σε επίπεδο μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο κύριος στόχος στον έλεγχο των μονάδων παραγωγής είναι η εξισορρόπηση μεταξύ της παραγωγής των γεννητριών και τη ζήτησης των φορτίων σε ηλεκτρική ισχύ. Οι επιθυμητές τιμές σε παραγόμενη πραγματική ισχύ (MW) καθορίζονται από τον έλεγχο των γεννητριών και διατηρούν εντός προδιαγραφών τη συχνότητα αλλά και τη ροή ισχύος μεταξύ των γειτονικών διασυνδεδεμένων συστημάτων. Ο έλεγχος στην ισχύ εξόδου των γεννητριών γίνεται με έλεγχο της μηχανικής ισχύος στην είσοδό τους. Η μηχανική ισχύς τροφοδοτείται στη γεννήτρια από ατμοστρόβιλο ή υδροστρόβιλο ή πετρελαιοκινητήρα, οπότε αντίστοιχα για τον έλεγχό της ρυθμίζουμε τη ροή ατμού ή νερού ή πετρελαίου. Έτσι, αν η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς είναι μεγαλύτερη από το φορτίο, η ταχύτητα της γεννήτριας ή η συχνότητα του συστήματος αυξάνουν, ενώ στην αντίθετη περίπτωση ελαττώνονται.

Ο έλεγχος σε επίπεδο μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας αποσκοπεί κυρίως στην διατήρηση της τάσης εντός ορισμένων ορίων μέσω της ρύθμισης της άεργης ισχύος. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται κατάλληλα κυκλώματα με τη χρήση ηλεκτρονικών ισχύος, όπως οι τράπεζες πυκνωτών (Εικόνα 3α), τα SVC (Static Var Compensators) (Εικόνα 3β), STATCOM κ.τ.λ. Η αντιστάθμιση της άεργης ισχύος είναι συχνά ο πιο αποτελεσματικός τρόπος για τη βελτίωση τόσο της

ικανότητας μεταφοράς πραγματικής ισχύος όσο και της ευστάθειας της τάσης. Διακρίνεται στην εν σειρά και εγκάρσια αντιστάθμιση. Η συνδυασμένη προσπάθεια του συστήματος ελέγχου της τάσης γεννητριών και των τοπικών αντισταθμιστών άεργου ισχύος εξασφαλίζει στα σύγχρονα ΣΗΕ διακύμανση της τάσης καταναλωτών μικρότερη του 10% της ονομαστικής τάσης.



Εικόνα 3α: Τράπεζες πυκνωτών υψηλής τάσης



Εικόνα 3β: Σταθμός SVC.

Οι διάφοροι τύποι ελέγχου εξαρτώνται από την κατάσταση λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, στόχος τους είναι να διατηρούν την τάση και την συχνότητα κοντά στις ονομαστικές τους τιμές, ενώ σε συνθήκες διαταραχής οφείλουν να επαναφέρουν το σύστημα στις κανονικές και επιθυμητές συνθήκες.

1.4 Σύγχρονες και μελλοντικές τάσεις

Οι απαιτήσεις σε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχουν αυξηθεί κατά τις τελευταίες δεκαετίες με ραγδαίο τρόπο. Οι μελλοντικές απαιτήσεις αναμένονται ακόμα μεγαλύτερες καθώς το ποσοστό της μη ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται διεθνώς συνεχώς μειώνεται προς όφελος της ηλεκτρικής. Η ταχεία ανάπτυξη των ΣΗΕ για την κάλυψη της ραγδαίας αύξησης σε απαιτήσεις ηλεκτρικής ισχύος από τα

φορτία έχει ως αποτέλεσμα την επέκταση του συστήματος μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και την κατασκευή νέων σταθμών παραγωγής, είτε συμβατικών είτε με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτό, σε παγκόσμιο επίπεδο, είναι αρκετά δύσκολο να υλοποιηθεί, λόγω των συνεχώς αυξανόμενων αντιδράσεων, που οφείλονται στις περιβαλλοντικές κυρίως επιπτώσεις, που συνεπάγονται από μια τέτοια επέκταση. Αυτός ο λόγος μαζί με την ανάγκη μείωσης του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας οδήγησαν στην ανάπτυξη συστημάτων μεταφοράς που ονομάστηκαν «Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Εναλλασσόμενου Ρεύματος» (Flexible AC Transmission Systems - FACTS).

Τα δίκτυα μεταφοράς και διανομής στις περισσότερες χώρες αναπτύχθηκαν πριν από πολλές δεκαετίες με αποτέλεσμα πλέον να «γερνούν» και να δοκιμάζονται από λειτουργικές αβεβαιότητες και νέες προκλήσεις. Υπάρχει μια αυξανόμενη τάση τόσο στη βιομηχανία της ηλεκτρικής ενέργειας όσο και μεταξύ πολλών κρατών ότι η δημιουργία ενός «έξυπνου δικτύου» (Smart Grid) είναι η απάντηση στα νέα αυτά ερεθίσματα. Ο στόχος ενός «έξυπνου δικτύου» είναι να παρέχει αξιόπιστα υψηλής ποιότητας ηλεκτρική ισχύ στις ταχέως αναπτυσσόμενες και εξελισσόμενες ψηφιακές κοινωνίες, με ένα φιλικό προς το περιβάλλον και βιώσιμο τρόπο. Επομένως, ένα έξυπνο δίκτυο χαρακτηρίζεται από τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Έχει την ικανότητα να καθαρίζει αυτόνομα οποιαδήποτε βραχυκυκλώματα μπορεί να εμφανιστούν.
- Επιτρέπει την ενεργή συμμετοχή των καταναλωτών στην απόκριση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.
- Παρέχει υψηλής ποιότητας ισχύ που ικανοποιεί τις ανάγκες των καταναλωτών του 21ου αιώνα.
- Διαθέτει όλες τις τεχνολογίες παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας.
- Επιτρέπει νέα προϊόντα, υπηρεσίες και αγορές.
- Λειτουργεί ανθεκτικά τόσο σε φυσικές καταστροφές όσο και σε κυβερνοεπιθέσεις.

Καθώς τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας έχουν αυξηθεί σε μέγεθος αλλά και ο αριθμός των διασυνδέσεων έχει αυξηθεί, ο προγραμματισμός για μελλοντική επέκταση του δικτύου καθίσταται όλο και πιο περίπλοκος. Ο μεγάλος όγκος δεδομένων του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας συλλέγεται και μελετάται με ακρίβεια

από τους μηχανικούς. Για τον προγραμματισμό της ορθής λειτουργίας των συστημάτων χρησιμοποιούνται ψηφιακοί υπολογιστές και κατάλληλα λογισμικά προγράμματα. Τα προγράμματα αυτά προσφέρουν άμεση βοήθεια για την μελέτη της ροής ισχύος, της ευστάθειας, των βραχυκυκλωμάτων και των υπόλοιπων μεταβατικών φαινομένων.

Κεφάλαιο 2

Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

2.1 Ανάλυση Ροής Φορτίου

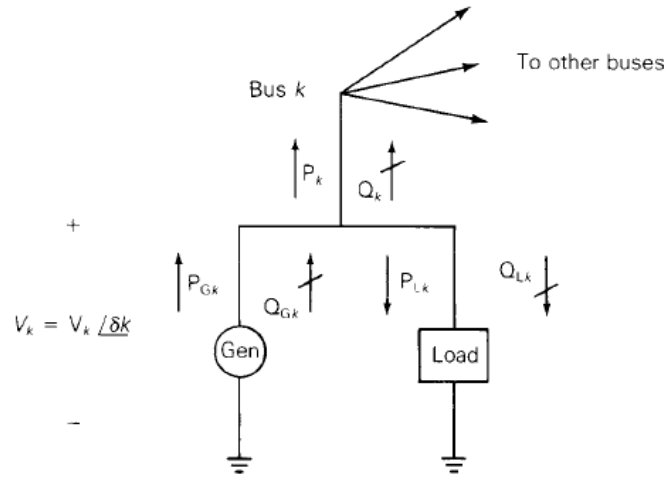
Με τον όρο 'Ανάλυση Ροής Φορτίου' αναφερόμαστε στον υπολογισμό, στη μόνιμη κατάσταση (steady state), τόσο του μέτρου όσο και της γωνίας της τάσης σε κάθε ζυγό ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Ως αποτέλεσμα αυτού του υπολογισμού, μπορούν να υπολογισθούν οι ροές πραγματικής και άεργης ισχύος στον εξοπλισμό του συστήματος, όπως είναι οι γραμμές μεταφοράς και οι μετασχηματιστές, καθώς οι απώλειες που προκύπτουν.

Για την εκκίνηση της ανάλυσης ροής φορτίου απαιτείται το μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος που μελετάμε, από το οποίο λαμβάνουμε δεδομένα και τα εισάγουμε σε κατάλληλα προγράμματα υπολογιστών, ώστε να αποκτήσουμε τις επιθυμητές μετρήσεις. Τα δεδομένα αυτά αφορούν δεδομένα των ζυγών του δικτύου, των γραμμών μεταφοράς και των μετασχηματιστών.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4, οι μεταβλητές που σχετίζονται με κάθε ζυγό (k) του συστήματος είναι οι εξής:

- Το μέτρο της τάσης V_k
- Η φασική γωνία δ_k
- Η πραγματική ισχύς P_k
- Η άεργος ισχύς Q_k

Σε κάθε ζυγό, δύο από αυτές τις μεταβλητές θεωρούνται δεδομένες, ενώ οι άλλες δύο υπολογίζονται από την ανάλυση ροής φορτίου.



Εικόνα 4: Κάθε ζυγός ενός ΣΗΕ έχει ορισμένη τάση. Η τάση των ζυγών αποτελεί βασικό στοιχείο στη μελέτη του δικτύου.

Η ισχύς κάθε ζυγού χωρίζεται στην ισχύ που παράγεται (G) και στην ισχύ που καταναλώνεται από τα φορτία (L) που μπορεί να διαθέτει ο ζυγός. Επομένως, τόσο η πραγματική ισχύς όσο και η άεργη περιγράφονται από την παρακάτω ισότητα:

$$P_k = P_{Gk} - P_{Lk}$$

$$Q_k = Q_{Gk} - Q_{Lk}$$

Στις παραπάνω ισότητες παρατηρούμε πως εάν δεν υπάρχει παραγωγή ή κατανάλωση είτε πραγματικής είτε άεργης ισχύος τότε παραλείπονται οι αντίστοιχοι όροι των σχέσεων.

Κάθε ζυγός (k) του συστήματος εντάσσεται σε μία από τις τρεις παρακάτω κατηγορίες ζυγών:

1. Ζυγός αναφοράς (Swing Bus – Slack Bus). Σε κάθε δίκτυο υπάρχει πάντοτε ένας μοναδικός ζυγός αναφοράς για τον οποίον η τάση έχει, συνήθως, μέτρο 1 pu και η γωνία είναι 0° . Τα δεδομένα, λοιπόν, θεωρούνται $V \angle \delta = 1 \angle 0^\circ$ pu και επομένως υπολογίζεται από τη ροή φορτίου η πραγματική και η άεργος ισχύς του ζυγού.
2. Ζυγός φορτίου (Load Bus – PQ Bus). Όπως υποδηλώνεται και από το όνομα του ζυγού, γνωστά θεωρούνται η πραγματική (P_k) και άεργος ισχύς (Q_k) του ζυγού ενώ με την ανάλυση της ροής φορτίου υπολογίζονται το μέτρο και τη γωνία φάσης της τάσης. Στα περισσότερα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας οι περισσότεροι ζυγοί ανήκουν σε αυτή την κατηγορία.

3. Ζυγός ελέγχου τάσης (PV bus). Σε αυτή την κατηγορία, όπως φαίνεται και από την ονομασία της τα δεδομένα είναι η πραγματική ισχύς του ζυγού, καθώς και το μέτρο της τάσης του. Η ανάλυση ροής φορτίου υπολογίζει την άεργο ισχύ και τη γωνία φάσης της τάσης. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν ζυγοί που έχουν γεννήτριες ή συσκευές με δυνατότητα παραγωγής άεργου ισχύος (πυκνωτές, SVC, κ.λπ.), που είναι ικανά για την παραγωγή και αντιστάθμιση άεργης ισχύος.

Τα δεδομένα των γραμμών μεταφοράς του δικτύου και των μετασχηματιστών είναι οι αγωγιμότητες που τα περιγράφουν. Έτσι, μπορούμε να κατασκευάσουμε τον πίνακα αγωγιμοτήτων Y_{BUS} , τα στοιχεία του οποίου περιγράφονται από τις παρακάτω σχέσεις:

- Διαγώνια στοιχεία του Πίνακα Αγωγιμοτήτων: $Y_{kk} =$ άθροισμα των αγωγιμοτήτων που συνδέονται στον ζυγό k .
- Μη διαγώνια στοιχεία του Πίνακα Αγωγιμοτήτων: $Y_{kn} = -$ άθροισμα των αγωγιμοτήτων μεταξύ των ζυγών k και n , όπου $k \neq n$.

2.1.1 Μέθοδος Newton – Raphson

Χρησιμοποιώντας τον πίνακα αγωγιμοτήτων Y_{BUS} , μπορούμε να γράψουμε τις εξισώσεις κόμβων του συστημάτων ως εξής:

$$I = Y_{BUS} V \quad (1)$$

Όπου το I είναι ένα n -διάστατο διάνυσμα των ρευμάτων που εισέρχονται σε κάθε κόμβο και το V το n -διάστατο διάνυσμα των τάσεων κάθε κόμβου.

Για κάθε ζυγό k το ρεύμα περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$I_k = \sum_{i=1}^n Y_{ki} V_i \quad (2)$$

Η μιγαδική ισχύς του ζυγού k περιγράφεται από τη σχέση:

$$S_k = P_k + jQ_k = V_k I_k^* \quad (3)$$

Επομένως, αντικαθιστώντας στην (σχέση 3) την (σχέση 2) προκύπτει:

$$P_k + jQ_k = V_k \left[\sum_{i=1}^n Y_{ki} V_i \right]^* \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

Ισχύει, όμως:

$$V_i = V_i e^{j\delta_i} \quad (5)$$

$$Y_{ki} = Y_{ki} e^{j\theta_{ki}} \quad (6)$$

Συνεπώς, αντικαθιστώντας τις σχέσεις (5) και (6) και στην σχέση (4) έχουμε:

$$P_k + jQ_k = V_k \left[\sum_{i=1}^N Y_{ki} V_i e^{(\delta_k - \delta_i - \theta_{ki})} \right] \quad (7)$$

Εξισώνοντας τα πραγματικά και τα φανταστικά μέρη της (7) προκύπτει για κάθε k :

$$P_k = V_k \sum_{i=1}^N Y_{ki} V_i \cos(\delta_k - \delta_i - \theta_{ki}) \quad (8)$$

$$Q_k = V_k \sum_{i=1}^N Y_{ki} V_i \sin(\delta_k - \delta_i - \theta_{ki}) \quad (9)$$

Η μέθοδος των Newton – Raphson επιλύει τις μη γραμμικές εξισώσεις της ανάλυσης ροής φορτίου βασισμένες στις σχέσεις (8) και (9).

2.1.2 Μέθοδος Gauss - Seidel

Η μέθοδος Gauss – Seidel μας δίνει τη λύση της εξίσωσης που περιγράφει η σχέση (1) για γραμμικά συστήματα. Από τη σχέση (3) προκύπτει:

$$I_k = \left(\frac{P_k + jQ_k}{V_k} \right)^* = \frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} \quad (10)$$

Για ένα γραμμικό σύστημα της μορφής $y = Ax$ η επαναληπτική μέθοδος Gauss – Seidel μας δίνει:

$$x_k^{(v+1)} = \frac{1}{A_{kk}} \left[y_k - \sum_{i=1}^{k-1} A_{ki} x_i^{(v+1)} - \sum_{i=k+1}^n A_{ki} x_i^{(v)} \right] \quad (11)$$

Η σχέση (11) εφαρμόζεται, με τη βοήθεια της (10), στο πρόβλημα που περιγράφει η σχέση (1) οπότε για έναν ζυγό φορτίου συνεπάγεται ότι:

$$V_k^{(v+1)} = \frac{1}{Y_{kk}} \left[\frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} - \sum_{i=1}^{k-1} Y_{ki} V_i^{(v+1)} - \sum_{i=k+1}^n Y_{ki} V_i^{(v)} \right] \quad (12)$$

Αντίστοιχα για έναν ζυγό ελέγχου τάσης, όπου το Q_k είναι άγνωστο, με την βοήθεια της (9), προκύπτει:

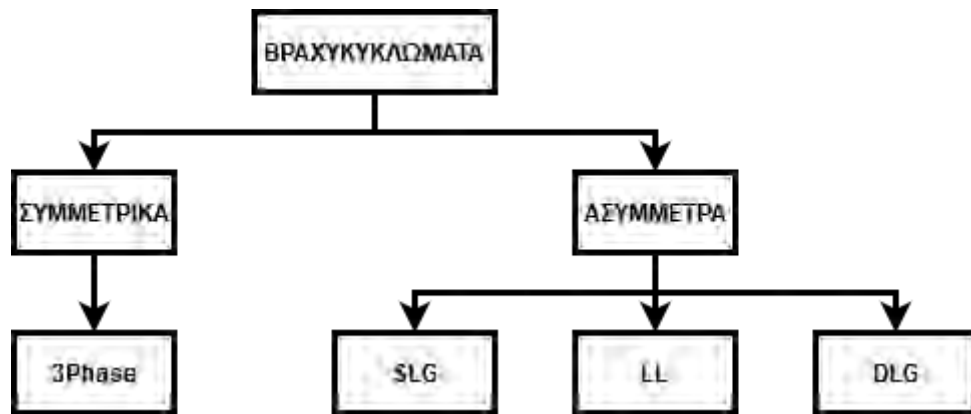
$$Q_k = V_k^{(v)} \sum_{i=1}^n Y_{ki} V_i^{(v)} \sin(\delta_k^{(v)} - \delta_i^{(v)} - \theta_{ki}) \quad \text{σχέση (13)}$$

Εφόσον υπολογιστεί το Q_k υπολογίζεται και η τάση του επόμενου βήματος $V_k^{(v+1)}$ η οποία χρησιμοποιείται στην 13 για τον υπολογισμό του $Q_k^{(v+1)}$ κ.ο.κ.

2.2 Βραχυκυκλώματα

Βραχυκύκλωμα ονομάζεται κάθε απότομη δομική αλλαγή του δικτύου η οποία οδηγεί είτε σε σύνδεση ενός ενεργού τμήματος του δικτύου με τη γη, άμεσα (στερεό βραχυκύκλωμα) ή μέσω αντίδρασης, είτε σε αγώγιμη σύνδεση μεταξύ δύο φάσεων. Τα βραχυκυκλώματα (ή αλλιώς σφάλματα) σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας εμφανίζονται συνήθως λόγω υπερτάσεων που προκαλούνται κυρίως από κεραυνούς, φθορών στην μόνωση του εξοπλισμού του δικτύου ή άλλων μηχανικών αιτιών. Τα ρεύματα του βραχυκυκλώματος μπορεί να είναι αρκετές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερα από τα ρεύματα ονομαστικής λειτουργίας και ενδέχεται να προκαλέσουν θερμική και μηχανική ζημιά στον εξοπλισμό του συστήματος. Επομένως, είναι απαραίτητο να αφαιρέσετε τα τμήματα του συστήματος στα οποία εμφανίζεται το σφάλμα να αφαιρεθούν από το δίκτυο όσο το δυνατόν συντομότερα.

Τα βραχυκυκλώματα χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, στα συμμετρικά βραχυκυκλώματα και στα ασύμμετρα (Εικόνα 5). Στα συμμετρικά σφάλματα, ανεξάρτητα από τα εάν είναι στερεά (χωρίς αντίσταση βραχυκύκλωσης) ή μη (με αντίσταση βραχυκύκλωσης), ανήκουν τα τριφασικά βραχυκυκλώματα (3 Phase Fault), ενώ στα ασύμμετρα σφάλματα ανήκουν το μονοφασικό βραχυκύκλωμα με τη γη (Single Line to Ground - SLG), το διφασικό βραχυκύκλωμα (Line to Line - LL) και το διφασικό βραχυκύκλωμα με γη (Double Line to Ground - DLG).



Εικόνα 5: Διαχωρισμός των βραχυκυκλωμάτων κατά την ανάλυση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Η μελέτη των μη συμμετρικών βραχυκυκλωμάτων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται με τη βοήθεια των συμμετρικών συνιστωσών και των συμμετρικών ακολουθιακών δικτύων, οι βασικές έννοιες των οποίων θα αναλυθούν στη συνέχεια.

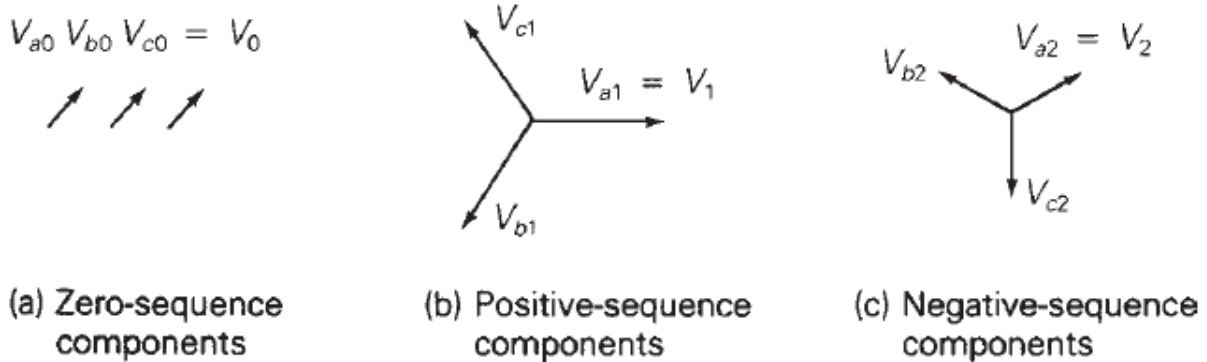
2.2.1 Συμμετρικές συνιστώσες

Η μέθοδος των συμμετρικών συνιστωσών αναπτύχθηκε το 1918 από το Fortescue αποτελώντας μια τεχνική μοντελοποίησης που επιτρέπει την ανάλυση μη συμμετρικών τριφασικών συστημάτων. Συγκεκριμένα, ο Fortescue όρισε έναν γραμμικό μετασχηματισμό από φασικές συνιστώσες σε συμμετρικές συνιστώσες με αποτέλεσμα τη δημιουργία τριών νέων δικτύων, δηλαδή των ακολουθιακών δικτύων. Η αποσύνθεση ενός περίπλοκου τριφασικού δικτύου σε τρία απλούστερα ακολουθιακά δίκτυα επιτρέπει την λεπτομερή μελέτη και ανάλυση των σφαλμάτων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε τρεις φασικές συνιστώσες της τάσης τις: V_a , V_b , V_c . Σύμφωνα με τον μετασχηματισμό που πρότεινε ο Fortescue, αυτές αναλύονται σε τρεις κατηγορίες ακολουθιακών συνιστωσών (Εικόνα 6) που είναι οι εξής:

- Οι συνιστώσες μηδενικής ακολουθίας (Zero Sequence Components), που αποτελούνται από τρία διανύσματα με ίσα μέτρα και μηδενική διαφορά στην φάση.
- Οι συνιστώσες θετικής ακολουθίας (Positive Sequence Components), που αποτελούνται από τρία διανύσματα με ίσα μέτρα, με διαφορά φάσης 120° και φασική ακολουθία a, b, c, \dots (δείκτης + ή 1).

- Οι συνιστώσες αρνητικής ακολουθίας (Negative Sequence Components), που αποτελούνται από τρία διανύσματα με ίσα μέτρα αλλά με διαφορά φάσης 120° και φασική ακολουθία α,c,b,...(δείκτης - ή 2).



Εικόνα 6: Ακολουθιακές συνιστώσες. (α) Συνιστώσες της μηδενικής ακολουθίας, (β) Συνιστώσες της θετικής ακολουθίας, (γ) Συνιστώσες της αρνητικής ακολουθίας.

Στο σημείο αυτό τονίζεται πως για την μελέτη και την ανάλυση των βραχυκυκλωμάτων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας αναφερόμαστε στις μηδενικές, θετικές και αρνητικές συνιστώσες της φάσης α. Επομένως για λόγους απλούστευσης θα αναγράφουμε τις ακολουθιακές συνιστώσες ως V_0 , V_1 , V_2 αντίστοιχα.

Αρχικά, ορίζεται το διάνυσμα V_ϕ που αποτελείται από τις φασικές τάσεις:

$$V_\phi = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (14)$$

Το διάνυσμα V_s που αποτελείται από τις ακολουθιακές τάσεις:

$$V_s = \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Και ο 3x3 πίνακας μετασχηματισμού A :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}, \quad \text{όπου } \alpha = 1 \angle 120^\circ \quad (16)$$

Κάνοντας χρήση των σχέσεων (14), (15) και (16) ορίζουμε τον παρακάτω μετασχηματισμό:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Δηλαδή:

$$V_\phi = AV_s \quad (18)$$

Από την σχέση (17) προκύπτει ότι:

$$V_a = V_0 + V_1 + V_2 \quad (19)$$

$$V_b = V_0 + a^2V_1 + aV_2 \quad (20)$$

$$V_c = V_0 + aV_1 + a^2V_2 \quad (21)$$

Από την σχέση (18), παρατηρούμε πως μπορούμε να υπολογίσουμε εύκολα τις ακολουθιακές τάσεις ως εξής:

$$V_s = A^{-1}V_\phi \quad (22)$$

Από την (22) προκύπτει πως θα πρέπει να ορίσουμε τον αντίστροφο του πίνακα μετασχηματισμού, δηλαδή τον A^{-1} . Αυτός ορίζεται ως εξής:

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (23)$$

Επομένως, η σχέση (22) μπορεί να γραφτεί:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (24)$$

Από την σχέση (24) προκύπτει:

$$V_0 = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \quad (25)$$

$$V_1 = \frac{1}{3}(V_a + a V_b + a^2 V_c) \quad (26)$$

$$V_2 = \frac{1}{3}(V_a + a^2 V_b + a V_c) \quad (27)$$

Από τις σχέσεις (25), (26), (27) μπορούμε να υπολογίσουμε τις τάσεις των δικτύων μηδενικής, θετικής και αρνητικής ακολουθίας αντίστοιχα. Ο μετασχηματισμός αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ομοίως και για τον υπολογισμό των ακολουθιακών ρευμάτων. Ορίζουμε το διάνυσμα I_φ που περιέχει τα φασικά ρεύματα:

$$I_\varphi = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (28)$$

Αντίστοιχα ορίζουμε και το διάνυσμα I_s των ακολουθιακών ρευμάτων:

$$I_s = \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (29)$$

Ισχύει ότι:

$$I_\varphi = A I_s \quad (30)$$

Με αντικατάσταση των σχέσεων (28) και (29) στη (30) προκύπτει:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (31)$$

Από τη σχέση (31) προκύπτει:

$$I_a = I_0 + I_1 + I_2 \quad (32)$$

$$I_b = I_0 + a^2 I_1 + a I_2 \quad (33)$$

$$I_c = I_0 + a I_1 + a^2 I_2 \quad (34)$$

Από την σχέση (30) προκύπτει ότι:

$$I_s = A^{-1} I_\phi \quad (35)$$

Επομένως η (35) γράφεται:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (36)$$

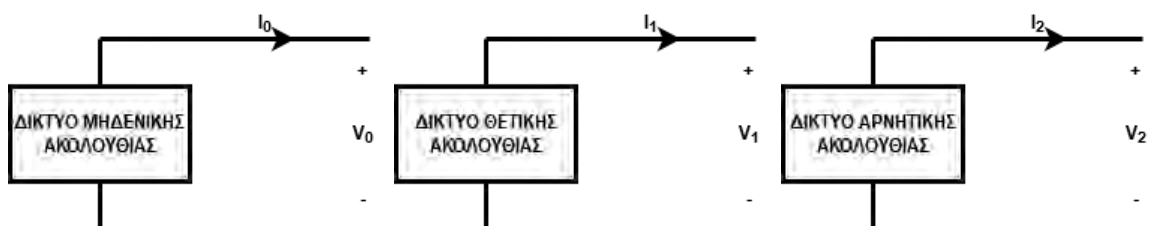
Δηλαδή τα ρεύματα μηδενικής, θετικής και αρνητικής ακολουθίας υπολογίζονται ως εξής:

$$I_0 = I_a + I_b + I_c \quad (37)$$

$$I_1 = \frac{1}{3} (I_a + a I_b + a^2 I_c) \quad (38)$$

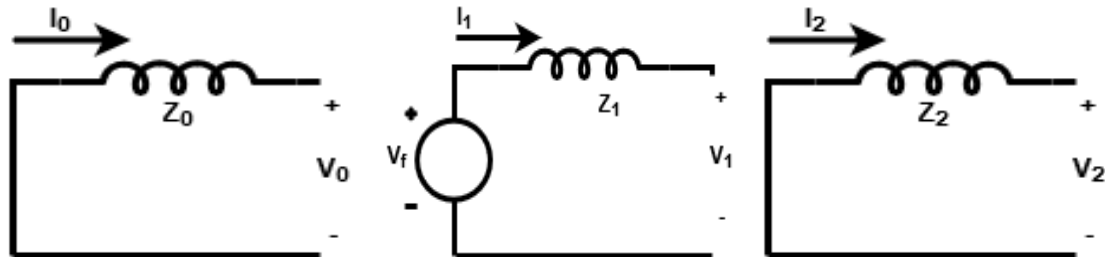
$$I_2 = \frac{1}{3} (I_a + a^2 I_b + a I_c) \quad (39)$$

Στην Εικόνα 7 απεικονίζονται τα δίκτυα της μηδενικής, θετικής και αρνητικής ακολουθίας στη γενική τους μορφή:



Εικόνα 7: Δίκτυα μηδενικής, θετικής και αρνητικής ακολουθίας

Παρ' όλα αυτά, για την ανάλυση τόσο των συμμετρικών όσο και των μη συμμετρικών σφαλμάτων χρησιμοποιούνται τα κατά Thevenin ισοδύναμα κυκλώματα (Εικόνα 8) των παραπάνω ακολουθιών τα οποία διαμορφώνονται ως εξής:



Εικόνα 8: Τα κατά Thevenin ισοδύναμα κυκλώματα των ακολουθιακών δικτύων (μηδενικής, θετικής και αρνητικής ακολουθίας).

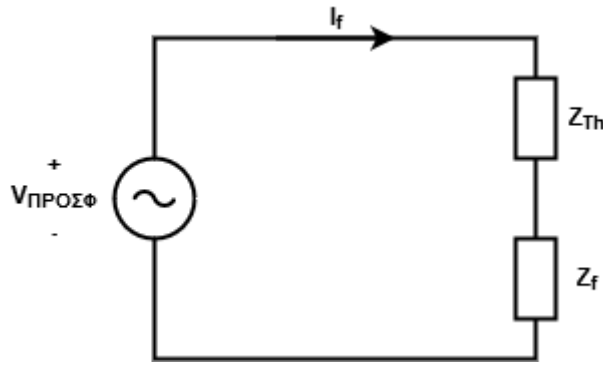
2.2.2 Ανάλυση συμμετρικών βραχυκυκλωμάτων

2.2.2.a Τριφασικό συμμετρικό βραχυκύκλωμα – 3 Phase Symmetric Fault

Η ανάλυση ενός συμμετρικού τριφασικού βραχυκυκλώματος απαιτεί τη χρήση μόνο του δικτύου της θετικής ακολουθίας. Έστω, ότι συμβαίνει ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα με σύνθετη αντίσταση Z_f στο ζυγό k ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Αρχικά, η τάση του ζυγού θα μηδενισθεί και το υπόλοιπο δίκτυο θα τροφοδοτεί με ρεύματα βραχυκύκλωσης το ζυγό k . Οι ποσότητες που θα χρειασθούμε για την ανάλυση του τριφασικού σφάλματος και τον προσδιορισμό του ρεύματος βραχυκύκλωσης I_f είναι οι εξής:

- Η προσφαματική τάση του ζυγού k , $V_{\text{ΠΡΟΣΦ}}$. Η τάση αυτή είναι η τάση του ζυγού k τη χρονική στιγμή πριν συμβεί το τριφασικό βραχυκύκλωμα και υπολογίζεται από την ανάλυση ροής φορτίου σε σταθερή κατάσταση (steady state).
- Η κατά Thevenin ισοδύναμη αντίσταση του δικτύου προς τον ζυγό k , Z_{Th} .

Η Εικόνα 9 απεικονίζει το δίκτυο θετικής ακολουθίας:



Εικόνα 9: Κατά Thevenin ισοδύναμο δίκτυο της θετικής ακολουθίας για την μελέτη ενός συμμετρικού βραχυκυκλώματος.

Έτσι, λοιπόν, το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_f υπολογίζεται ως εξής:

$$I_f = \frac{V_{\text{ΠΡΟΣΦ}}}{Z + Z_{Th}}$$

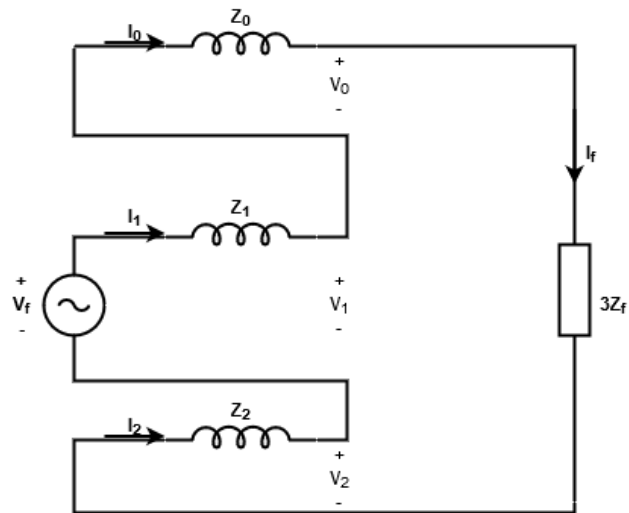
Οι τάσεις όλων των ζυγών ενός δικτύου, θα ελαττωθούν κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος. Το μέγεθος αυτής της πτώσης τάσης είναι μια ένδειξη της αντοχής του δικτύου. Η "αντοχή σε βραχυκύκλωμα, SCC" ή επίπεδο σφάλματος του εξεταζόμενου ζυγού αποτελεί ένα μέτρο αυτής της αντοχής, αλλά και ένα μέτρο της σοβαρότητας του βραχυκυκλώματος. Η αντοχή σε βραχυκύκλωμα ενός ζυγού του δικτύου, ορίζεται σαν το γινόμενο των μέτρων της τάσης του ζυγού πριν το βραχυκύκλωμα, $V_{\text{ΠΡΟΣΦ}}$ και του ρεύματος μετά το βραχυκύκλωμα, I_f . Αν οι ποσότητες αυτές ορισθούν ρμ, τότε και η αντοχή σε βραχυκύκλωμα ορίζεται σε ρμ:

$$|SCC| = |V_{\text{ΠΡΟΣΦ}}| |I_f|$$

2.2.3 Ανάλυση μη συμμετρικών σφαλμάτων

2.2.3.a Μονοφασικό βραχυκύκλωμα με τη γη – Single Line to Ground Fault

Ας θεωρήσουμε ένα μονοφασικό βραχυκύκλωμα στη φάση α ενός τριφασικού συστήματος με την παρουσία αντίστασης βραχυκύκλωσης Z_f . Το μονογραμμικό διάγραμμα στην Εικόνα 10 απεικονίζει τη συνδεσμολογία των τριών ακολουθιακών δικτύων στην περίπτωση ενός μονοφασικού βραχυκυκλώματος με αντίσταση βραχυκύκλωσης Z_f .



Εικόνα 10: Το δίκτυο που περιγράφει την συνδεσμολογία των ακολουθιακών κυκλωμάτων για τη μελέτη ενός SLG βραχυκυκλώματος.

Από το διάγραμμα αυτό προκύπτει ότι:

$$I_0 = I_1 = I_2 = I_f \quad (40)$$

Και:

$$I_f = \frac{V_f}{(Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_f)} \quad (41)$$

Από τις σχέσεις (18) και (27) προκύπτει:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_0 \\ I_0 \end{bmatrix} \quad (42)$$

Επομένως, από την (42) υπολογίζονται:

$$I_a = 3I_0 \quad (43)$$

$$I_b = (1 + \alpha^2 + \alpha)I_0 = 0 \quad (44)$$

$$I_c = (1 + \alpha^2 + \alpha)I_0 = 0 \quad (45)$$

Δεδομένου ότι ισχύει η ιδιότητα:

$$(1 + \alpha^2 + \alpha) = 0$$

Οι τιμές των I_b και I_c που προκύπτουν από τις εξισώσεις (44) και (45) αντίστοιχα είναι αναμενόμενες, καθώς το σφάλμα συμβαίνει μόνο στη φάση α του τριφασικού συστήματος.

Από το διάγραμμα που προκύπτει για το SLG βραχυκύκλωμα από τα ακολουθιακά δίκτυα είναι φανερό πως ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις για τις ακολουθιακές τάσεις:

$$V_0 = Z_0 I_0 \quad (46)$$

$$V_f - V_1 = I_1 Z_1 \Leftrightarrow V_1 = V_f - I_1 Z_1 \quad (47)$$

$$V_2 = Z_2 I_2 \quad (48)$$

Οι τιμές της προσφαλματικής τάσης V_f , των ισοδύναμων κατά Thevenin αντιστάσεων των ακολουθιακών δικτύων Z_0, Z_1, Z_2 αλλά και τα ρεύματα των ακολουθιακών δικτύων I_0, I_1, I_2 έχουν υπολογιστεί. Επομένως από τις σχέσεις (46), (47), (48) παίρνουμε τις τιμές των ακολουθιακών τάσεων.

Συνεπώς, από την σχέση (17) μπορούμε να υπολογίζουμε τις φασικές τάσεις. Από τον υπολογισμό αυτό θα πρέπει:

- Η τάση της φάση α να είναι ίση με μηδέν, δηλαδή $V_a = 0$
- Οι τάσεις των φάσεων b και c να είναι αντίθετες, δηλαδή $V_b = V_c$

2.2.3.b Διφασικό βραχυκύκλωμα – Line to Line Fault

Για το μελέτη του διφασικού βραχυκυκλώματος χωρίς γη υποθέτουμε πως συμβαίνει ένα βραχυκύκλωμα μεταξύ των φάσεων b και c με την παρουσία σύνθετης αντίστασης βραχυκυκλώματος Z_f . Είναι επομένως λογικό να ισχύουν και οι παρακάτω παραδοχές:

$$I_a = 0 \text{ και } I_b = -I_c \text{ και } V_b - V_c = Z_f I_b$$

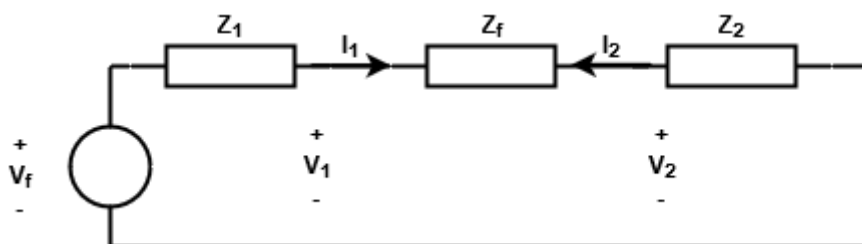
Από τις σχέσεις (37), (38) και (39) και δεδομένων των παραπάνω παραδοχών προκύπτει:

$$I_0 = I_a + I_b + I_c = 0 \quad (49)$$

$$I_1 = \frac{1}{3}(I_a + a^2 I_b + a I_c) = \frac{1}{3} I_b (a^2 - a) \quad (50)$$

$$I_2 = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c) = \frac{1}{3}I_b(a - a^2) = -I_1 \quad (51)$$

Από τις σχέσεις αυτές προκύπτει ότι στο διασυνδεδεμένο δίκτυο των ακολουθιακών δικτύων, για την ανάλυση του LL βραχυκυκλώματος, δεν συμμετέχει το δίκτυο της μηδενικής ακολουθίας. Η Εικόνα 11 απεικονίζει το δίκτυο του LL βραχυκυκλώματος:



Εικόνα 11: Το δίκτυο που περιγράφει την συνδεσμολογία των ακολουθιακών κυκλωμάτων για τη μελέτη ενός LL βραχυκυκλώματος.

Από το διάγραμμα αυτό προκύπτει ότι:

$$I_1 = -I_2 = \frac{V_f}{(Z_1 + Z_2 + Z_f)} \quad (52)$$

$$I_0 = 0 \quad (53)$$

Συνεπώς, εφόσον υπολογισθούν οι σχέσεις (52) και (53) χρησιμοποιώντας την (31) θα υπολογισθούν και τα φασικά ρεύματα. Από το παραπάνω διάγραμμα είναι φανερό πως:

$$V_f - V_1 = I_1 Z_1 \Leftrightarrow V_1 = V_f - I_1 Z_1 \quad (54)$$

$$V_1 - V_2 = Z_f I_1 \quad (55)$$

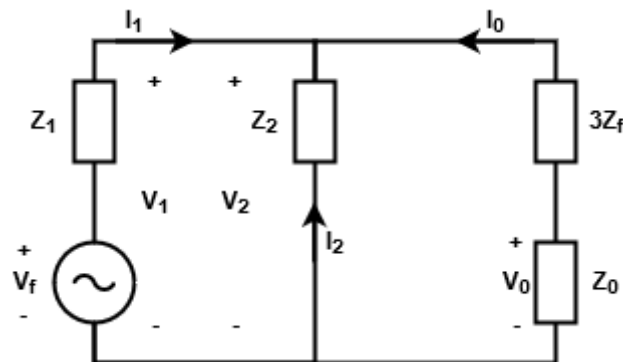
$$V_0 = 0 \quad (53)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις και χάρη στη σχέση (17) προκύπτουν οι φασικές τάσεις για ένα διφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς την παρουσία γης.

2.2.3.c Διφασικό βραχυκύκλωμα με γη – Double Line to Ground

Για τη μελέτη του διφασικού βραχυκυκλώματος με τη γη θεωρούμε ένα σφάλμα μεταξύ των φάσεων b, c και τη γης μέσω μια σύνθετης αντίστασης βραχυκύκλωσης

Z_f . Ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται τα ακολουθιακά δίκτυα της μηδενικής, θετικής και αρνητικής ακολουθία φαίνεται στην Εικόνα 12:



Εικόνα 12: Το δίκτυο που περιγράφει την συνδεσμολογία των ακολουθιακών κυκλωμάτων για τη μελέτη ενός DLG βραχυκυκλώματος.

Από το μονογραμμικό αυτό διάγραμμα εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

$$I_0 + I_1 + I_2 = 0 \quad (57)$$

$$V_1 = V_2 \quad (58)$$

$$V_0 - V_2 = 3Z_f I_0 \quad (59)$$

Επίσης, από τους νόμους του Κίρκχοφ είναι φανερό ότι:

$$I_1 = \frac{V_f}{Z_1 + [Z_2 \parallel (Z_0 + 3Z_f)]} \quad (60)$$

Και χρησιμοποιώντας διαιρέτη ρεύματος:

$$I_2 = (-I_1) \frac{(Z_0 + 3Z_f)}{Z_2 + (Z_0 + 3Z_f)} \quad (61)$$

$$I_0 = (-I_1) \frac{Z_2}{Z_2 + (Z_0 + 3Z_f)} \quad (62)$$

Από τις σχέσεις (60), (61) και (62) μπορούν να υπολογισθούν τα ρεύματα της θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας αντίστοιχα, καθώς η προσφαλματική τάση V_f αλλά και οι ισοδύναμες κατά Thevenin σύνθετες αντιστάσεις των ακολουθιακών δικτύων (Z_0 , Z_1 , Z_2) θεωρούνται γνωστά. Επομένως, από τη σχέση

(21) υπολογίζονται και τα φασικά ρεύματα. Αυτό που αξίζει να σημειωθεί, κάνοντας χρήση της (22) και της (57) είναι το εξής:

$$I_a = I_0 + I_1 + I_2 = 0 \quad (63)$$

Το αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο, καθώς το βραχυκύκλωμα συμβαίνει στις φάσεις b,c και όχι στη φάση α του τριφασικού συστήματος.

Από το διάγραμμα του DLG βραχυκυκλώματος είναι φανερό ότι:

$$V_1 = V_2 = \frac{(-I_2)}{Z_2} \quad (64)$$

Συνεπώς, από τη σχέση (59) υπολογίζεται και η V_0 . Έχοντας υπολογίσει τις ακολουθιακές τάσεις υπολογίζονται και οι φασικές τάσεις με τη βοήθεια της (17).

2.3 Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η ευστάθεια ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας υποδηλώνει την ικανότητα του συστήματος, για μια δεδομένη αρχική κατάσταση, να ανακτήσει μια νέα κατάσταση ισορροπίας μετά από μία διαταραχή. Τα περισσότερα συστήματα ισχύος είναι κυρίως μη γραμμικά συστήματα που λειτουργούν σε ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον, καθώς τα φορτία, οι έξοδοι των γεννητριών, η τοπολογία και οι βασικές παράμετροι λειτουργίας αλλάζουν συνεχώς. Όταν ένα δίκτυο υποβάλλεται σε μια παροδική διαταραχή, η σταθερότητα του συστήματος εξαρτάται από τη φύση της διαταραχής καθώς και από το αρχική κατάσταση λειτουργίας του δικτύου. Η διαταραχή μπορεί να είναι μικρή ή μεγάλη. Οι μικρές διαταραχές, όπως οι αλλαγές στην ισχύ των φορτίων, συμβαίνουν διαρκώς με αποτέλεσμα το σύστημα να προσαρμόζεται στις μεταβαλλόμενες αυτές συνθήκες και να λειτουργεί ομαλά καλύπτοντας επιτυχώς τη ζήτηση των φορτίων. Επιπλέον, το σύστημα πρέπει να είναι ανθεκτικό και σε πολλές σοβαρές διαταραχές, όπως στα βραχυκυκλώματα στις γραμμές μεταφοράς ή στην απώλεια μιας μεγάλης γεννήτριας του δικτύου, ώστε να διατηρεί τη λειτουργικότητά του και την αξιοπιστία του.

Μετά από μια παροδική διαταραχή, εάν το σύστημα ισχύος διατηρήσει την ευστάθεια του, θα φτάσει σε μια νέα κατάσταση ισορροπίας με σχεδόν ολόκληρο το δίκτυο να παραμένει ανέπαφο. Από την άλλη πλευρά, εάν το σύστημα είναι ασταθές, θα έχει ως αποτέλεσμα την μη ομαλή λειτουργία του ή ακόμη και την πλήρη κατάρρευσή του. Για παράδειγμα, μια συνεχής αύξηση στη γωνία του ρότορα της γεννήτριας ή

μια διαρκής μείωση των τάσεων των ζυγών θα μπορούσαν να οδηγήσουν το σύστημα σε αστάθεια και συνεπώς σε διαδοχικές διακοπές λειτουργίας ή και σε πλήρη αναστολή της λειτουργίας ενός μεγάλου μέρους του δικτύου.

Παραδοσιακά, το πρόβλημα της ευστάθειας είναι συνδεδεμένο με τη διατήρηση της σύγχρονης λειτουργίας του. Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας βασίζουν την λειτουργία του σε σύγχρονες μηχανές για την παραγωγή, μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς, απαραίτητη προϋπόθεση για την ικανοποιητική λειτουργία τους είναι ότι όλες οι σύγχρονες μηχανές θα πρέπει να παραμένουν σε συγχρονισμό. Αυτή η πτυχή καθορίζεται άμεσα από τη διαφορά στις γωνίες των γεννητριών και τη σχέση γωνίας-ισχύος, όπως αναλύεται λεπτομερώς στη συνέχεια.

Εντούτοις, αστάθεια μπορεί να προκληθεί και χωρίς την απώλεια συγχρονισμού. Για παράδειγμα, ένα σύστημα που αποτελείται από μια γεννήτρια που τροφοδοτεί έναν επαγωγικό κινητήρα μπορεί να γίνει ασταθές λόγω της κατάρρευσης της τάσης του φορτίου. Σε αυτήν την περίπτωση, το πρόβλημα της ευστάθειας έγκειται στον έλεγχο της τάσης. Επιπροσθέτως, στην περίπτωση που εμφανίζεται αναντιστοιχία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης καθίσταται σημαντικός ο έλεγχος και ο συντονισμός στην παραγωγή και συγκεκριμένα στο μηχανισμό που θέτει σε κίνηση το ρότορα της γεννήτριας. Εάν δεν επιτευχθεί σωστά ο συντονισμός αυτός είναι πιθανό η συχνότητα του συστήματος να γίνει ασταθής και οι μονάδες παραγωγής του δικτύου να χάνουν την ομαλή λειτουργία τους οδηγώντας σε μερική ή και ολική διακοπή της λειτουργίας του συστήματος. Αυτή είναι μια άλλη περίπτωση όπου οι μονάδες μπορούν να παραμείνουν σε συγχρονισμό αλλά το σύστημα να καθίσταται ασταθές.

Συνεπώς, λόγω της υψηλής πολυπλοκότητας στην εύρυθμη λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, είναι απαραίτητο να γίνει ένας διαχωρισμός στους τύπους των προβλημάτων της ευστάθειας. Η Εικόνα 13 απεικονίζει τους τύπους της ευστάθειας που χρίζουν την εκτενή μελέτη από τους ηλεκτρολόγους μηχανικούς των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 13: Η ευστάθεια των ΣΗΕ διαχωρίζεται σε 3 κατηγορίες εξίσου σημαντικές για τη λειτουργικότητα του δικτύου.

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία θα μας απασχολήσει μόνο το θέμα της μεταβατικής ευστάθειας, το οποίο θα παρουσιαστεί λεπτομερώς στη συνέχεια. Παρ' όλα αυτά, θα γίνει μια μικρή αναφορά και στους υπόλοιπους τύπους της ευστάθειας των συστημάτων της ηλεκτρικής ενέργειας.

2.3.1 Ευστάθεια τάσης

Η ευστάθεια της τάσης προσδιορίζεται από την ικανότητα του συστήματος ισχύος να διατηρεί σταθερές τις τάσεις σε όλους τους ζυγούς του δικτύου υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας και αφού έχει υποστεί κάποια διαταραχή. Η αστάθεια αυτή εμφανίζεται με τη μορφή σταδιακής πτώσης ή αύξησης της τάσης ορισμένων ζυγών. Το αποτέλεσμα της αστάθειας της τάσης είναι η απώλεια φορτίου στις περιοχές όπου οι τάσεις φτάνουν σε πολύ χαμηλές και μη αποδεκτές τιμές.

Ο κύριος παράγοντας που συμβάλλει στην αστάθεια της τάσης είναι συνήθως η πτώση τάσης που συμβαίνει όταν η ενεργή και η άεργη ισχύς ρέουν μέσω των επαγωγικών αντιδράσεων των γραμμών στο δίκτυο μεταφοράς. Εκτός της πτώσης τάσης, είναι δυνατή και η εμφάνιση αστάθειας λόγω υπέρτασης, όταν τα φορτία των ζυγών δεν μπορούν να απορροφήσουν την πλεονάζουσα άεργη ισχύ.

2.3.2 Ευστάθεια συχνότητας

Η ευστάθεια της συχνότητας έγκειται στην ικανότητα ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας να διατηρεί σταθερή τη συχνότητά του σε ένα αποδεκτό εύρος, κοντά στην ονομαστική τιμή μετά από μια σοβαρή διαταραχή του συστήματος που έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία μιας σημαντικής ανισοροπίας μεταξύ της παραγωγής και φορτίου. Η ευστάθεια στη συχνότητα εξαρτάται από την ικανότητα του συστήματος να αποκαταστήσει την ισοροπία μεταξύ παραγωγής και φορτίου, με την ελάχιστη δυνατή απώλεια φορτίου.

Γενικά, το πρόβλημα που αφορά την ευστάθεια της συχνότητας σχετίζεται με την ανεπάρκεια στην απόκριση του εξοπλισμού του δικτύου κατά τη διάρκεια βραχυκυκλωμάτων, τον λανθασμένο και ανεπαρκή συντονισμό του εξοπλισμού ελέγχου και προστασίας και την ανεπάρκεια σε της παραγωγής που βρίσκεται σε απόθεμα.

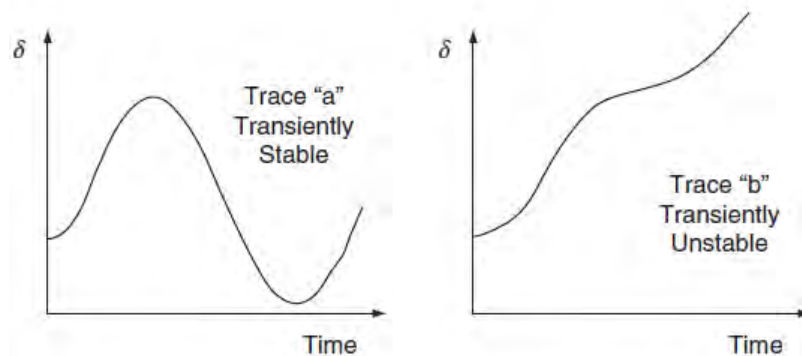
2.3.3 Μεταβατική ευστάθεια

Με τον όρο 'μεταβατική ευστάθεια' αναφερόμαστε στην ικανότητα ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας να διατηρεί το συγχρονισμό του όταν υπόκειται σε σοβαρές διαταραχές, όπως τα βραχυκυκλώματα, η απώλεια κάποιας γεννήτριας και η αφαίρεση μεγάλων φορτίων από το δίκτυο. Η ευστάθεια του συστήματος επηρεάζεται άμεσα από τα μη γραμμικά στοιχεία του. Για να διατηρεί, λοιπόν, ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας τον συγχρονισμό του θα πρέπει οι διαφοροποιήσεις στις γωνίες των γεννητριών του δικτύου, μετά από μια διαταραχή, να κυμαίνονται εντός αποδεκτών ορίων.

Η μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας ενός συστήματος αποτελεί μια βασική προϋπόθεση για τη σχεδίαση και την ορθή λειτουργία του. Εάν και είναι γνωστό πως η ομαλή λειτουργία ενός δικτύου περιορίζεται από φαινόμενα όπως η αστάθεια της τάσης ή της συχνότητας, τα περισσότερα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι επιρρεπή σε διαταραχές που οδηγούν σε απώλεια της μεταβατικής τους ευστάθειας χρίζοντας της μελέτη της ως ένα θεμελιώδες ζήτημα. Επίσης, η παροδική αστάθεια μπορεί να συμβεί σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα (λίγα δευτερόλεπτα) δυσχεραίνοντας την παρέμβαση από τη διαχειριστή του δικτύου για την άμβλυση των προβλημάτων που προκύπτουν. Ως εκ τούτου, το πρόβλημα είναι απαραίτητο να αντιμετωπιστεί στο στάδιο του σχεδιασμού του δικτύου, ώστε να μην υπάρξουν σοβαροί περιορισμοί στη λειτουργία του.

Οι περισσότεροι ηλεκτρολόγοι μηχανικοί των συστημάτων ισχύος είναι εξοικειωμένοι με τα γραφήματα της γωνίας του ρότορα της γεννήτριας (δ) έναντι του χρόνου (Εικόνα 14). Αυτές οι «καμπύλες ταλάντωσης» σχεδιάζονται για μια γεννήτρια που υπόκειται σε μια συγκεκριμένη διαταραχής του συστήματος και απεικονίζουν εάν η γωνία του ρότορα της γεννήτριας επανέρχεται σε μια ορισμένη τιμή και ταλαντεύεται γύρω από ένα νέο σημείο ισορροπίας (γράφημα αριστερά) ή εάν αυξάνεται

περιοδικά (γράφημα δεξιά). Στην πρώτη περίπτωση, η γεννήτρια διατηρεί την μεταβατική της ευστάθεια, ενώ στη δεύτερη περίπτωση εμφανίζεται αστάθεια.



Εικόνα 14: Διαγράμματα της γωνίας ισχύος της γεννήτριας (δ) έναντι του χρόνου (time). Ανάλογα με την καμπύλη του διαγράμματος συμπεραίνουμε και την ικανότητα διατήρησης της μεταβατικής ευστάθειας του συστήματος.

Δύο έννοιες είναι απαραίτητες για την κατανόηση του φαινομένου της μεταβατικής ευστάθειας:

- η εξίσωση της ταλάντωσης
- η σχέση μεταξύ της ισχύος και της γωνίας.

Αυτές οι δύο έννοιες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα για να περιγράψουν το κριτήριο ίσων εμβαδών, μία απλό γραφική προσέγγιση για την αξιολόγηση της μεταβατικής ευστάθειας.

2.3.3.a Η εξίσωση ταλάντωσης

Σε μια σύγχρονη γεννήτρια, ο κύριος κινητήρας ασκεί μηχανική ροπή T_m στον άξονα του γεννήτριας με αποτέλεσμα αυτός να περιστρέφεται και η γεννήτρια να παράγει μια ηλεκτρομαγνητική ροπή T_e . Εάν, ως αποτέλεσμα μιας διαταραχής του συστήματος, η μηχανική ροπή είναι μεγαλύτερη από την ηλεκτρομαγνητική ροπή, υπάρχει μια επιταχυνόμενη ροπή T_a που δίνεται από την εξής σχέση:

$$T_a = T_m - T_e \quad (65)$$

Η ροπή T_a έχει ως αποτέλεσμα την επιτάχυνση της μηχανής, η οποία έχει αδράνεια J (kg/m^2) που εξαρτάται από την αδράνεια της γεννήτριας και την γωνιακή ταχύτητα του αρχικά στρεφόμενου κινητήρα ω_m (σε rad/s). Επομένως:

$$T_a = J \frac{d\omega_m}{dt} \xrightarrow{(1)} J \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e \quad (66)$$

Συνήθως αναπαριστούμε την έκφραση αυτής της εξίσωσης ως προς τη σταθερά αδράνειας H της μηχανής. Εάν ω_{0m} είναι η ονομαστική γωνιακή ταχύτητα σε μηχανικά rad/s , η αδράνεια J μπορεί να γραφτεί ως:

$$J = \frac{2H}{\omega_{0m}^2} VA_{base} \quad (67)$$

Και αντικαθιστώντας στην σχέση (66) παίρνουμε:

$$\frac{2H}{\omega_{0m}^2} VA_{base} \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e \quad (68)$$

Εάν θεωρήσουμε πως ω_r είναι η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα της γεννήτριας και τη ω_0 η ονομαστική της τιμή τότε η εξίσωση (4) μετατρέπεται στην:

$$2H \frac{d\bar{\omega}_r}{dt} = \bar{T}_m - \bar{T}_e \quad (69)$$

Γνωρίζουμε όμως ότι:

$$\frac{d\bar{\omega}_r}{dt} = \frac{d^2\delta}{\omega_0 dt^2} \quad (70)$$

όπου δ είναι η γωνιακή θέση του περιστρεφόμενου ρότορα σε $elec rad/s$.

Επομένως από τις εξισώσεις (69) και (70) προκύπτει η εξίσωση:

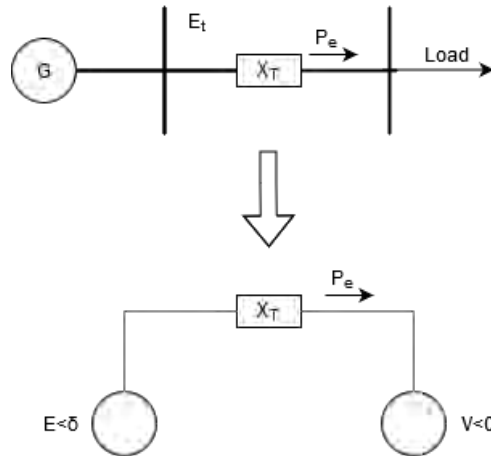
$$2H \frac{d^2\delta}{\omega_0 dt^2} = \bar{T}_m - \bar{T}_e \quad (71)$$

Η εξίσωση (71) ονομάζεται εξίσωση ταλάντωσης της γεννήτριας (swing equation) και ονομάζεται έτσι, διότι περιγράφει την ταλάντωση της γωνίας δ του ρότορα της γεννήτριας (γωνία ισχύος) κατά τη διάρκεια διαταραχών στο σύστημα.

Για να είναι ένα σύστημα ευσταθές κατά τη διάρκεια μιας διαταραχής, είναι απαραίτητο για τη γωνία του ρότορα δ (όπως περιγράφεται η συμπεριφορά της από την εξίσωση ταλάντωσης) να ταλαντεύεται γύρω από ένα σημείο ισορροπίας. Εάν η γωνία του ρότορα αυξάνεται επ' αόριστον, η γεννήτρια γίνεται ασταθής, καθώς συνεχίζει να επιταχύνει και δεν φτάνει ποτέ σε μια νέα κατάσταση ισορροπίας. Σε ένα συστήματα πολλαπλών γεννητριών, μια τέτοια γεννήτρια θα χάσει τον συγχρονισμό της με τις υπόλοιπες μηχανές.

2.3.3.b Σχέση μεταξύ ισχύος και γωνίας

Ας θεωρήσουμε ένα απλό μοντέλο μιας γεννήτριας συνδεδεμένης σε ένα άπειρο ζυγό όπως φαίνεται στην (Εικόνα 15):



Εικόνα 15: Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, όπου η γεννήτρια (G) συνδέεται σε έναν άπειρο ζυγό.

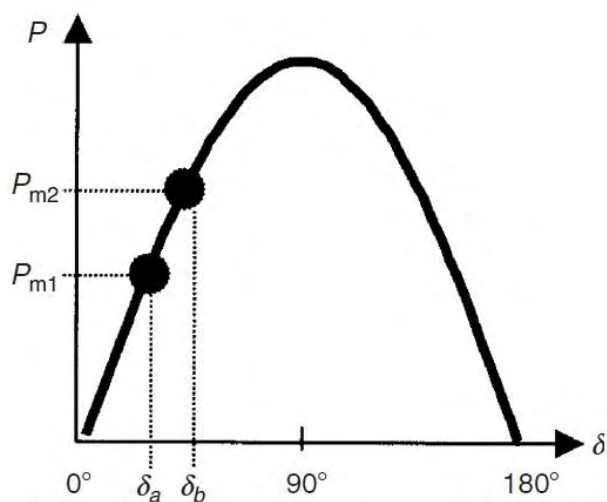
Η ισχύς που μεταφέρεται από την γεννήτρια στον άπειρο ζυγό περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_e = \frac{EV}{X_T} \sin \delta = P_{\max} \sin \delta \quad (72)$$

$$P_{\max} = \frac{EV}{X_T} \quad (73)$$

Από την εξίσωση (72) φαίνεται ότι αρχικά η ισχύς αυξάνεται σύμφωνα με την γωνία δ , μέχρι αυτή να φτάσει τις 90° , όπου το P_e παίρνει και τη μέγιστη τιμή του. Πέρα από $\delta=90^\circ$, η ισχύς αρχίζει να μειώνεται μέχρι να γίνει $\delta=180^\circ$, όπου και το P_e γίνεται ίσο με 0. Αυτή είναι η λεγόμενη σχέση γωνίας ισχύος και περιγράφει τη μεταδιδόμενη ισχύ σε συνάρτηση με τη γωνία του ρότορα. Από την εξίσωση (73) διαφαίνεται ότι η μέγιστη ισχύς εξαρτάται από την τάση της γεννήτριας, την τάση του άπειρου ζυγού, και την συνολική αντίσταση του συστήματος μεταφοράς. Παρατηρούμε πως, όσο μεγαλύτερη είναι η (σύνθετη) αντίσταση X_T (π.χ. εάν το δίκτυο μεταφοράς είναι ασθενές) τόσο χαμηλότερη είναι η μέγιστη ισχύς που μεταφέρεται.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 16, για μια δεδομένη μηχανική ισχύ εισόδου στη γεννήτρια P_{m1} η ηλεκτρική ισχύς εξόδου είναι P_e και η αντίστοιχη γωνία ρότορα είναι δ_α . Καθώς η μηχανική ισχύς αυξάνεται σε P_{m2} , η γωνία του ρότορα γίνεται δ_β .



Εικόνα 16: Διάγραμμα που απεικονίζει τη σχέση μεταξύ γωνίας και ισχύος για το παραπάνω σύστημα.

2.4 Μέθοδοι ανάλυσης της μεταβατικής ευστάθειας

Για ένα απλό σύστημα μίας γεννήτριας συνδεδεμένης σε έναν άπειρο ζυγό, όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, δεν είναι απαραίτητη η σχεδίαση της καμπύλης της εξίσωσης ταλάντωσης για να προσδιοριστεί εάν η γωνία του ρότορα της γεννήτριας αυξάνεται επ' αόριστον ή εάν ταλαντεύεται γύρω από ένα σημείο ισορροπίας. Για το λόγο αυτό, σε τέτοια απλοϊκά συστήματα χρησιμοποιείται το κριτήριο των ίσων εμβαδών. Εντούτοις, στην παρούσα διπλωματική εργασία το δίκτυο που μελετάμε αποτελείται από 9 ζυγούς και 3 γεννήτριες με αποτέλεσμα να μην είναι εφικτή η εφαρμογή αυτού του κριτηρίου και η θεωρία του να παραλείπεται.

Πρακτικά τα συστήματα ισχύος αποτελούνται από μεγάλο αριθμό γεννητριών, μετασχηματιστών, ζυγών, γραμμών μεταφοράς και φορτίων. Για την αξιολόγηση της ευστάθειας, το δίκτυο αντιπροσωπεύεται χρησιμοποιώντας το μονογραμμικό διάγραμμα της θετικής ακολουθίας, το οποίο ορίζει τη τοπολογία του συστήματος, τις σύνθετες αντιδράσεις των γραμμών, τα συνδεδεμένα φορτία, την παραγωγή και την προστατευτική τάση. Μέχρι και πριν κάποια χρόνια, η μελέτη ευστάθειας των δικτύων πραγματοποιούνταν με επίλυση των εξισώσεων από τους μηχανικούς. Για χάρην ευκολίας, λοιπόν, οι μελέτες των μηχανικών ήταν βασισμένες σε κλασικά μοντέλα των συσκευών του συστήματος με αποτέλεσμα να παραμελούνται μια σειρά χαρακτηριστικών όπως η δράση των ρυθμιστών τάσης, τα χαρακτηριστικά που αφορούν τη φυσική κατασκευή των μηχανών, ο κορεσμός του σιδηρομαγνητικού πυρήνα των γεννητριών κ.ά. Η κλασική μοντελοποίηση των συστημάτων

αποσκοπούσε κυρίως στη μείωση του φόρτου και του χρόνου των υπολογισμών, συγκριτικά πάντοτε με πιο λεπτομερή μοντελοποίηση.

Σήμερα, με την βοήθεια των υπολογιστών αλλά και των λογισμικών προσομοίωσης μας δίδεται η ευκαιρία για μια πιο λεπτομερή προσέγγιση του προβλήματος. Επομένως, η μέθοδος ανάλυσης της μεταβατικής ευστάθειας των συστημάτων, λόγω των πολλών και περίπλοκων μαθηματικών εξισώσεων που οφείλουν να επιλυθούν, βασίζεται σε προγράμματα προσομοίωσης σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Σε αυτή τη διπλωματική εργασία, οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται με τη βοήθεια του προγράμματος PowerWorld Simulator. Είναι, επίσης, σημαντικό να σημειωθεί ότι το χρονικό πλαίσιο στο οποίο παρατηρούμε εάν το σύστημα διατηρεί ή όχι την ευστάθειά του κυμαίνεται από 1-5 δευτερόλεπτα. Έτσι οι χρόνοι των προσομοιώσεων δεν είναι αρκετά μεγάλοι.

Για την ακριβή αξιολόγηση της απόκρισης του συστήματος μετά από διαταραχές, απαιτούνται λεπτομερή μοντέλα για όλα τα κρίσιμα στοιχεία του δικτύου. Το πλήρες μαθηματικό μοντέλο για το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό αλγεβρικών και διαφορικών εξισώσεων, που συμπεριλαμβάνουν τις:

- Αλγεβρικές εξισώσεις του στάτη των γεννητριών
- Διαφορικές εξισώσεις των κυκλωμάτων του ρότορα των γεννητριών
- Εξισώσεις ταλάντωσης
- Διαφορικές εξισώσεις του συστήματος διέγερσης
- Αλγεβρικές εξισώσεις δικτύου μεταφοράς
- Αλγεβρικές και διαφορικές εξισώσεις των φορτίων

Τα τελευταία χρόνια, ενώ έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος στις άμεσες μεθόδους ανάλυσης της ευστάθειας (direct methods of stability analysis) στις οποίες η ευστάθεια προσδιορίζεται χωρίς ρητή επίλυση των διαφορικών εξισώσεων του συστήματος, η πιο πρακτική και ευέλικτη μέθοδος της προσωρινής ανάλυσης της ευστάθειας είναι η προσομοίωση στο πεδίο του χρόνου (time-domain simulation) με τη βοήθεια της αριθμητική ολοκλήρωση των μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων. Στις μεθόδους αυτές ανήκουν η μέθοδος του Euler, οι μέθοδοι των Runge–Kutta και η μέθοδος του τραπεζίου. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται αποκλειστικά από τα χαρακτηριστικά του ίδιου του συστήματος.

2.5 Μέθοδοι Προσομοίωσης

Τα σύγχρονα εργαλεία προσομοίωσης προσφέρουν εξελιγμένες δυνατότητες μοντελοποίησης και προηγμένες μεθόδους αριθμητικής επίλυσης. Αν και κάθε εργαλείο προσομοίωσης διαφέρει κάπως από τα υπόλοιπα διαθέσιμα, οι βασικές απαιτήσεις και λειτουργίες είναι ουσιαστικά ίδιες. Τα δεδομένα που εισάγονται στα προγράμματα προσομοίωσης είναι τα εξής:

- 1) Ανάλυση ροής φορτίου, η οποία καθορίζει τις αρχικές συνθήκες του συστήματος.
- 2) Δυναμικά δεδομένα, τα οποία περιλαμβάνουν τους τύπους των μοντέλων των γεννητριών, των κινητήρων, τις διατάξεις προστασίας και άλλα δυναμικές συσκευές.
- 3) Δεδομένα ελέγχου του προγράμματος, τα οποία καθορίζουν στοιχεία που αφορούν τον τύπο της αριθμητικής ολοκλήρωσης που θα χρησιμοποιηθεί και το χρονικό βήμα.
- 4) Δεδομένα του βραχυκυκλώματος, τα οποία περιλαμβάνουν τις λεπτομέρειες της διαταραχής που εφαρμόζεται, δηλαδή τη χρονική στιγμή στην οποία εφαρμόζεται το σφάλμα, το σημείο του συστήματος όπου εμφανίζεται το σφάλμα, το είδος του σφάλματος (μονοφασικό, τριφασικό κλπ.), η σύνθετη αντίσταση του σφάλματος που ενδεχομένως να απαιτείται και τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος.
- 5) Δεδομένα παρακολούθησης του συστήματος, που καθορίζουν τις ποσότητες που πρέπει να παρακολουθούνται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Τα δεδομένα που εξάγονται από την προσομοίωση είναι κυρίως γραφήματα που προσδιορίζουν τη συμπεριφορά των γεννητριών κατά τη διάρκεια της διαταραχής. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η μεταβατική ευστάθεια προσδιορίζεται από τη μελέτη των γραφημάτων της ταλάντωσης της γωνίας των γεννητριών, των γραφημάτων τόσο της πραγματικής όσο και της άεργου ισχύος, των γραφημάτων που απεικονίζουν τη συχνότητα των γεννητριών και των γραφημάτων της τάσης των ζυγών στους οποίους είναι συνδεδεμένες οι γεννήτριες.

2.6 Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης

Η προστασία έναντι σφαλμάτων πραγματοποιείται με κατάλληλες διατάξεις προστασίας με τις οποίες διασφαλίζεται η απρόσκοπτη και ασφαλή λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και η ποιότητα της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος στους καταναλωτές. Ο σκοπός της προστασίας ενός συστήματος αποσκοπεί στον εντοπισμό της ακριβής θέσης του σφάλματος και στην απομόνωση του τμήματος του δικτύου που εμφανίζεται το σφάλμα με το μικρότερο δυνατό χρόνο, ώστε να παραμένουν σε λειτουργία τα υπόλοιπα υγιή τμήματα του δικτύου. Οι τεχνικές προστασίας που χρησιμοποιούνται εξαρτώνται από το μέγεθος, τη διαμόρφωση, τη διανομή, τη δομή και την τεχνολογική ανάπτυξη του όλου δικτύου.

Η εκκαθάριση του δικτύου από τα βραχυκυκλώματα αποτελεί μια βασική λειτουργία του συστήματος και η διαδικασία της είναι σχετικά απλή. Αρχικά, οι ηλεκτρονόμοι προστασίας (relay) αναγνωρίζουν το σφάλμα και ενεργοποιούν το κύκλωμα διακοπής του διακόπτη ισχύος (circuit-breaker trip circuit) εντός προρυθμισμένου χρόνου για την άμεση αποσύνδεση του τμήματος που υπέστη βλάβη. Στη συνέχεια, επενεργούν οι διακόπτες ισχύος. Κύρια λειτουργία τους είναι να συνδέουν και να αποσυνδέουν κυκλώματα των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας σε συνθήκες κανονικής φόρτισης αλλά και βραχυκυκλώματος με το μικρότερο δυνατό χρόνο. Ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση αυτής της διαδικασίας ονομάζεται χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος και συνήθως διαρκεί 50– 80 ms ή 3-5 κύκλους (cycles).

Ο χωρισμός του δικτύου σε επιμέρους ζώνες προστασίας γίνεται με σκοπό τον ακριβή εντοπισμό της θέσης του σφάλματος, την έγκαιρη απομόνωσή του και την ελαχιστοποίηση της επίδρασής του στο υπόλοιπο δίκτυο. Κάθε ζώνη προστασίας περιλαμβάνει μία ή περισσότερες συσκευές (εξοπλισμός) του δικτύου και έναν ή δύο διακόπτες ισχύος. Οι διακόπτες ισχύος τοποθετούνται εκεί που συνδέονται μεταξύ τους δύο ηλεκτρικές συσκευές και η θέση τους προσδιορίζει τα όρια της ζώνης προστασίας. Έτσι, κάθε διακόπτης ισχύος ανήκει σε δύο γειτονικές ζώνες προστασίας και η τοποθέτηση αυτή επιτρέπει την αποσύνδεση μόνο των συσκευών που έχουν το βραχυκύκλωμα. Εάν η πρωτεύουσα προστασία μιας ζώνης δε λειτουργήσει, θα πρέπει να λειτουργήσει η προστασία της αμέσως προηγούμενης

ζώνης. Οι αμέσως προηγούμενες ζώνες εξασφαλίζουν την δευτερεύουσα προστασία (back-up protection).

Ωστόσο, στη διπλωματική μου εργασία, γίνεται μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας του συστήματος 9 ζυγών για τον προσδιορισμό του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης διάφορων σφαλμάτων. Ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης (Critical Clearing Time - CCT) είναι ο μέγιστος επιτρεπόμενος χρόνος στον οποίο πρέπει να πραγματοποιηθεί η εκκαθάριση του δικτύου από τα βραχυκυκλώματα, ώστε να διατηρηθεί η ευστάθειά του. Από τον ορισμό αυτόν, συμπεραίνουμε πως για μία οποιαδήποτε αύξηση του χρόνου παραμονής του βραχυκυκλώματος πέραν του κρίσιμου χρόνου χάνεται ο συγχρονισμός των γεννητριών του συστήματος με αποτέλεσμα αυτό να οδηγείται σε αστάθεια. Εντούτοις, δηλώνεται ρητά ότι ο συνήθης χρόνος εκκαθάρισης του δικτύου από τα βραχυκυκλώματα είναι αρκετά μικρότερος από τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης.

Κεφάλαιο 3

Αιολική Ενέργεια

3.1 Ανάγκη για Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Τα τελευταία χρόνια, η αύξηση των τιμών των ορυκτών καυσίμων και οι ανησυχίες για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου έχουν αναζωπυρώσει το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη των εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το κύριο συστατικό των αερίων του θερμοκηπίου είναι το διοξείδιο του άνθρακα, που εκλύεται στην ατμόσφαιρα κατά την καύση των ορυκτών καυσίμων, γεννάται η παγκόσμια ανησυχία για τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Οι δύο κύριες λύσεις που εφαρμόζονται για τη μείωση των εκπομπών CO₂, έτσι ώστε να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής είναι η αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βαθμό και η ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης.

Ο όρος «εναλλακτική ενέργεια» αναφέρεται σε οποιαδήποτε μορφή ενέργειας διαφορετική από τις συμβατικές πηγές ενέργειας. Η εκμετάλλευση του ήλιου, του ανέμου, του νερού, της γεωθερμίας και της βιομάζας, που αποτελούν πηγές ενέργειας φιλικές προς το περιβάλλον, μπορούν και πρέπει να γίνουν οικονομικά εκμεταλλεύσιμες ώστε να συμβάλλουν στην αειφόρο ανάπτυξη, εφόσον είναι ανανεώσιμες και ρυπαίνουν ελάχιστα ή καθόλου το περιβάλλον. Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε εκτενώς με την αιολική ενέργεια και θα εμβαθύνουμε στα αποτελέσματα που προκύπτουν κατά την είσοδο των αιολικών πάρκων στο συμβατικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

3.2 Ο άνεμος ως πηγή ενέργειας

Για να εκμεταλλευτούμε με το καλύτερο δυνατό τρόπο την αιολική ενέργεια, είναι πολύ σημαντικό λάβουμε υπόψη τις μεγάλες διαφορές που μετράμε στη ταχύτητα του ανέμου μεταξύ διαφορετικών περιοχών. Περιοχές που απέχουν μόνο λίγα χιλιόμετρα μεταξύ τους μπορεί να υπόκεινται σε πολύ διαφορετικές συνθήκες ανέμου με αποτέλεσμα να διαφοροποιούνται ο σκοπός και ο τρόπος εγκατάστασης των ανεμογεννητριών στα αιολικά πάρκα. Η δύναμη του ανέμου μεταβάλλεται σε καθημερινή βάση, από ώρα σε ώρα και από λεπτό σε λεπτό, ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν σε μια περιοχή. Επιπλέον, τόσο η κατεύθυνση όσο και η

ένταση του ανέμου εμφανίζουν διαρκώς διακυμάνσεις γύρω από τη μέση τους. Οι αναταραχές αυτές αντιπροσωπεύουν ένα ιδιαίτερα σημαντικό χαρακτηριστικό του ανέμου, καθώς εξαιτίας τους προκαλούνται διακυμάνσεις στη δύναμη που ασκείται στα πτερύγια των στροβίλων, αυξάνοντας έτσι τη φθορά τους και μειώνοντας το μέσο χρόνο ζωής τους.

Η μεταβλητότητα και η αβεβαιότητα στη φύση του ανέμου αντιπροσωπεύουν το κύριο μειονεκτήματα της ηλεκτρικής ενέργειας που προέρχεται από τις ανεμογεννήτριες. Στην πραγματικότητα, η παραγόμενη ισχύς από τα αιολικά πάρκα είναι σχετικά μικρή ποσοτικά σε σύγκριση με το μέγεθος και την έκταση του δικτύου στο οποίο συνδέονται. Η μεταβλητότητα αυτή, που εμφανίζει η παραγωγή ενέργειας από τα αιολικά πάρκα, δεν αποσταθεροποιεί το ίδιο το δίκτυο και για το λόγο αυτό μπορεί να θεωρηθεί δυνατή η αλλαγή των συμβατικών γεννητριών με ανεμογεννήτριες.

Από τεχνική σκοπιά, η περιοχή για την εγκατάσταση μιας ανεμογεννήτριας, απαιτεί μια εκτίμηση του πραγματικού μεγέθους του διαθέσιμου αιολικού πόρου. Επομένως, για τη σαφή ποσοτικοποίηση του διαθέσιμου ανέμου απαιτείται η εγκατάσταση ενός κατάλληλου ανεμομέτρου. Το ανεμόμετρο εγκαθίσταται συνήθως επί τόπου για διαφορετικούς μήνες για την παρακολούθηση της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου καταγράφοντας τα επίπεδα αναταραχής σε διαφορετικά ύψη. Τα δεδομένα, που εξάγονται από αυτές τις μετρήσεις, επιτρέπουν την άμεση αξιολόγηση και τη ποσοτική πρόβλεψη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και την οικονομική σκοπιμότητα του έργου.

3.3 Ιστορική αναδρομή

Το 1891, ο Dane Poul LaCour ήταν ο πρώτος που δημιούργησε μια ανεμογεννήτρια που παρήγαγε ηλεκτρική ενέργεια. Κατά τη διάρκεια των δύο Παγκοσμίων Πολέμων, Δανοί μηχανικοί βελτίωσαν την υπάρχουσα τεχνολογία και χρησιμοποίησαν ένα εξελιγμένο μοντέλο ανεμογεννητριών για να καλύψουν τις ενεργειακές ελλείψεις της εποχής. Με το πέρας του 2ου Παγκοσμίου Πολέμου, το ενδιαφέρον στην ευρείας κλίμακας παραγωγή αιολικής ενέργειας μειώθηκε. Με την πετρελαϊκές κρίσεις στις αρχές της δεκαετίας του 1970, επέστρεψε το ενδιαφέρον για την παραγωγή αιολικής ενέργειας. Συνεπώς, η οικονομική ενίσχυση για έρευνα και ανάπτυξη της διαθέσιμης αιολικής ενέργειας χρίστηκε επιτακτική. Χώρες όπως η Γερμανία, οι ΗΠΑ και η

Σουηδία χρησιμοποίησαν αυτά τα χρήματα για να αναπτύξουν ευρείας κλίμακας πρότυπα ανεμογεννητριών στη τάξη παραγωγής των MW. Πολλά από αυτά τα πρότυπα, ωστόσο, δεν παρουσίασαν μεγάλη επιτυχία τις περισσότερες φορές εξαιτίας των διάφορων τεχνικών προβλημάτων.

Στη δεκαετία του 1990, η οικονομική υποστήριξη για την αιολική ενέργεια επιβραδύνθηκε στις ΗΠΑ, αλλά επιταχύνθηκε στην Ευρώπη και παράλληλα στην Ινδία. Το ευρωπαϊκό σύστημα στήριξης βασίστηκε κυρίως στην πολιτική των σταθερών τιμολογίων για την εγκατάσταση και λειτουργία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ταυτόχρονα, η Ινδία στράφηκε κυρίως προς την πολιτική των φορολογικών εκπτώσεων για επενδύσεις στην αιολική ενέργεια. Αυτά τα επικουρικά συστήματα στήριξης της οικονομίας και των επενδύσεων οδήγησαν σε μια γρήγορη αύξηση των εγκαταστάσεων των ανεμογεννητριών και στην άνθιση της αιολικής ενέργειας.

3.4 Σημερινή κατάσταση

Από τη δεκαετία του 1990 και έπειτα, η αιολική ενέργεια ήταν η ταχύτερα αναπτυσσόμενη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας σε ποσοστό ετήσιας αύξησης της εγκατεστημένης παραγωγής. Εντούτοις, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με την εξάπλωση της αιολικής ενέργειας δεν έχει κατανεμηθεί ομοιόμορφα σε ολόκληρο τον κόσμο, όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Εγκατεστημένη παραγωγή αιολικής ενέργειας (GW) στα τέλη του 2018.

| Γερμανία | Ισπανία | Η.Β. | Γαλλία | Ιταλία | Σουηδία | Πολωνία | Δανία | Πορτογαλία |
|----------|---------|------|--------|--------|---------|---------|-------|------------|
| 59.3 | 23.5 | 21.0 | 15.3 | 10.0 | 7.4 | 5.9 | 5.7 | 5.4 |

Πηγή: Wind Power Monthly, European Wind Energy Association.

Επικεντρώνοντας τον ενδιαφέρον μας στην Ευρώπη και εστιάζοντας τη προσοχή μας στα τελευταία έτη παρατηρούμε πως η εγκατεστημένη ισχύς της αιολικής ενέργειας ανέρχεται στα 189 GW. Από αυτά, τα 170 GW είναι εγκατεστημένα στην ξηρά (onshore), ενώ τα υπόλοιπα 19 GW παράκτια (offshore). Η αιολική ενέργεια αντιπροσωπεύει σήμερα το 18,8% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ. Ταυτόχρονα, σημειώνεται δραματική μείωση στην νέα εγκατεστημένη ισχύ των συμβατικών πηγών ενέργειας, όπου η λειτουργία τους βασίζεται στην καύση ορυκτών καυσίμων και πετρελαίου, καθώς ο

παροπλισμός των συμβατικών γεννητριών μοιάζει μονόδρομος. Εν έτη 2018, η νέες εγκαταστάσεις φυσικού αερίου και άνθρακα άγγιξαν μόλις τα 0,9 GW.

Σύμφωνα με τα δεδομένα της ΕΕ για το 2018, η Δανία είναι η χώρα με το μεγαλύτερο ποσοστό (41%) αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι χώρες που ακολουθούν είναι Ιρλανδία σε ποσοστό 28%, η Πορτογαλία σε ποσοστό 24%, τη Γερμανία σε ποσοστό 21% και την Ισπανία σε ποσοστό 19%. Παράλληλα, Το Ηνωμένο Βασίλειο σημείωσε τη μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση της αιολικής ενέργειας κατά τη ζήτηση ηλεκτρισμού από 13,5% σε 18%. Για το ίδιο έτος, η αιολική ενέργεια κατόρθωσε να καλύψει το 14% της ζήτησης για ηλεκτρική ενέργεια στην ΕΕ σημειώνοντας, έτσι, μια βραχεία αύξηση της τάξης του 2% συγκριτικά με το προηγούμενο έτος (2017), όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Ετήσια Αύξηση Εγκατεστημένης Ισχύος από Αιολικά Πάρκα

| Έτος | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Onshore | 8.5 | 10.1 | 9.5 | 9.5 | 11.7 | 11.0 | 11.6 | 10.9 | 12.3 | 13.9 | 9.0 |
| Offshore | 0.3 | 0.6 | 0.9 | 0.8 | 1.2 | 1.5 | 1.5 | 3.0 | 1.6 | 3.2 | 2.7 |

Πηγή: WindEurope

3.4.1 Η κατάσταση στην Ελλάδα

Σύμφωνα με τη Στατιστική της Αιολικής Ενέργειας στην Ελλάδα για το έτος του 2018, που ανακοίνωσε η Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας (ΕΛΕΤΑΕΝ), συνδέθηκαν στο δίκτυο 103 νέες ανεμογεννήτριες συνολικής ισχύος 191,6 MW. Αυτό αντιστοιχεί σε ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης της τάξης του 7,2% το 2018 σε σχέση με το τέλος του 2017. Την ίδια περίοδο απεγκαταστάθηκαν παλαιές ανεμογεννήτριες συνολικής ισχύος 15,43 MW οι οποίες ήδη αντικαθίστανται με νεότερες (repowering). Έτσι, το σύνολο της αιολικής ισχύος που το τέλος 2018 βρισκόταν πραγματικά σε εμπορική ή δοκιμαστική λειτουργία είναι περίπου 2.830 MW (2,83 GW). Η ισχύς αυτή κατανέμεται σε 310 MW στα μη διασυνδεδεμένα με το ελληνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας νησιά και σε 2.520 MW στο διασυνδεδεμένο σύστημα. Η Εικόνα 17 απεικονίζει την εγκατεστημένη ισχύς της αιολικής ενέργειας σε επίπεδων Περιφερειών.



Εικόνα 17: Η εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας σε επίπεδων Περιφερειών.

Κατά τη χρονιά που πέρασε σημειώθηκαν ορισμένες αξιοσημείωτες και αξιέπαινες ενέργειες για τη στροφή της χώρας μας προς την αιολική ενέργεια. Αρχικά, συνδέθηκε το μεγαλύτερο ενιαίο συγκρότημα αιολικών πάρκων ισχύος 154,1MW στη νότια Εύβοια στην περιοχή του Καφηρέα. Επίσης, ολοκληρώθηκε από τη ΔΕΗ η ριζική ανακαίνιση (repowering) των επτά πρώτων αιολικών πάρκων με σημαντική μείωση του πλήθους των ανεμογεννητριών, καθώς στη θέση των 62 παλαιών ανεμογεννητριών, τοποθετήθηκαν 15 νέες. Επιπλέον, τοποθετήθηκαν οι ανεμογεννήτριες με τη μεγαλύτερη διάμετρο ρότορα στην Ελλάδα (136 μέτρα) στη περιοχή του νομού Κοζάνης. Τέλος, τέθηκε σε εμπορική λειτουργία ο πρώτος Υβριδικός Σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα με αιολική ενέργεια και αποθήκευση σε ηλεκτρικούς συσσωρευτές (μπαταρίες) στη νήσο Τήλο, ενώ ήδη βρίσκεται σε δοκιμαστική λειτουργία ο πρώτος Υβριδικός Σταθμός με αντλησιοταμίευση στην Ικαρία.

3.5 Η αιολική ενέργεια στα ΣΗΕ

Στα περισσότερα κράτη του κόσμου, που υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των ανεμογεννητριών, η αιολική ενέργεια παρέχει μόνο ένα όριο της συνολικής ζήτησης για ισχύ. Τις τελευταίες δεκαετίες, παρατηρείται η τάση αύξησης των επίπεδων διείσδυσης των ανεμογεννητριών ή των αιολικών πάρκων στα ήδη υπάρχοντα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς η αιολική

ενέργεια θεωρείται ένα αποδοτικό μέσο για τη μείωση των εκπομπών CO₂ και μια ενδιαφέρουσα οικονομική εναλλακτική λύση και ενίσχυση σε κατάλληλες περιοχές, όπου η ταχύτητα του ανέμου μετράται σε αρκετά υψηλές τιμές. Χαρακτηριστικό παράδειγμα χώρας, που δρέπει τα οφέλη της αιολικής ενέργειας, αποτελεί η Δανία. Στη Δυτική Δανία, έχουν παρατηρηθεί περιπτώσεις όπου οι ανεμογεννήτριες σε συνδυασμό με τις εγκαταστάσεις συνδυασμένης παραγωγής θέρμανσης και ηλεκτρικής ενέργειας (CHP units) καλύπτουν τις ενεργειακές απαιτήσεις των φορτίων σε ποσοστό από 30% έως 100%, ενώ υπάρχουν και ορισμένες χρονικές περιόδους όπου οι ενεργειακές ανάγκες των φορτίων υπερκαλύπτονται με αποτέλεσμα το πλεόνασμα της ηλεκτρικής ενέργειας να εξάγεται στα γειτονικά συστήματα.

Η διείσδυση της αιολικής ενέργειας σε υψηλά επίπεδα, δηλαδή η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών σε επίπεδο άνω του 30%, στα υπάρχοντα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας ενδέχεται να απαιτεί τον επανασχεδιασμό του συστήματος αλλά και του τρόπου λειτουργίας του. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η ένταξη των αιολικών πάρκων στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας των 9 ζυγών θα γίνει σταδιακά, δηλαδή από την αντικατάσταση του 5% της παραγωγής από τις συμβατικές γεννήτριες του συστήματος έως και το 20% αυτής. Από τεχνική άποψη, οφείλουμε να λάβουμε υπόψη ότι ο κύριος στόχος ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος στους πελάτες του δικτύου και η πλήρης κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεών τους, όποτε υπάρξει ζήτηση. Η εισαγωγή της αιολικής ενέργειας στο δυναμικό του συστήματος οφείλει να εκπληρώνει διαρκώς αυτόν το στόχο τους συστήματος ηλεκτροδότησης. Η πρόκληση κατά την κατά την αντικατάσταση του συμβατικού τύπου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με αυτή της αιολική σχετίζεται τόσο με την ασταθή και κυμαινόμενη φύση του ανέμου όσο και με την ιδιαίτερη λειτουργία των συγκριτικά νέων γεννητριών, που χρησιμοποιούν οι ανεμογεννήτριες.

3.6 Οι απαιτήσεις των αιολικών πάρκων από το δίκτυο

Οι ιδιοκτήτες ή οι διαχειριστές των αιολικών πάρκων έχουν ορισμένες απαιτήσεις από το υπάρχον δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να δύνανται να πουλήσουν την ενέργεια που παρήγαγαν οι ανεμογεννήτριες των αιολικών πάρκων. Οι τρεις αυτές απαιτήσεις είναι οι εξής:

- 1η απαίτηση: Τα αιολικά πάρκα, όμοια με τις συσκευές των καταναλωτών, για την ομαλή σύνδεσή και λειτουργία τους στο δίκτυο απαιτούν ένα συγκεκριμένο

επίπεδο τάσης στο σημείο σύνδεσής τους, καθώς οι ανεμογεννήτριες είναι συνήθως σχεδιασμένες να λειτουργούν εντός συγκεκριμένου εύρους τάσης (π.χ. ονομαστική τάση $\pm 10\%$). Από την πλευρά των καταναλωτών, οι απαιτήσεις είναι παρεμφερείς, μιας και οι καταναλωτές χρησιμοποιούν ως επί το πλείστον τις ίδιες ηλεκτρικές συσκευές. Αντιθέτως, από την πλευρά των ανεμογεννητριών, οι απαιτήσεις μπορούν να 'χαλαρώσουν', καθώς τα αιολικά πάρκα σχεδιάζονται για να διαχειριστούν διαφορετικά επίπεδα ποιότητας της τάσης.

- 2η απαίτηση: Οι ιδιοκτήτες ή οι διαχειριστές των αιολικών πάρκων επιθυμούν να είναι σε θέση να πουλήσουν την ενέργεια που έχει παραχθεί την καταλληλότερη για αυτούς στιγμή, δηλαδή όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι επαρκής και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας φθάσει σε ικανοποιητικά επίπεδα.
- 3η απαίτηση: Οι δύο παραπάνω απαιτήσεις αφορούν άμεσα την αξιοπιστία του συστήματος της ηλεκτρικής ενέργειας στο σημείο σύνδεσης των αιολικών πάρκων, καθώς υπάρχει πάντοτε μια αντιστάθμιση μεταξύ κόστους και αξιοπιστίας (όσο μεγαλύτερη είναι η αξιοπιστία του συστήματος τόσο μεγαλύτερο είναι το κόστος λειτουργίας του).

Κεφάλαιο 4

Ανεμογεννήτριες

4.1 Τύποι Ανεμογεννητριών

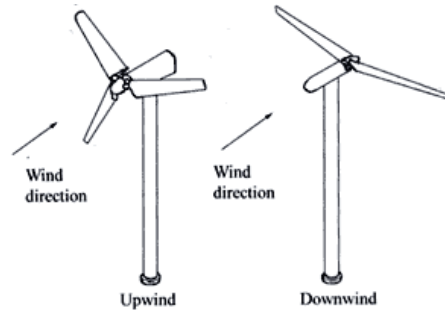
Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να χωριστούν ανάλογα με τον τύπο της κατασκευής τους σε δύο κατηγορίες στις ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα και στις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα. Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα, που αποτελούν το 1% των γεννητριών που χρησιμοποιούνται σήμερα, χωρίζονται σε τύπου Darrieus, τύπου Savonius και υβριδικές ανεμογεννήτριες, δηλαδή τύπου Darrieus-Savonius.

Παράλληλα, οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, που αποτελούν το 99% των γεννητριών που χρησιμοποιούνται σήμερα, χωρίζονται στις ανεμογεννήτριες με προσανατολισμό αντίθετης κατεύθυνσης από αυτής του ανέμου και στις ανεμογεννήτριες με προσανατολισμό στην κατεύθυνση του ανέμου (Εικόνα 18). Περίπου το 99% των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα έχουν τρεις λεπίδες, ενώ το 1% έχουν δύο λεπίδες.

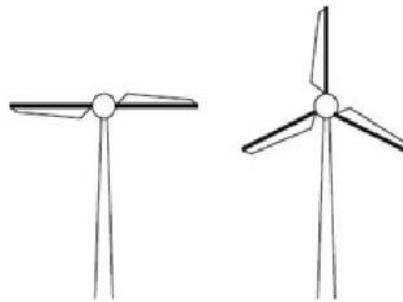
Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα με προσανατολισμό αντίθετης κατεύθυνσης από αυτής του ανέμου ονομάζονται έτσι, διότι ο άνεμος συναντά πρώτα τον ρότορα και μετά τον πύργο. Εμφανίζουν υψηλότερη αποδοτικότητα από τις ανεμογεννήτριες με προσανατολισμό στην κατεύθυνση του ανέμου, καθώς δεν υπάρχει αεροδυναμική παρέμβαση από στον πύργο. Αντιθέτως, εμφανίζουν το μειονέκτημα ότι είναι δεν ευθυγραμμισμένες με την κατεύθυνση του ανέμου και επομένως χρειάζονται διαφορετική μορφολογία (ουρά, πτερύγια). Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα επηρεάζονται αρνητικά από το αποτελέσματα της αλληλεπίδρασης πύργου-ρότορα, αλλά έχουν εν γέννη τη δυνατότητα αυτοευθυγράμμισης και μπορούν να χρησιμοποιήσουν ένα ευέλικτο ρότορα για να αντέχει δυνατούς ανέμους.

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα με τρεις λεπίδες είναι το πιο διαδεδομένο μοντέλο, ωστόσο, υπάρχουν και μοντέλα δύο λεπίδων, αλλά και μοντέλα πολλαπλών λεπίδων, που χρησιμοποιούνται σπανιότερα (Εικόνα 19). Δεδομένου ότι η αύξηση του αριθμού των λεπίδων συνεπάγεται μείωση στη ταχύτητα περιστροφής και ταυτόχρονη αύξηση της ροπής, τα μοντέλα των ανεμογεννητριών με δύο λεπίδες απαιτούν υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής σε σύγκριση με τα μοντέλα τριών

λεπίδων (40 rpm για τις ανεμογεννήτριες με δύο λεπίδες εν συγκρίσει με τα 30 rpm κατά την περιστροφή των ανεμογεννητριών με τρεις λεπίδες) έχοντας και ως επακόλουθο το μεγαλύτερο θόρυβο κατά την περιστροφή.



Εικόνα 18: Ανεμογεννήτριες με προσανατολισμό αντίθετης κατεύθυνσης από αυτής του ανέμου και με προσανατολισμό στην κατεύθυνση του ανέμου.



Εικόνα 19: Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα με δύο ή τρεις λεπίδες.

4.2 Εγκαταστάσεις Ανεμογεννητριών

Οι αιολικές μονάδες διαχωρίζονται, ανάλογα με το εάν συνδέονται ή όχι στο δίκτυο, στις εξής κατηγορίες:

- μονάδες μίας ανεμογεννήτριας και αιολικά πάρκα, όπου συνδέονται στο σύστημα παράλληλα με τα οικιακά ή βιομηχανικά φορτία του δικτύου.
- μη διασυνδεδεμένα αιολικά πάρκα.

Τα αποθηκευτικά μέσα του δικτύου (π.χ. υπερπυκνωτές, διατάξεις μπαταριών, κ.λπ.) δίνουν τη δυνατότητα αποθήκευσης (storage) της πλεονάζουσας ισχύος που παράχθηκε από τις αιολικές μονάδες, έτσι ώστε αυτή να μπορέσει να αξιοποιηθεί μετέπειτα για την κάλυψη των αναγκών των καταναλωτών. Τα αιολικά πάρκα ορίζονται ως ομάδες διασυνδεδεμένων στο δίκτυο ανεμογεννητριών που λειτουργούν ως σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτήν την περίπτωση, οι τουρμπίνες πρέπει να τοποθετηθούν σε κατάλληλη απόσταση μεταξύ τους, έτσι ώστε να αποφευχθούν οι αεροδυναμικές παρεμβολές. Οι παρεμβολές αυτές έχουν

δύο βασικές συνέπειες. Η πρώτη συνδέεται με την αύξηση του ποσοστού των αναταραχών, ενώ η δεύτερη με την άμεση απώλεια ισχύος. Η απόσταση μεταξύ των ανεμογεννητριών υπολογίζεται συνήθως διαμέσου της διαμέτρου του στροβίλου. Στην καλύτερη περίπτωση, το διάστημα που απαιτείται για τη διαδοχική εγκατάσταση ανεμογεννητριών είναι περίπου 8 έως 12 φορές της διαμέτρου του ρότορα κατά την κατεύθυνση του ανέμου και 2 έως 4 φορές τη διαμέτρου του ρότορα εγκάρσια προς την κατεύθυνση του ανέμου.

Οι ανεμογεννήτριες των αιολικών πάρκων μπορούν να τοποθετηθούν είτε στην ξηρά ή στην ανοικτή θάλασσα. Οι παράκτιες εγκαταστάσεις έχουν υψηλότερο κόστος συγκριτικά με τις χερσαίες εγκαταστάσεις. Το υψηλότερο αυτό κόστος, όμως, αντισταθμίζεται από την αύξηση της παραγωγής ισχύος κατά 30% τουλάχιστον. Επιπλέον, τα παράκτια αιολικά πάρκα απαιτούν έναν μεγάλο αριθμό διαθέσιμων ανεμογεννητριών με ονομαστική ισχύ από 5 έως 6 MW η κάθε μία, έτσι ώστε να αντισταθμίζεται το υψηλό κόστος εγκατάστασης και η δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου και παρακολούθησης. Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται σήμερα στις παράκτιες εγκαταστάσεις εμφανίζει αρκετές ομοιότητες με εκείνη των χερσαίων εγκαταστάσεων, εντούτοις οφείλει να πληροί ορισμένες σχεδιαστικές προϋποθέσεις που αφορούν τα ακόλουθα κρίσιμα ζητήματα:

- τα κύματα προκαλούν επιπρόσθετη φθορά στη δομή των ανεμογεννητριών.
- τα μηχανικά χαρακτηριστικά και η μορφολογία του πυθμένα της θάλασσας συχνά δεν είναι τα κατάλληλα για μια τέτοια εγκατάσταση και κατά συνέπεια τα θεμέλια πρέπει να έχουν μεγαλύτερες διαστάσεις.
- στο βυθό αυξάνεται παραπάνω το μήκος του βυθισμένου πύργου της ανεμογεννήτριας με αποτέλεσμα να χρειάζεται πρόσθετος μηχανισμός υποστήριξης.

Οι παράκτιες ανεμογεννήτριες πρέπει να είναι αρκετά αξιόπιστες και λειτουργικές, έτσι ώστε να μειώνονται όσο το δυνατόν περισσότερες οι εργασίες συντήρησής τους. Για το λόγο αυτό, τοποθετούνται ορισμένοι αισθητήρες σε κομβικά σημεία της εγκατάστασης που προσφέρουν τη δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου. Εκτός αυτού, οι ανεμογεννήτριες που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία έχουν σχεδιαστεί για να αντέχουν στις συνθήκες του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Στην πραγματικότητα το βυθισμένο κομμάτι της δομής προστατεύεται από τυχόν διάβρωση μέσω καθοδικής

προστασίας, ενώ τα μέρη που εξέχουν στον ελεύθερο αέρα οφείλουν να είναι βαμμένα με κατάλληλα προϊόντα.

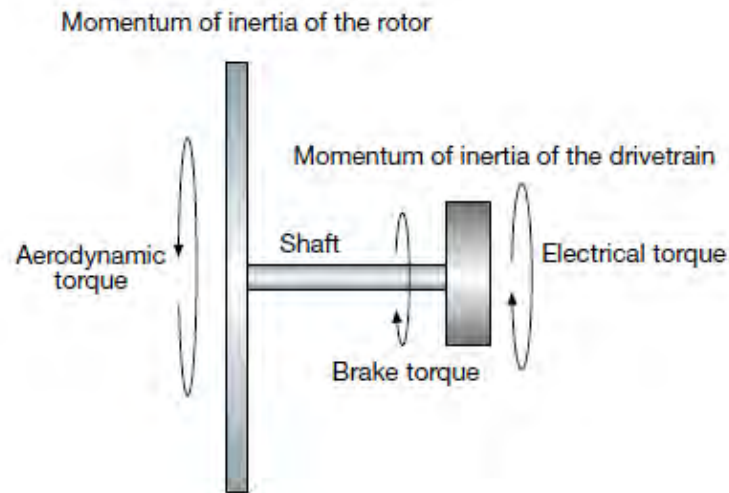
Οι μονάδες που δεν είναι διασυνδεδεμένες στο δίκτυο διαχωρίζονται στις μονάδες που εξυπηρετούν τις ενεργειακές ανάγκες ενός μόνο φορτίου και στις μονάδες που συνδέονται σε ένα αυτόνομο δίκτυο. Ωστόσο, και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις οι μονάδες οφείλουν να αποθηκεύουν τη περίσσεια ισχύ που παράγεται, έτσι ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις των φορτίων για ισχύ ακόμη και όταν επικρατούν συνθήκες άπνοιας. Τα ανεξάρτητα δίκτυα που τροφοδοτούνται αμιγώς από την αιολική ενέργεια αντιπροσωπεύουν μια πολλά υποσχόμενη εφαρμογή, καθώς ένας μακροπρόθεσμος στόχος στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι η πλήρης κάλυψη των φορτίων για ισχύ από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Παρά ταύτα, σήμερα, το σενάριο αυτό μοιάζει μάλλον ουτοπικό, καθώς οι ανανεώσιμες πηγές δεν είναι πάντοτε διαθέσιμες σε επαρκής ποσότητες για τις επαρκής ποσότητες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ιδανική λύση βρίσκεται στα υβριδικά συστήματα, τα οποία χρησιμοποιούν την αιολική ενέργεια (ή άλλες ανανεώσιμες πηγές) σε συνδυασμό με τις παραδοσιακές πηγές. Το χαρακτηριστικό προφίλ των υβριδικών συστημάτων διαφαίνεται από την συνεχή παροχή ηλεκτρικής ισχύος, που εγγυάται η εισαγωγή της ντιζελογεννήτριας και έχει ως αποτέλεσμα να είναι οικονομικά αποδοτικά σε περίπτωση σύνδεσης τους με τα αποκεντρωμένα δίκτυα. Ένα σύστημα ντιζελογεννητριών και ανεμογεννητριών συνήθως αποτελείται από μικρές ή μεσαίες γεννήτριες και σε συνδυασμό με ένα κατάλληλο σύστημα αποθήκευσης έχει τη δυνατότητα άμεσης σύνδεσης με το υπάρχον δίκτυο.

4.3 Μηχανικό μοντέλων των ανεμογεννητριών

Μια τυπική ανεμογεννήτρια μπορεί να αναπαρασταθεί πολύ απλά ως μια περιστρεφόμενη μάζα με μεγάλη αδράνεια, που αντιπροσωπεύει τον ρότορα, και μια περιστρεφόμενη μάζα που αντιπροσωπεύει τη γεννήτρια όντας και οι δύο συνδεδεμένες σε έναν κοινό άξονα περιστροφής. Σε αυτό το μηχανικό μοντέλο, η αεροδυναμική ροπή εφαρμόζεται στο ρότορα, η ηλεκτρομαγνητική ροπή επενεργεί στη γεννήτρια και μια πιθανή ροπή εφαρμόζεται στο κοινό άξονα από κατάλληλα μηχανικά φρένα (Εικόνα 20). Κάτω από την ονομαστική ταχύτητα ανέμου, συστήματα ελέγχου ενεργούν για να μεγιστοποιήσουν την αεροδυναμική ροπή (και

ως εκ τούτου τη ισχύ που παράγεται), ενώ πάνω από την ονομαστική ταχύτητα ανέμου, διαμορφώνουν μια τέτοια ροπή ώστε να διατηρήσουν τη ταχύτητα περιστροφής εντός αποδεκτών ορίων.



Εικόνα 20: Μηχανικό μοντέλο ανεμογεννήτριας.

Στις τουρμπίνες που είναι σχεδιασμένες να λειτουργούν με σχεδόν σταθερές ταχύτητες, η ροπή της γεννήτριας αποτελεί συνάρτηση της αεροδυναμικής ροπής και ο μόνος τρόπος ελέγχου της ροπής της γεννήτριας (και κατά συνέπεια της ισχύος εξόδου) πραγματοποιείται με ρύθμιση της αεροδυναμικής ροπής. Αντιθέτως, στις τουρμπίνες μεταβλητής ταχύτητας, η ροπή της γεννήτριας και η αεροδυναμική ροπή μπορεί να μεταβάλλονται ανεξάρτητα η μία από την άλλη, και κατά συνέπεια η ταχύτητα του ρότορα μπορεί να και από τις δύο αυτές ροπές επιδιώκοντας είτε την επιτάχυνση είτε την επιβράδυνση του ρότορα.

Οι αλλαγές στη ροπή της γεννήτριας πραγματοποιούνται παρεμβάλλοντας έναν ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος, που έχει τη δυνατότητα ρύθμισης της φάσης και της συχνότητας του ρεύματος που ρέει στις περιελίξεις της γεννήτριας. Η αεροδυναμική ροπή μπορεί να ελεγχθεί μεταβάλλοντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ρότορα. Η γεωμετρία του ρότορα μπορεί να αλλάξει ρυθμίζοντας το μήκος της λεπίδας της ανεμογεννήτριας ή αλλάζοντας τη γεωμετρία ενός μόνο μέρους της λεπίδας επιδρώντας κυρίως στη κλίση της. Γενικά, οι στρατηγικές ελέγχου των ανεμογεννητριών έχουν ως στόχους:

- τη μεγιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας και τη διατήρηση της ομαλής λειτουργίας των εξαρτημάτων των στροβίλων εντός των αποδεκτών τιμών

- τη παροχή μιας αποδεκτής ποιότητα ισχύος που εισάγεται στο δίκτυο
- την εξασφάλιση ασφαλούς λειτουργίας της ανεμογεννήτριας κατά την εκδήλωση μεταβατικών φαινομένων.

4.3.1 Ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας

Στις αρχές της δεκαετίας του '90, οι εγκατεστημένες ανεμογεννήτριες λειτουργούσαν κυρίως με σταθερή ταχύτητα. Αυτό σημαίνει ότι η λειτουργία τους είναι ανεξάρτητη της ταχύτητας του ανέμου, καθώς ο ρότορας περιστρέφεται με μια σταθερή ταχύτητα που καθορίζεται από τη συχνότητα του δικτύου, από τα γρανάζια του κιβωτίου ταχυτήτων και με τον αριθμό των πόλων της ηλεκτρικής γεννήτριας. Αυτού του τύπου οι γεννήτριες, είναι εξοπλισμένες με έναν επαγωγικό κινητήρα (asynchronous squirrel cage induction generator- SCIG), που συνδέεται άμεσα με το ηλεκτρικό δίκτυο, με ένα soft-starter για τη μείωση του ρεύματος κατά την εκκίνηση και ένα κατάλληλο για την αντιστάθμιση της άεργου ισχύος.

Οι στρόβιλοι αυτοί έχουν σχεδιαστεί για να φτάσουν στο μέγιστο της απόδοσής του σε μία δεδομένη τιμή της ταχύτητας του ανέμου. Ωστόσο, για να αυξήσουμε την ικανότητα παραγωγής ισχύος χρησιμοποιούμε επαγωγικούς κινητήρες με δύο περιελίξεις στο στάτη, όπου η μία από αυτές διαθέτει μεγαλύτερο αριθμό πόλων, ώστε να δύναται να λειτουργήσει σε συστήματα με χαμηλά επίπεδα ανέμου, ενώ η άλλη με το μικρότερο αριθμό πόλων είναι αποδοτική όταν τα επίπεδα του ανέμου είναι σχετικά υψηλά.

Οι ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι απλές στη δομή τους, στιβαρές και αξιόπιστες έχοντας παρουσιάσει αρκετά καλά δείγματα λειτουργίας. Το κόστος των ηλεκτρικών τους εξαρτημάτων είναι σχετικά χαμηλό. Τα μειονεκτήματά τους είναι η ανεξέλεγκτη κατανάλωση άεργου ισχύος, η μηχανική καταπόνηση και η περιορισμένη δυνατότητα για έλεγχο της ισχύος. Λόγω της λειτουργίας τους σε σταθερή ταχύτητα, όλες οι διακυμάνσεις στην ταχύτητα του ανέμου έχουν ως αποτέλεσμα την εμφάνιση διακυμάνσεων στη μηχανική ροπή και στη συνέχεια στην ηλεκτρική ισχύ στο δίκτυο. Στην περίπτωση ασθενών δικτύων, οι διακυμάνσεις ισχύος μπορούν να οδηγήσουν και σε μεγάλες διακυμάνσεις της τάσης, οι οποίες, με τη σειρά τους, να οδηγήσουν σε σημαντικές απώλειες στις γραμμές μεταφοράς.

4.3.2 Ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας

Τα τελευταία χρόνια, οι ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας αποτελούν τον κυρίαρχο τύπο μεταξύ των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών. Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας έχουν σχεδιαστεί για να επιτυγχάνουν τη μέγιστη δυνατή αεροδυναμική αποδοτικότητα σε ένα ευρύ φάσμα ταχυτήτων ανέμου. Με τη λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας μας δίδεται η δυνατότητα να προσαρμόζουμε, δηλαδή να αυξήσουμε ή να μειώσουμε την ταχύτητα περιστροφής ω της ανεμογεννήτριας ως προς την ταχύτητα του ανέμου v . Με αυτόν τον τρόπο, διατηρείται σταθερός ο λόγος ταχυτήτων λ σε μια προκαθορισμένη τιμή που αντιστοιχεί στον μέγιστο συντελεστή ισχύος (power factor = 1). Σε αντίθεση με ένα σύστημα σταθερής ταχύτητας, ένα σύστημα μεταβλητής ταχύτητας διατηρεί τη ροπή της γεννήτριας αρκετά σταθερή και οι διακυμάνσεις του ανέμου απορροφώνται από αλλαγές στη ταχύτητα της ανεμογεννήτριας.

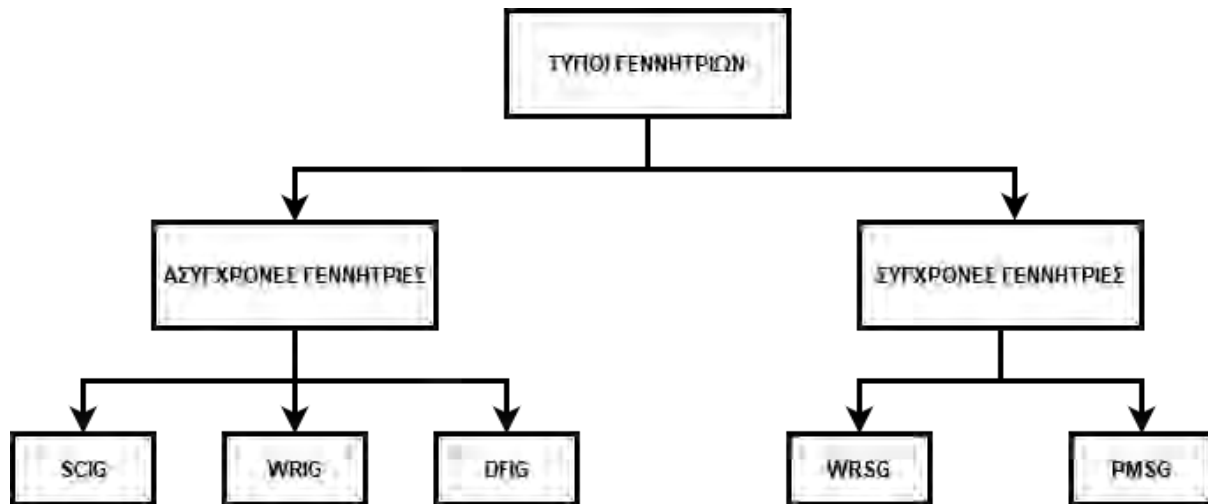
Το ηλεκτρικό σύστημα μιας ανεμογεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας είναι πιο περίπλοκο από αυτό των ανεμογεννητριών σταθερής ταχύτητας. Είναι συνήθως εξοπλισμένο με μια επαγωγική σύγχρονη γεννήτρια, που είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο μέσω ενός μετατροπέα ισχύος. Ο μετατροπέας ισχύος ελέγχει την ταχύτητα της γεννήτριας. Δηλαδή, οι διακυμάνσεις ισχύος που προκαλούνται από τυχόν μεταβολές του ανέμου απορροφώνται κυρίως από αλλαγές στην ταχύτητα του ρότορα της γεννήτριας και κατά συνέπεια στη ταχύτητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας.

Τα πλεονεκτήματα των ανεμογεννητριών μεταβλητής ταχύτητας είναι η αυξημένη δέσμευση ενέργειας, η βελτιωμένη ποιότητα ισχύος και η μειωμένη μηχανική πίεση στην ανεμογεννήτρια. Η εισαγωγή τους αυξάνει τον αριθμό των τύπων των γεννητριών που εφαρμόζονται στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας δίδοντας διάφορους βαθμούς ελευθερίας στο συνδυασμό μεταξύ του τύπου της γεννήτριας και του τύπου του μετατροπέα ισχύος. Αντιθέτως στα μειονεκτήματα τους ανήκουν οι απώλειες στα ηλεκτρονικά ισχύος, η χρήση περισσότερων εξαρτημάτων και το αυξημένο κόστος εξοπλισμού τους λόγω των ηλεκτρονικών ισχύος.

4.4 Κατηγορίες γεννητριών

Μια ανεμογεννήτρια μπορεί να εξοπλιστεί με οποιονδήποτε τύπο τριφασικής γεννήτριας. Σήμερα, η ζήτηση για συμβατό με το ηλεκτρικό δίκτυο ρεύμα μπορεί να

καλυφθεί με τους μετατροπείς συχνότητας, ακόμη και αν η γεννήτρια παρέχει εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) μεταβλητής συχνότητας ή συνεχές ρεύμα (DC). Στην (Εικόνα 21) φαίνονται οι τύποι των γεννητριών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τις ανεμογεννήτριες:



Εικόνα 21: Διαχωρισμός των τριφασικών γεννητριών που χρησιμοποιούν οι ανεμογεννήτριες.

4.4.1 Ασύγχρονες γεννήτριες

Ο πιο συνηθισμένος τύπος γεννήτριας που χρησιμοποιείται στις ανεμογεννήτριες είναι ο επαγωγικός (ασύγχρονος). Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται κατά την προσομοίωση διαθέτουν ασύγχρονες γεννήτριες και για το λόγο αυτό τα χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται διεξοδικά. Το κύριο χαρακτηριστικό των επαγωγικών (ή ασύγχρονων) γεννητριών είναι ότι ο στάτης χρειάζεται επαγωγικό ρεύμα μαγνήτισης. Η ασύγχρονη γεννήτρια, πέραν του ότι καταναλώνει άεργη ισχύ, δεν έχει και τη δυνατότητα μόνιμης μαγνήτισης και για αυτό δεν μπορεί να διεγερθεί αυτόνομα. Επομένως, πρέπει να λάβει αυτό το ρεύμα διέγερσης από μια άλλη πηγή. Η άεργη ισχύς μπορεί να παρέχεται από το ίδιο το δίκτυο ή από ένα σύστημα ηλεκτρονικών ισχύος. Ο ρότορας μιας επαγωγικής γεννήτριας μπορεί να σχεδιαστεί είτε ως βραχυκυκλωμένου δρομέα (Squirrel Cage) ή ως δακτυλιοφόρου δρομέα (Wound Rotor).

Στις επαγωγικές γεννήτριες βραχυκυκλωμένου δρομέα (Squirrel Cage Induction Generator - SCIG) υπάρχει μια μοναδική σχέση μεταξύ της ενεργής ισχύος, της άεργης ισχύος, της τερματικής τάση και της ταχύτητα του ρότορα. Αυτό σημαίνει ότι σε υψηλούς ανέμους η ανεμογεννήτρια μπορεί να παράγει μεγαλύτερη ποσότητα

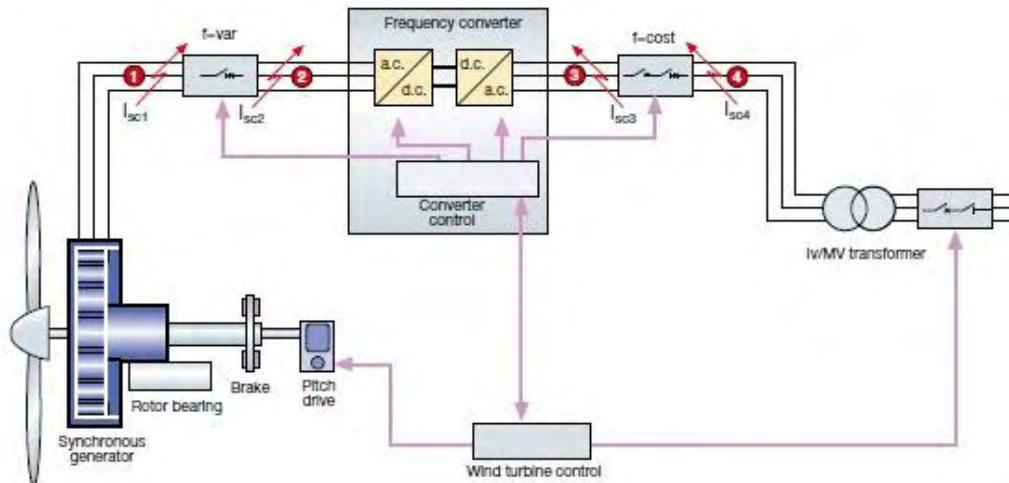
ενεργής ισχύος μόνο όταν η γεννήτρια αντλεί περισσότερη αέργη ισχύ. Για μία γεννήτρια τύπου SCIG, η ποσότητα της αέργου ισχύος που καταναλώνεται είναι ανεξέλεγκτη, καθώς ποικίλλει ανάλογα με τις συνθήκες του ανέμου. Χωρίς τα απαραίτητα ηλεκτρικά εξαρτήματα για την παροχή της αέργης ισχύος, η αέργη ισχύς πρέπει να ληφθεί απευθείας από το δίκτυο προκαλώντας, έτσι, πρόσθετες απώλειες στις γραμμές μεταφοράς και θέτοντας σε ορισμένες περιπτώσεις το δίκτυο σε αστάθεια. Για να μειωθεί αυτή η κατανάλωση αέργης ισχύος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διατάξεις πυκνωτών ή σύγχρονοι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος.

Σε περίπτωση σφάλματος στο δίκτυο, οι επαγωγικές γεννήτριες βραχυκυκλωμένου δρομέα χωρίς σύστημα αντιστάθμισης αέργης ισχύος μπορούν να οδηγήσουν σε αστάθεια της τάσης στο δίκτυο. Ο ρότορας των ανεμογεννητριών επιταχύνεται (η ολίσθηση αυξάνεται), όταν συμβαίνει σφάλμα, λόγω της ανισορροπίας μεταξύ της ηλεκτρικής και της μηχανικής ροπής. Έτσι, όταν αυτό εκκαθαρισθεί, οι SCIG απορροφούν μια μεγάλη ποσότητα αέργης ισχύος από το δίκτυο, γεγονός που οδηγεί σε περαιτέρω μείωση της τάσης. Οι SCIG μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο σε ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας όσο και σε ανεμογεννήτριες πλήρους μεταβλητής ταχύτητα.

Στην περίπτωση των επαγωγικών γεννητριών δακτυλιοφόρου δρομέα (Wound Rotor Induction Generator - WRIG), με την χρήση των ηλεκτρονικών ισχύος, η γεννήτρια μπορεί να μαγνητίζεται είτε από το κύκλωμα του στάτη είτε από το κύκλωμα ρότορα. Επίσης, ανακτά την ενέργεια ολίσθησης από το κύκλωμα του ρότορα και την τροφοδοτεί στην έξοδο του στάτη. Το κύριο μειονέκτημα των επαγωγικών γεννητριών δακτυλιοφόρου δρομέα (WRIG) είναι ότι είναι πιο ακριβές και όχι τόσο ανθεκτικές όσο οι επαγωγικές γεννήτριες βραχυκυκλωμένου δρομέα (SCIG).

Οι επαγωγικές γεννήτριες διπλής τροφοδοσίας (Doubly Fed Induction Generator - DFIG) αποτελούνται από μια επαγωγική γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα (WRIG), όπου περιελίξεις του στάτη είναι απευθείας συνδεδεμένες στο τριφασικό δίκτυο σταθερής συχνότητας και οι περιελίξεις του ρότορα είναι προσαρτημένες σε έναν αμφίδρομο μετατροπέα ισχύος. Ο όρος «διπλή τροφοδοσία» αναφέρεται στο γεγονός ότι η τάση στον στάτη εφαρμόζεται απευθείας από το δίκτυο, ενώ η τάση στον ρότορα δημιουργείται από το μετατροπέα ισχύος (Εικόνα 22). Αυτό το σύστημα

επιτρέπει μια λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας σε ένα μεγάλο, αλλά περιορισμένο εύρος. Ο μετατροπέας αντισταθμίζει τη διαφορά μεταξύ της μηχανικής και της ηλεκτρικής συχνότητας με έγχυση ρεύματος του ρότορα με μεταβλητή συχνότητα. Επομένως, τόσο κατά την κανονική λειτουργία όσο και κατά την εμφάνιση βραχυκυκλωμάτων η συμπεριφορά της γεννήτριας καθορίζεται από τον μετατροπέα ισχύος και τους ελεγκτές του.



Εικόνα 22: Επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας (πηγή ABB).

Ο μετατροπέας ισχύος αποτελείται από δύο μετατροπείς, τον μετατροπέα στη πλευρά του ρότορα της γεννήτριας και τον μετατροπέα στην πλευρά του ηλεκτρικού δικτύου, οι οποίοι ελέγχονται ανεξάρτητα μεταξύ τους. Η κύρια ιδέα είναι ότι ο μετατροπέας από την πλευρά του ρότορα ελέγχει την ενεργή και άεργη ισχύ ελέγχοντας το ρεύμα του ρότορα, ενώ ο μετατροπέας στη πλευρά του δικτύου ελέγχει την DC τάση και εξασφαλίζει λειτουργία μετατροπής με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος (δηλαδή μηδενική άεργη ισχύς).

Οι επαγωγικές γεννήτριες διπλής τροφοδοσίας (DFIG) εμφανίζουν πολλά πλεονεκτήματα. Αρχικά, έχουν τη δυνατότητα να ελέγχουν την άεργη ισχύ και να αποσυνδέουν τον ενεργό και άεργο έλεγχο ισχύος ελέγχοντας ανεξάρτητα το ρεύμα διέγερσης του ρότορα. Επίσης, δεν είναι απαραίτητη η μαγνήτιση από τη ηλεκτρικό δίκτυο, καθώς οι γεννήτριες αυτού του τύπου μπορούν να μαγνητιστούν από το κύκλωμα του ρότορα. Επιπλέον, είναι ικανές να παράγουν άεργη ισχύ που μπορεί να αποδοθεί στον στάτη από τον μετατροπέα στη πλευρά του δικτύου. Ωστόσο, ο μετατροπέας από την πλευρά του δικτύου λειτουργεί σε κανονικές συνθήκες με

μοναδιαίο συντελεστή ισχύος και δεν εμπλέκεται στην ανταλλαγή άεργου ισχύος μεταξύ της γεννήτριας και του δικτύου. Στην περίπτωση ενός αδύναμου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, όπου η τάση μπορεί να ην εμφανίζει σταθερή τιμή, οι επαγωγικές γεννήτριες διπλής τροφοδοσίας μπορούν να διαταχθούν κατάλληλα ώστε να παράγουν ή να απορροφούν ποσότητα άεργου ισχύος προς ή από το δίκτυο, με σκοπό τον έλεγχο της τάσης.

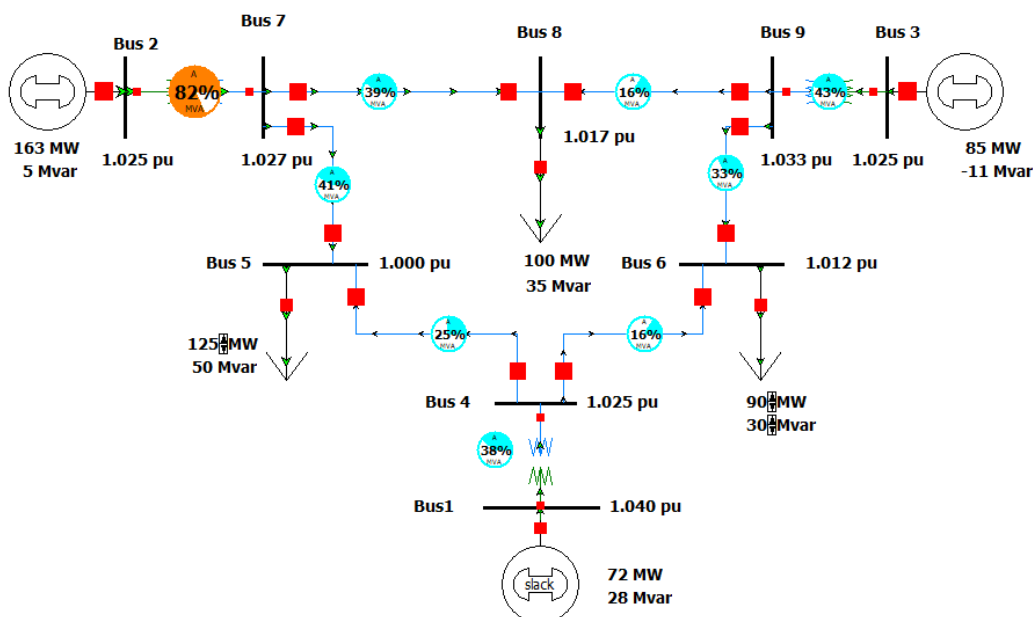
Κεφάλαιο 5

Προσομοίωση

5.1 Περιγραφή του προβλήματος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, εξετάζω την ικανότητα ενός συστήματος 9 ζυγών (Εικόνα 23) να διατηρήσει της μεταβατική του ευστάθεια κατά την εμφάνιση διάφορων βραχυκυκλωμάτων και προσδιορίζω τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισής τους (CCT).

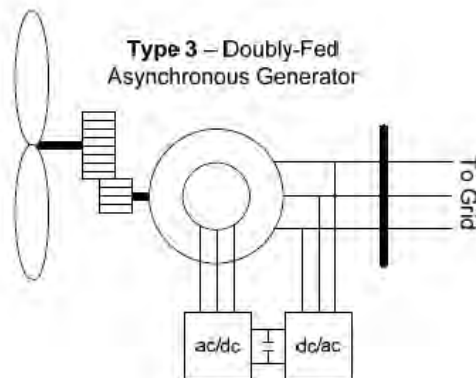
Αρχικά, η προσομοίωση γίνεται στο δίκτυο των 9 ζυγών, της IEEE, όπου η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με συμβατικές γεννήτριες στους ζυγούς 1 (Slack Bus), 2 και 3. Στη συνέχεια, ως πρώτο βήμα, αντικαθιστούμε εξ' ολοκλήρου την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη συμβατική γεννήτρια του ζυγού 3 (85 MW) με μια ανεμογεννήτρια τύπου 3 και μελετάμε τις επιπτώσεις που επιφέρει αυτή η αλλαγή τόσο στη διατήρηση της μεταβατικής ευστάθειας του δικτύου όσο και στον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης. Έπειτα, ως δεύτερο βήμα, μειώνουμε στο μισό την παραγωγή της πραγματικής ισχύος της ανεμογεννήτριας του ζυγού 3 (43 MW) και συγκρίνουμε τα αποτελέσματα αυτής της περίπτωσης με τα προηγούμενα αποτελέσματα.



Εικόνα 23: Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας που θα χρησιμοποιείται κατά τη προσομοίωση για τον προσδιορισμό του CCT και τη μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας.

5.2 Διείσδυση ανεμογεννητριών

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη ενότητα, η μελέτη της συμπεριφοράς του δικτύου των 9 ζυγών κατά την ένταξη των αιολικών σταθμών παραγωγής βασίζεται σε ανεμογεννήτριες τύπου 3 (Doubly Fed Induction Generator) (Εικόνα 24).

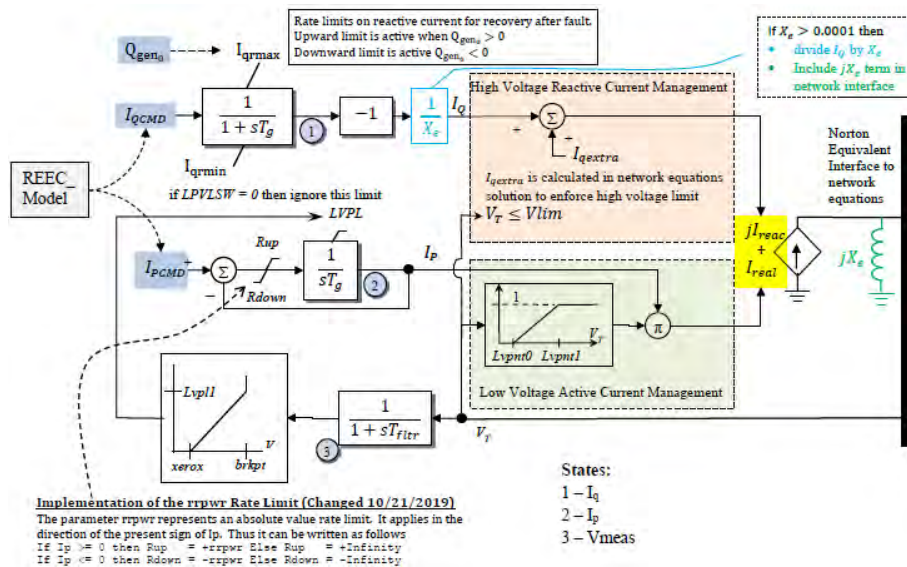


Εικόνα 24: Διάγραμμα ανεμογεννήτριας διπλού τύπου που χρησιμοποιείται κατά την προσομοίωση.

Η προσομοίωση των ανεμογεννητριών στο λογισμικό PowerWorld Simulation πραγματοποιείται με την βοήθεια 7 μπλοκ. Κάθε ένα από αυτά, έχει δικιές του παραμέτρους που θα πρέπει να οριστούν με ακρίβεια πριν την έναρξη της προσομοίωσης για την ορθή απεικόνιση της συμπεριφοράς των ανεμογεννητριών. Οι παράμετροι των μπλοκ τέθηκαν σύμφωνα με τις οδηγίες του Western Electricity Coordinating Council (WECC).

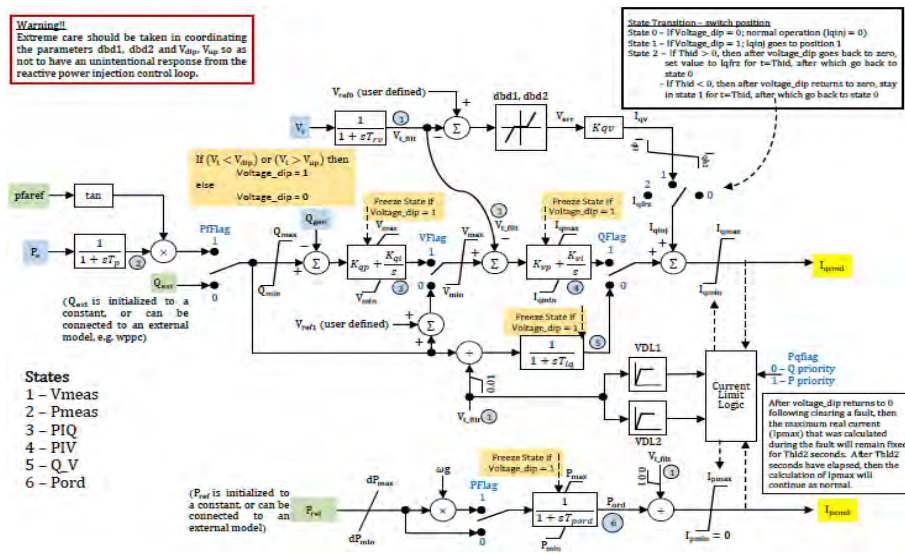
Τα 7 μπλοκ που δομούν τις ανεμογεννήτριες τύπου 3 είναι τα εξής:

- 1) Το regc_a (renewable energy generator/converter model), το οποίο απεικονίζεται στην Εικόνα 25 και έχει ως εισόδους τις τιμές των I_{QCMD} και I_{PCMD} ως εξόδους τα I_{reac} και I_{real} που εισάγονται στο δίκτυο.



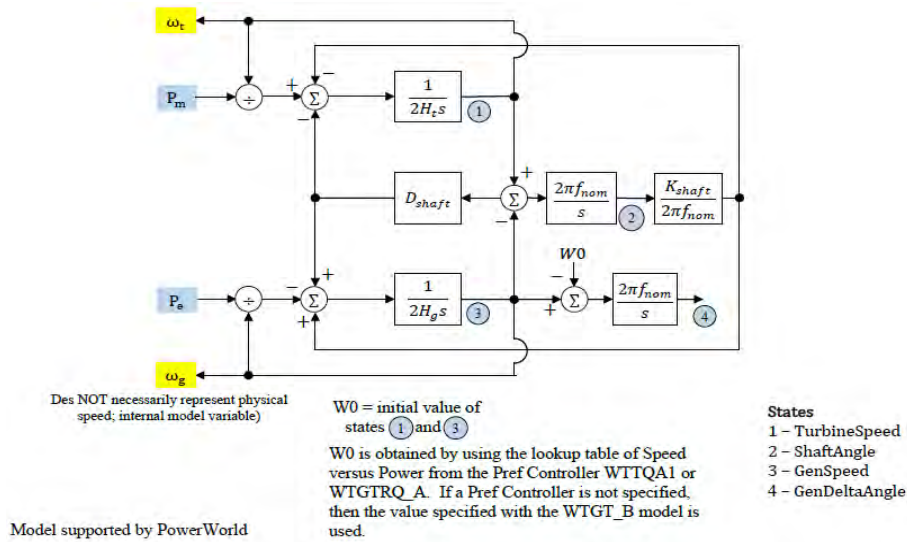
Εικόνα 25: Renewable energy generator/converter model.

2) Το reec_a (renewable energy electrical controls model), το οποίο απεικονίζεται στην Εικόνα 26 έχει εισόδους τα P_{ref} , Q_{ref} , Q_{gen} και εξόδους τα I_{qCMD} και I_{pCMD} .



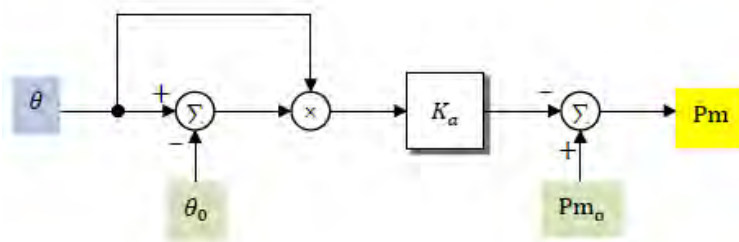
Εικόνα 26: Renewable energy electrical controls model.

3) Το wtgt_a (wind turbine generator driven-train) (Εικόνα 27) με δεδομένα εισόδου τα P_m και P_e και δεδομένα εξόδου την ταχύτητα ως διάνυσμα των τιμών ω_g και ω_t .



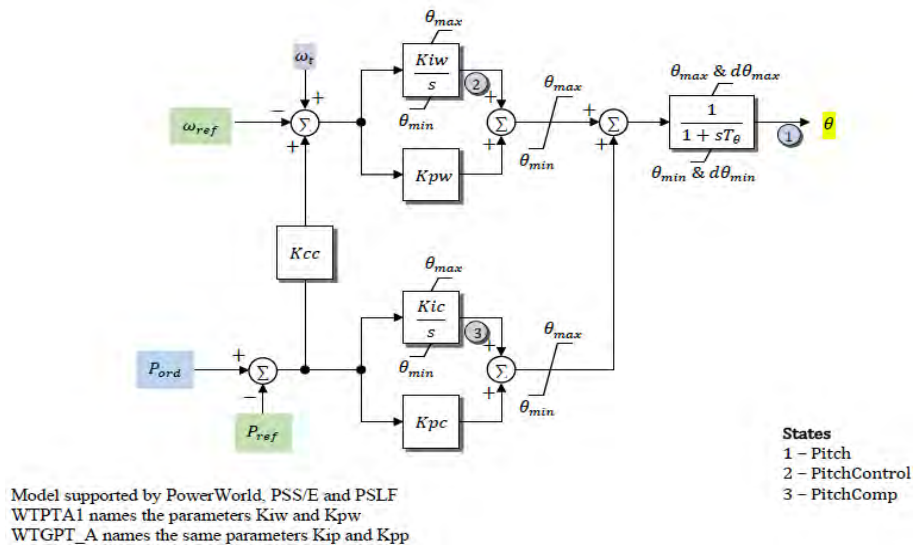
Εικόνα 27: Wind turbine generator driven-train.

- 4) Το wtgar_a (wind turbine generator aero-dynamics), το οποίο απεικονίζεται στην Εικόνα 28 και αποτελεί ένα απλό γραμμικό σύστημα που περιγράφει την αεροδυναμική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας.



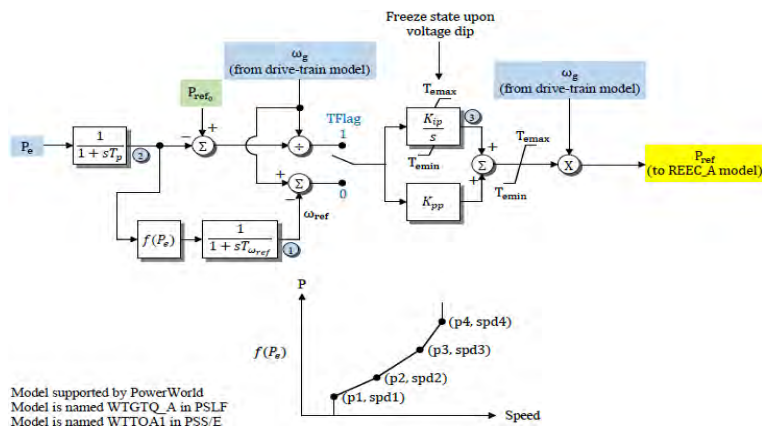
Εικόνα 28: Wind turbine generator aero-dynamics.

- 5) Το wtgpt_a (wind turbine generator pitch-controller) που απεικονίζεται στην Εικόνα 29 και είναι υπεύθυνο για την ρύθμιση των λεπίδων της ανεμογεννήτριας.



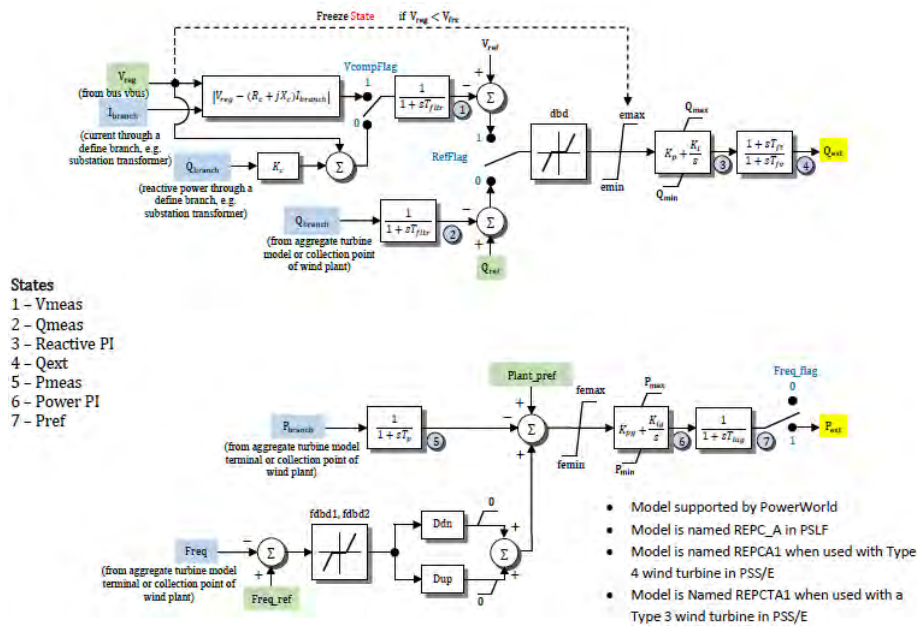
Εικόνα 29: Wind turbine generator pitch-controller.

6) Το wtgtrq_a (generator torque control) που απεικονίζεται στην Εικόνα 30 και είναι υπεύθυνο για τον αυτόματο έλεγχο της ροπής της γεννήτριας. Η τιμή εξόδου του είναι το P_{ref} , μια εκ των εισόδων του reec_a.



Εικόνα 30: Generator torque control.

7) Το repc_a (renewable energy plant controller) (Εικόνα 31), με εισόδους τις μεταβλητές V_{ref} , V_{reg} , Q_{ref} , Q_{gen} .



Εικόνα 31: Renewable energy plant controller.

5.3 Μελέτη μεταβατικής ευστάθειας

Στην ενότητα αυτή, θα παρουσιασθεί με ακρίβεια ο τρόπος εκτέλεσης της προσομοίωσης με τη βοήθεια του λογισμικού PowerWorld Simulation. Θα πρέπει να τονισθεί πως οι διαφοροποιήσεις του δικτύου, που χρησιμοποιείται κατά τη μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας, διαιρούνται σε 3 αρχικές περιπτώσεις. Αυτές είναι οι εξής:

- Περίπτωση A: Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται εξ' ολοκλήρου από συμβατικούς σταθμούς παραγωγής (συμβατικές γεννήτριες).
- Περίπτωση B: Εντάσσεται στο ζυγό 3 του συστήματος μια ανεμογεννήτρια τύπου 3. Η ανεμογεννήτρια αυτή αντικαθιστά το 100% της παραγωγής της αρχικής γεννήτριας, μετατρέποντας το δίκτυο σε ένα υβριδικό σύστημα.
- Περίπτωση C: Η παραγωγή της ενεργής ισχύος της ανεμογεννήτριας στο ζυγό 3 ελαττώνεται στο 50% της περίπτωσης B. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της παραγωγής ενεργής ισχύος από τη συμβατική γεννήτρια του ζυγού 1 (ζυγός αναφοράς), ενώ η παραγωγή πραγματικής ισχύος στο ζυγό 2 μένει αμετάβλητη.

Τα δίκτυα των τριών παραπάνω περιπτώσεων, για τη μελέτη της μεταβατικής τους ευστάθειας, υποβάλλονται σε δύο τύπους στερεών βραχυκυκλωμάτων. Αρχικά, μελετάται το αντίκτυπο που έχει στην ευστάθεια του συστήματος η εμφάνιση

στερεών τριφασικών βραχυκυκλωμάτων (3 Phase Solid Fault) στους ζυγούς 5, 6, 7, 8 και 9 του δικτύου και ερευνάται ο κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης για κάθε σφάλμα. Έπειτα, μελετάται η ικανότητα του δικτύου να παραμείνει ευσταθές κατά την εμφάνιση στερεού μονοφασικού βραχυκυκλώματος (SLG Solid Fault) στους ίδιους ζυγούς και ξαναπροσδιορίζεται ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης για κάθε σφάλμα.

Η ευστάθεια ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, όπως έχει αναφερθεί, προκύπτει ως συμπέρασμα από την προσομοίωση με τη χρήση του λογισμικού από τις εξής 6 καμπύλες:

- 1) Της γωνιάς ισχύος της γεννήτριας δ (αναφορικά με την γωνία της γεννήτριας του ζυγού αναφοράς) σε μοίρες.
- 2) Της συχνότητας f των γεννητριών του δικτύου σε Hz .
- 3) Της τάσης V των ζυγών των γεννητριών σε $p.u.$
- 4) Της πραγματικής ισχύος P των γεννητριών σε MW .
- 5) Της άεργης ισχύος Q των γεννητριών σε $MVar$.
- 6) Της γωνιάς ισχύος της γεννήτριας δ σε μοίρες σε περίπτωση αστάθειας.

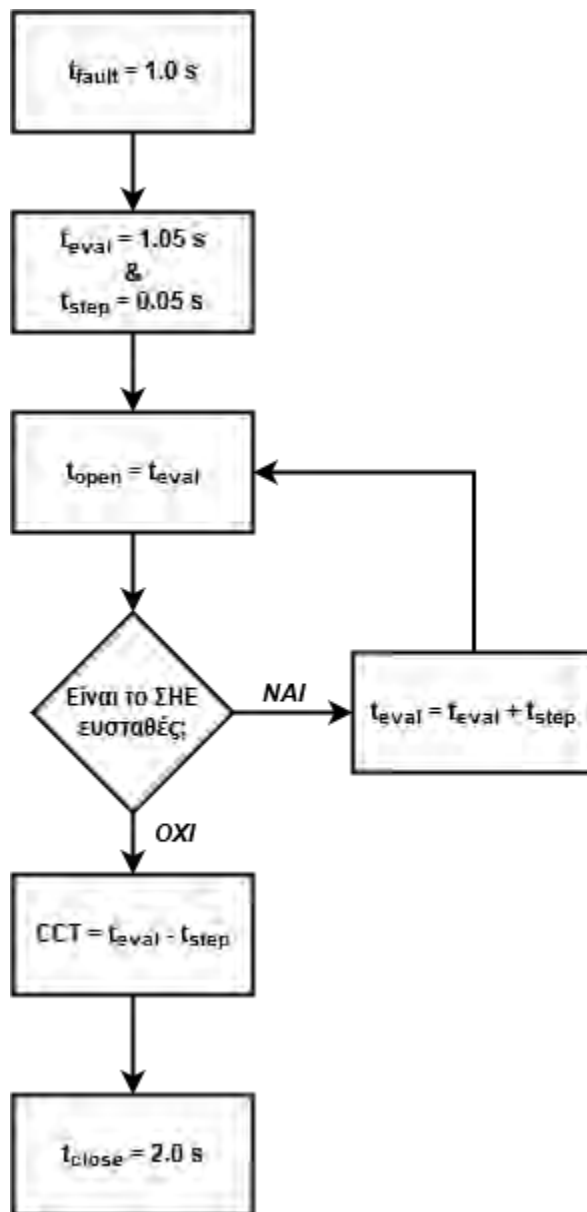
Ο προσδιορισμός του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης των σφαλμάτων στο σύστημα υπολογίζεται επιτυχώς με την βοήθεια της παρακάτω αλγοριθμικής σκέψης:

- Βήμα 1: Ορισμός της τιμής $t_{fault} = 1.0s$. Στην προσομοίωση θεωρείται ότι το σφάλμα εμφανίζεται στο πρώτο δευτερόλεπτο της προσομοίωσης, καθώς το χρονικό διάστημα $\Delta t = 0-1s$ το PowerWorld Simulation εκτελεί την Ανάλυση Ροής Φορτίου.
- Βήμα 2: Η επαναληπτική διαδικασία που εφαρμόζεται για τον προσδιορισμό του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης απαιτεί ένα χρονικό βήμα σταθερής τιμής, το οποίο ορίζεται ως: $t_{step} = 50ms = 0.05s$. Επίσης, ορίζεται η μεταβλητή t_{eval} , που συμβολίζει τη χρονική στιγμή που εξετάζεται για το εάν αποτελεί το ζητούμενο κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης. Η διαδικασία ξεκινά με τη πρώτη χρονική στιγμή προς εξέταση. Αυτή είναι η $t_{eval} = 1.05s$, δηλαδή η τιμή της ισούται με τη χρονική στιγμή που εμφανίζεται το βραχυκύκλωμα ($t_{fault} = 1.0s$) συν το t_{step} .
- Βήμα 3: Ορίζεται η χρονική στιγμή t_{open} , κατά την οποία ο υπεύθυνος διακόπτης ισχύος θα ανοίξει, ώστε να αφαιρεθεί η γραμμή από το δίκτυο και

να καθαριστεί από το σφάλμα. Η τιμή αυτής της χρονικής στιγμής οφείλει να έχει την ίδια τιμή με την χρονική στιγμή που εξετάζεται για το εάν αποτελεί κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης. Συνεπώς: $t_{open} = t_{eval}$.

- Βήμα 4: Εξετάζεται εάν κατά το άνοιγμα του διακόπτη ισχύος, στο χρόνο t_{eval} , διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος. Εάν το σύστημα είναι ευσταθές, ανανεώνεται ο προς εξέταση χρόνος σε: $t_{eval} = t_{eval} + t_{step}$ και ο αλγόριθμος επιστρέφει στο βήμα 3, ώστε να εξεταστεί εάν αυτή η νέα τιμή αποτελεί το ζητούμενο κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης. Αντίθετα, εάν το σύστημα χάσει την ευστάθειά του ο αλγόριθμος συνεχίζει στο βήμα 5.
- Βήμα 5: Ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης (CCT) παίρνει την τελευταία τιμή του t_{eval} πριν χαθεί η ευστάθεια του συστήματος.
- Βήμα 6: Ο διακόπτης ισχύος που άνοιξε προηγουμένως για την εκκαθάριση του σφάλματος κλείνει επαναφέροντας τη γραμμή στο σύστημα. Ο χρόνος t_{close} παίρνει την τιμή: $t_{close} = 2.0s$ (ή παραπάνω εφόσον κριθεί απαραίτητο).

Η Εικόνα 32 απεικονίζει την αλγοριθμική σκέψη υλοποίησης της προσομοίωσης για την μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας του συστήματος:



Εικόνα 32: Ο αλγόριθμος που ακολουθείται για τον προσδιορισμό του CCT.

5.4 Προσομοίωση για τον προσδιορισμό του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης

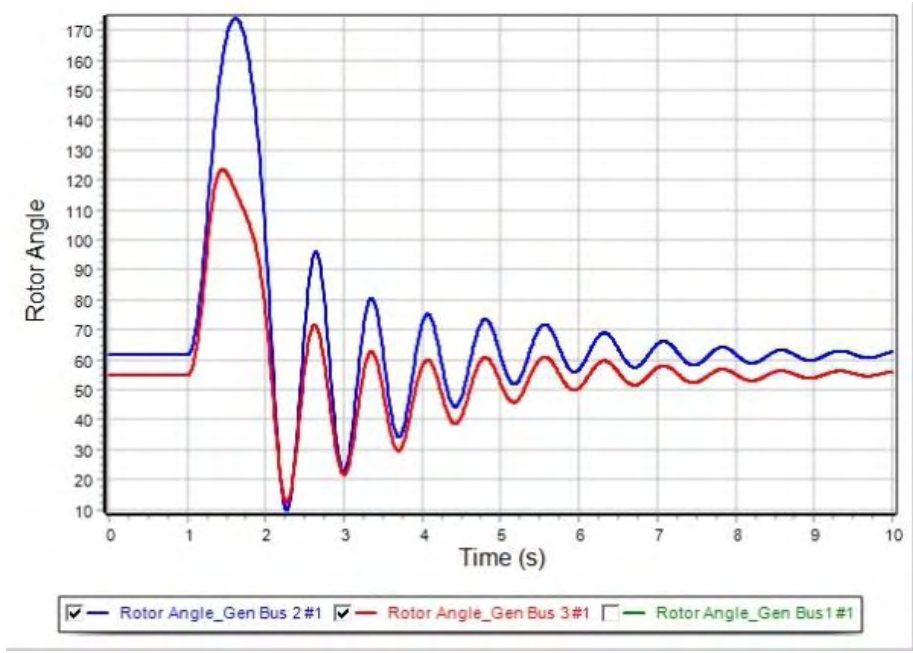
Αρχικά, παρουσιάζεται η μελέτη για την περίπτωση Α του συμβατικού δικτύου, όπου η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται εξ' ολοκλήρου από συμβατικούς σταθμούς παραγωγής (συμβατικές γεννήτριες). Εξετάζεται η δυνατότητα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας να διατηρήσει την μεταβατική του ευστάθεια κατά την εμφάνιση στερεού τριφασικού βραχυκυκλώματος στους ζυγούς 5, 6, 7, 8 και 9 και υπολογίζεται ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης για ένα σφάλμα.

Περίπτωση A1: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 5

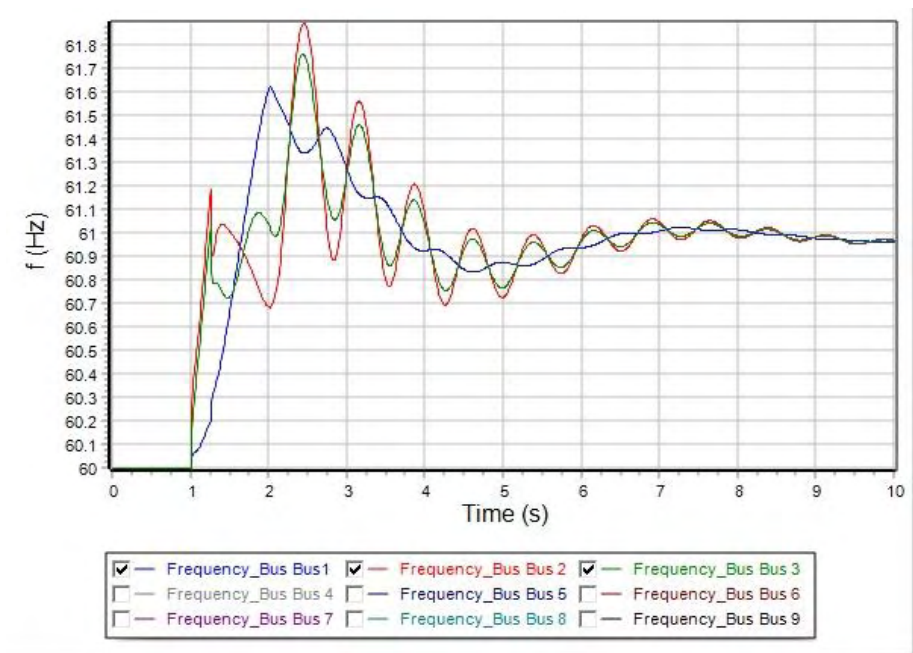
Στον Πίνακα 3 φαίνεται ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 5. Στην Εικόνα 33 απεικονίζονται οι καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.25 δευτερόλεπτα, που προσδιορίστηκε και ως κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος, με αποτέλεσμα να διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος. Στην Εικόνα 34 απεικονίζονται οι καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, ενώ στην Εικόνα 35 οι καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών του συστήματος για τον ίδιο χρόνο εκκαθάρισης. Η Εικόνα 36 και η Εικόνα 37 απεικονίζουν τις καμπύλες της πραγματικής και της άεργης ισχύος των γεννητριών του συστήματος. Τέλος, η Εικόνα 38 απεικονίζει ότι για χρόνο εκκαθάρισης 1.30 δευτερόλεπτα η ευστάθεια του συστήματος χάνεται, καθώς οι καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος δεν αποκτούν νέο σημείο ισορροπίας μετά την εκκαθάριση του σφάλματος.

Πίνακας 3: Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 5.

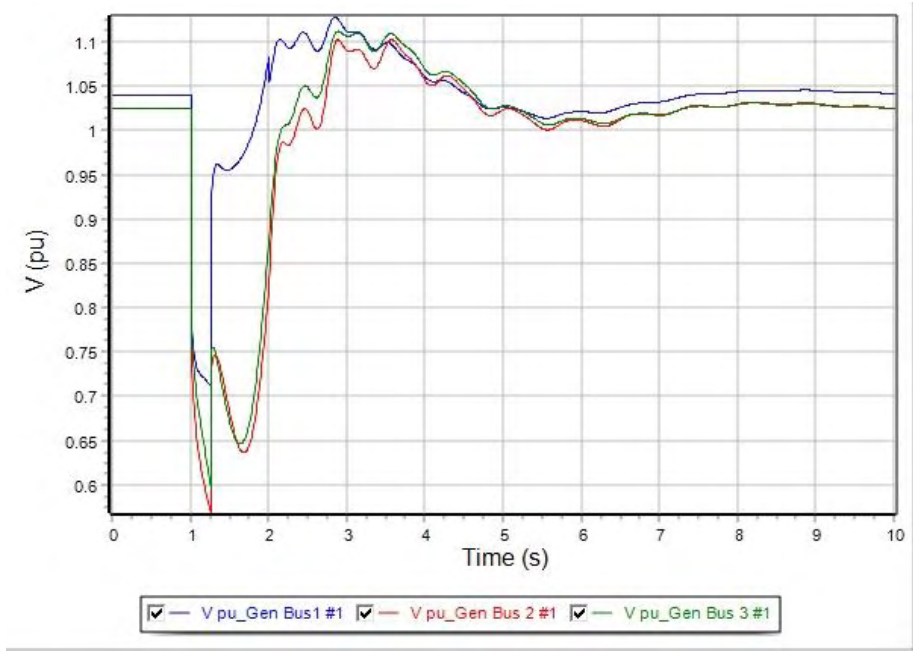
| Διαδικασία | Bus 5 |
|-------------|-------|
| Apply Fault | 1.000 |
| Clear Fault | 1.250 |
| Open Line | 1.250 |
| Close Line | 2.000 |



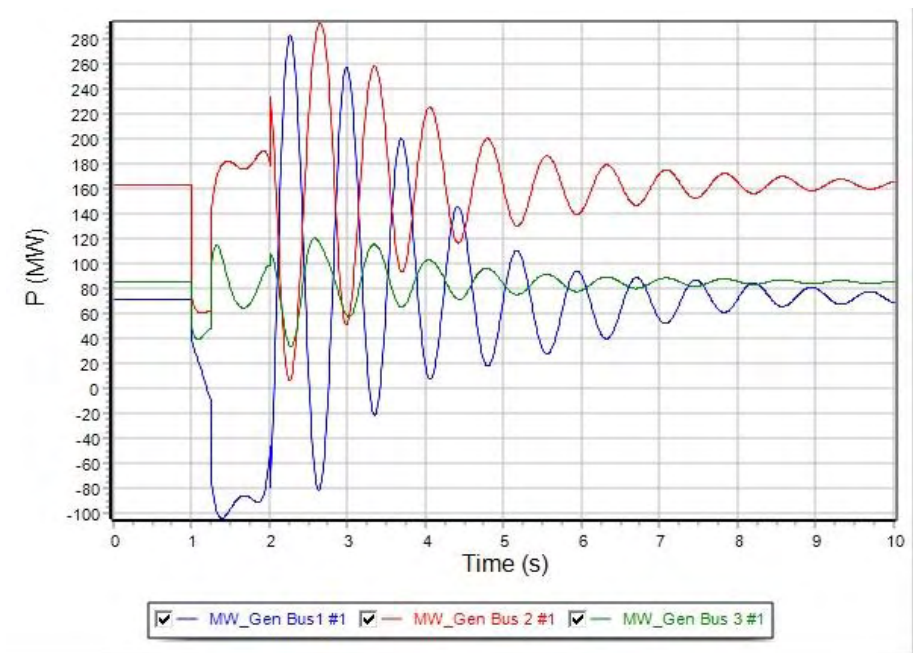
Εικόνα 33: Καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.25 sec, που είναι και ο CCT και διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος.



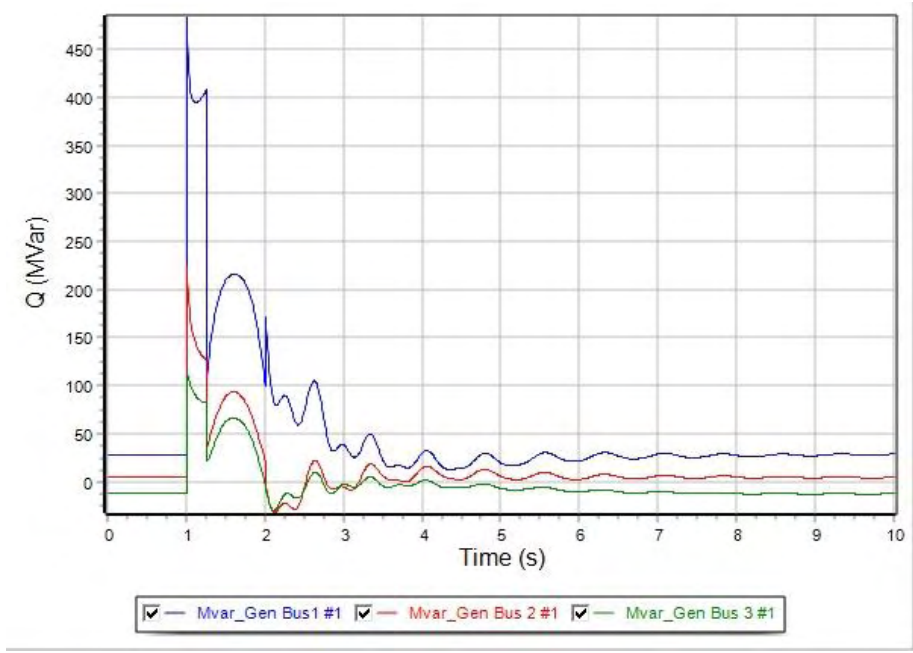
Εικόνα 34: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στα 1.25 sec.



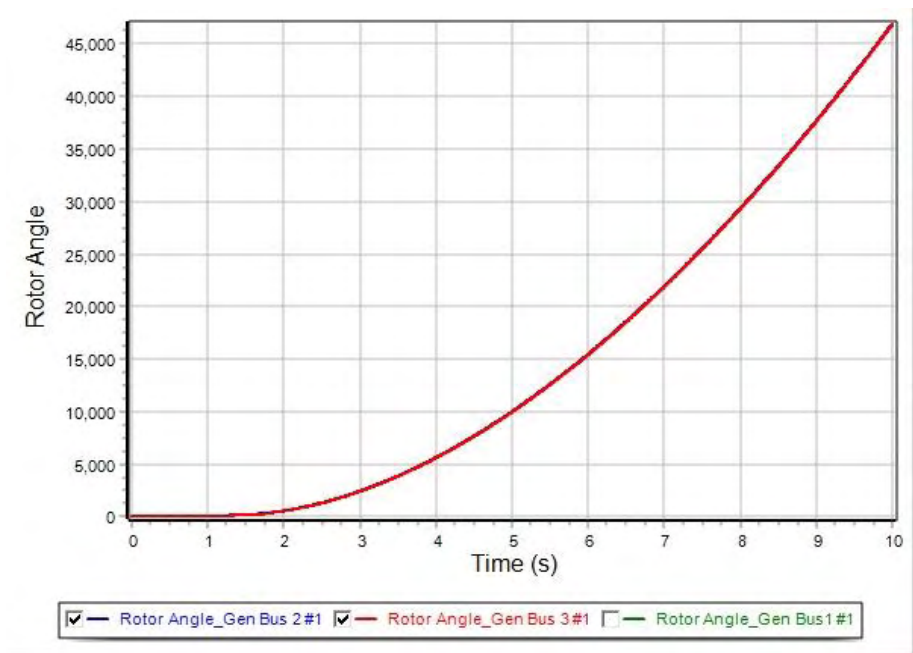
Εικόνα 35: Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στα 1.25 sec.



Εικόνα 36: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών (MW) σε συνάρτηση με τον χρόνο, όπου η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται σε χρόνο 1.25 sec.



Εικόνα 37: Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών (MVar) σε συνάρτηση με τον χρόνο, όπου η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται σε χρόνο 1.25 sec.



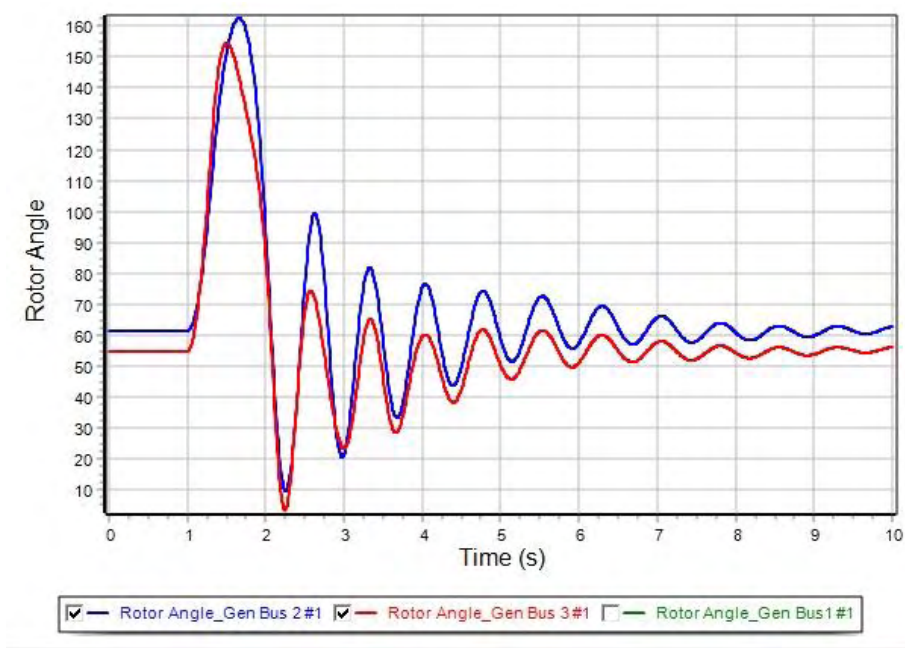
Εικόνα 38: Καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.30 sec και η ευστάθεια του συστήματος χάνεται.

Περίπτωση A2: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 6

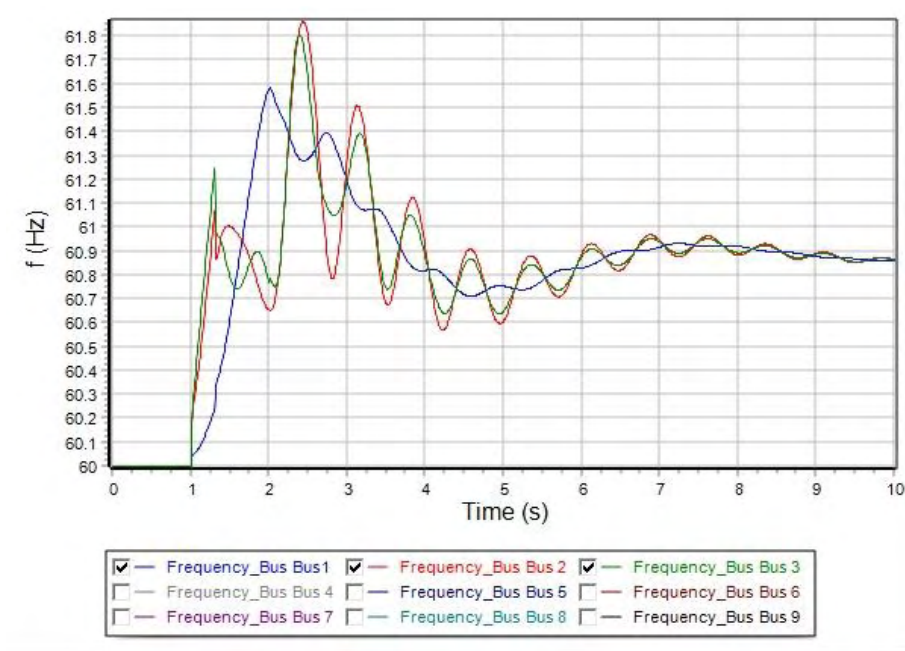
Στον Πίνακα 4 φαίνεται ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 6. Στην Εικόνα 39 απεικονίζονται οι καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.30 δευτερόλεπτα, που προσδιορίστηκε και ως κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος, με αποτέλεσμα να διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος. Στην Εικόνα 40 απεικονίζονται οι καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, ενώ στην Εικόνα 41 οι καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών του συστήματος για τον ίδιο χρόνο εκκαθάρισης. Η Εικόνα 42 και η Εικόνα 43 απεικονίζουν τις καμπύλες της πραγματικής και της άεργης ισχύος των γεννητριών του συστήματος. Τέλος, η Εικόνα 44 απεικονίζει ότι για χρόνο εκκαθάρισης 1.35 δευτερόλεπτα η ευστάθεια του συστήματος χάνεται, καθώς οι καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος δεν αποκτούν νέο σημείο ισορροπίας μετά την εκκαθάριση του σφάλματος.

Πίνακας 4: Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 6.

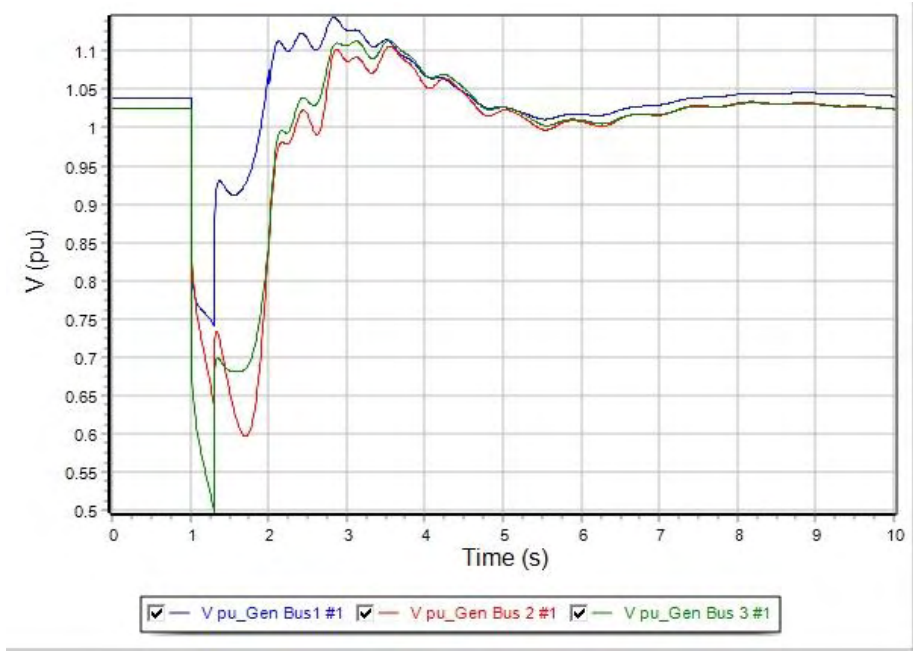
| | |
|-------------|-------|
| Διαδικασία | Bus 6 |
| Apply Fault | 1.000 |
| Clear Fault | 1.300 |
| Open Line | 1.300 |
| Close Line | 2.000 |



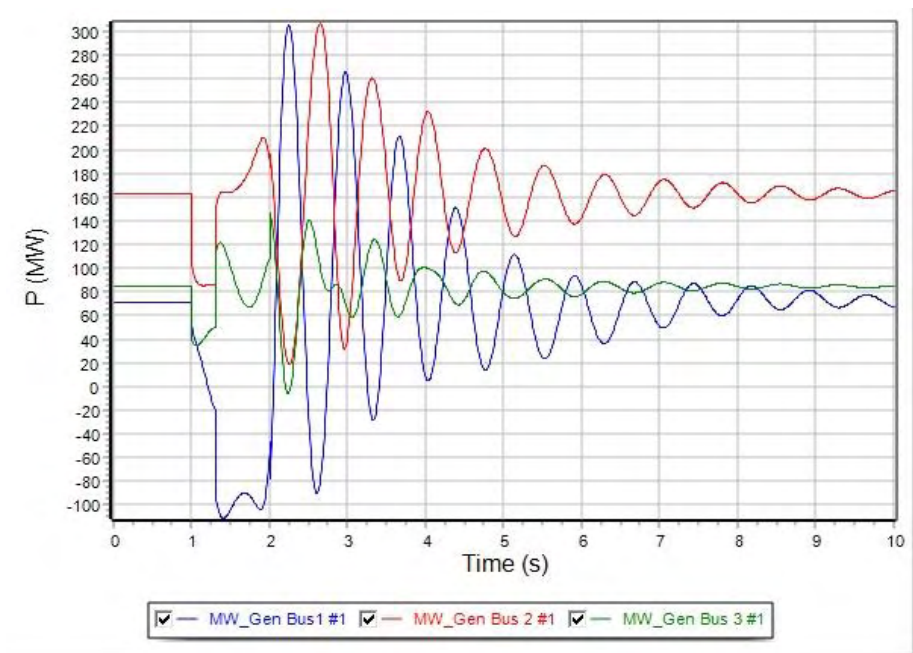
Εικόνα 39: Καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.30 sec, που είναι και ο CCT και διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος.



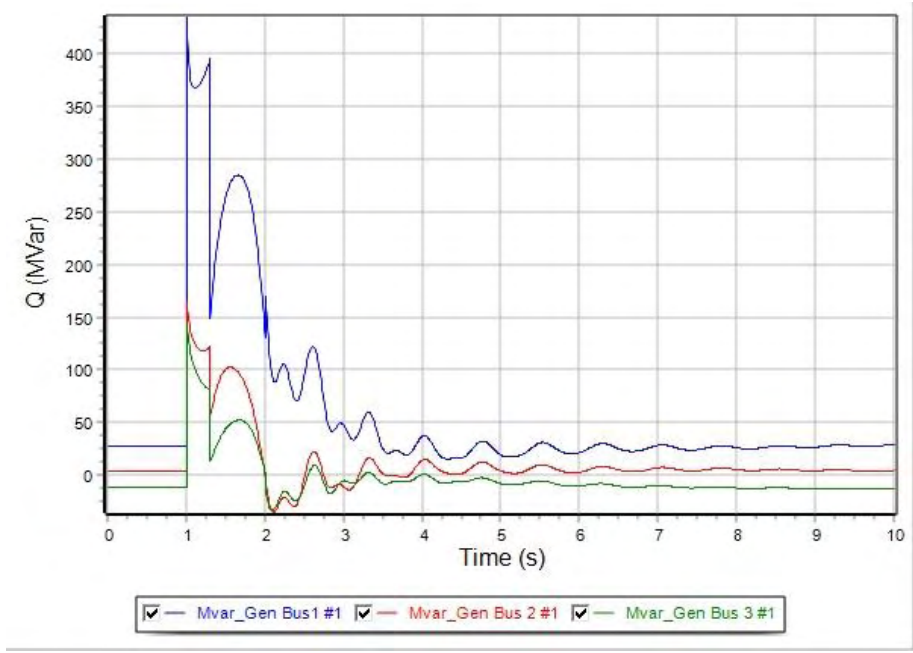
Εικόνα 40: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στα 1.30 sec.



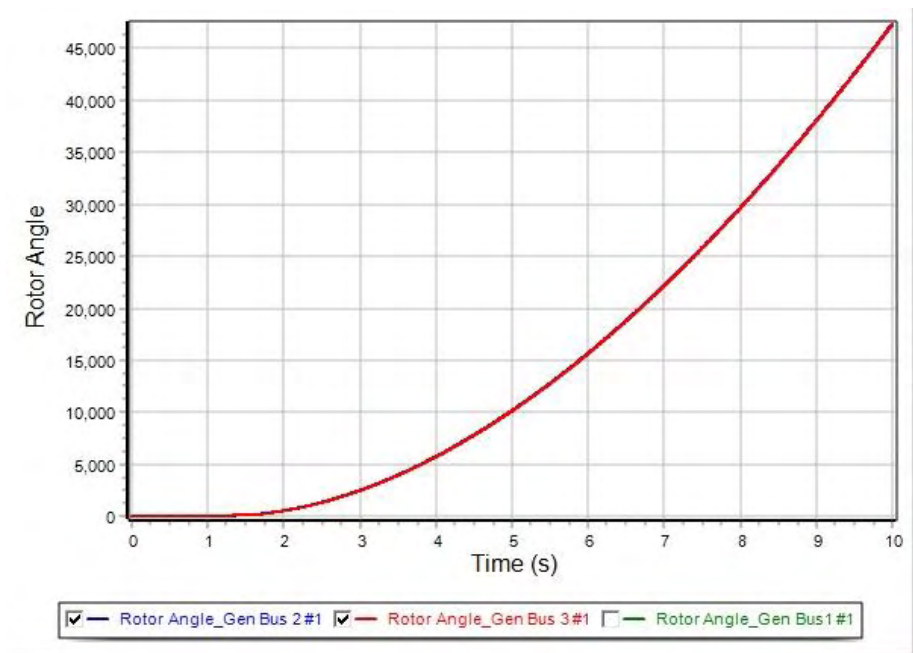
Εικόνα 41: Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στα 1.30 sec.



Εικόνα 42: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών (MW) σε συνάρτηση με τον χρόνο, όπου η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται σε χρόνο 1.30 sec.



Εικόνα 43: Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών (MVar) σε συνάρτηση με τον χρόνο, όπου η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται σε χρόνο 1.30 sec.



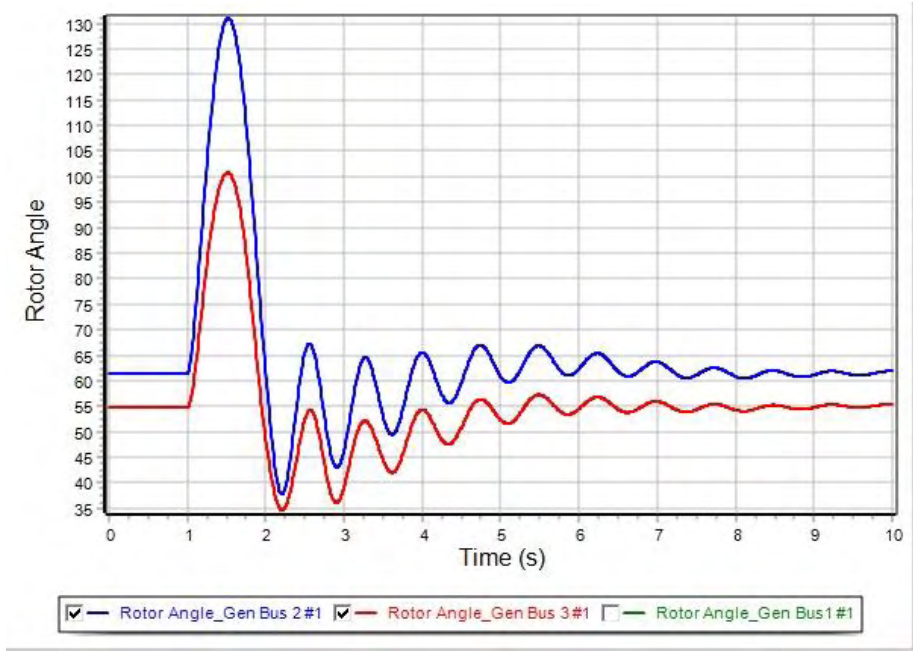
Εικόνα 44: Καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.35 sec και η ευστάθεια του συστήματος χάνεται.

Περίπτωση A3: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 7

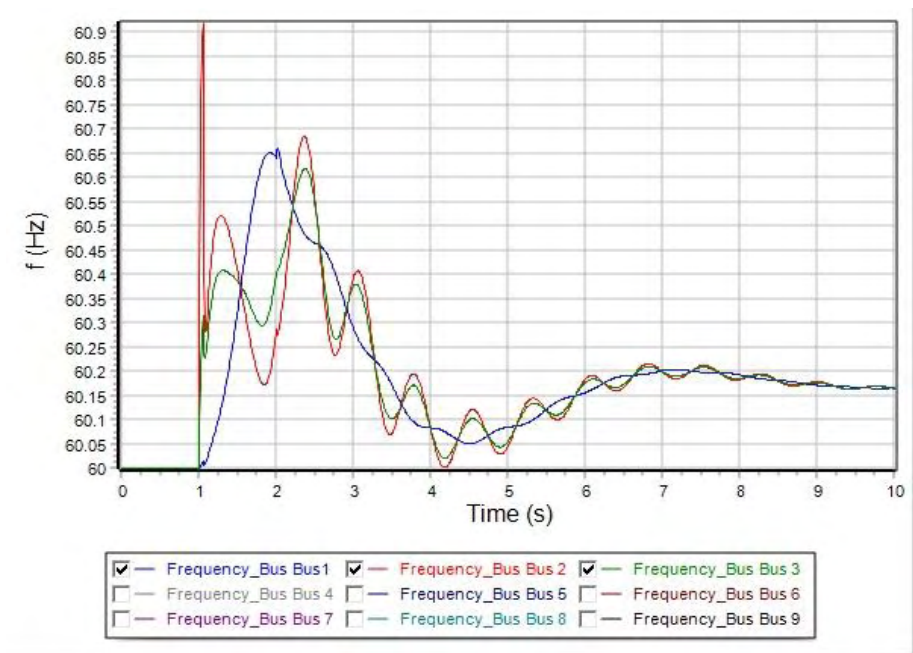
Στον Πίνακα 5 φαίνεται ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 7. Στην Εικόνα 45 απεικονίζονται οι καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.05 δευτερόλεπτα, που προσδιορίστηκε και ως κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος, με αποτέλεσμα να διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος. Στην Εικόνα 46 απεικονίζονται οι καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, ενώ στην Εικόνα 47 οι καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών του συστήματος για τον ίδιο χρόνο εκκαθάρισης. Η Εικόνα 48 και η Εικόνα 49 απεικονίζουν τις καμπύλες της πραγματικής και της άεργης ισχύος των γεννητριών του συστήματος. Τέλος, η Εικόνα 50 απεικονίζει ότι για χρόνο εκκαθάρισης 1.10 δευτερόλεπτα η ευστάθεια του συστήματος χάνεται, καθώς οι καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος δεν αποκτούν νέο σημείο ισορροπίας μετά την εκκαθάριση του σφάλματος.

Πίνακας 5: Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 7.

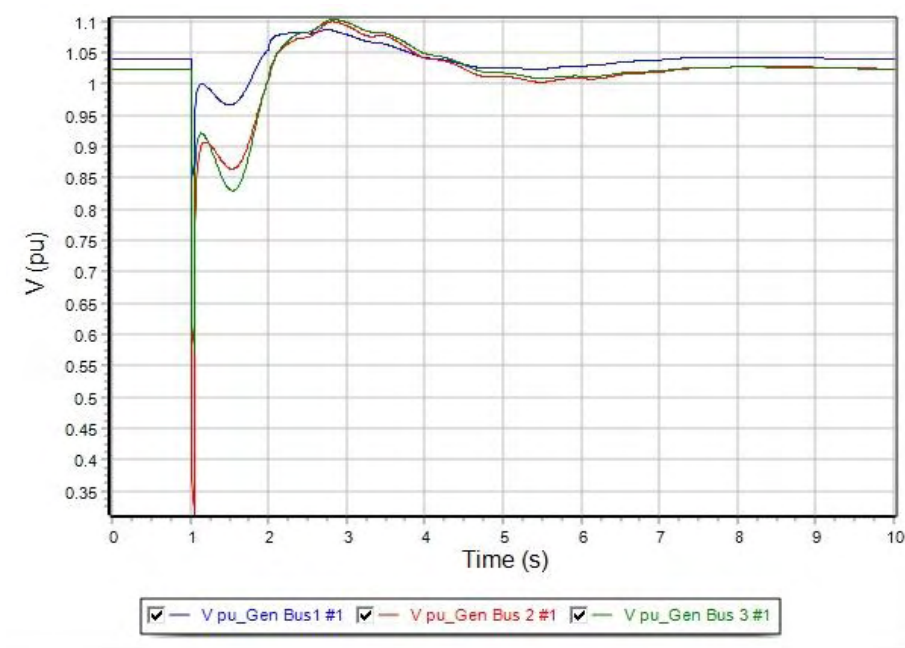
| | |
|-------------|-------|
| Διαδικασία | Bus 7 |
| Apply Fault | 1.000 |
| Clear Fault | 1.050 |
| Open Line | 1.050 |
| Close Line | 2.000 |



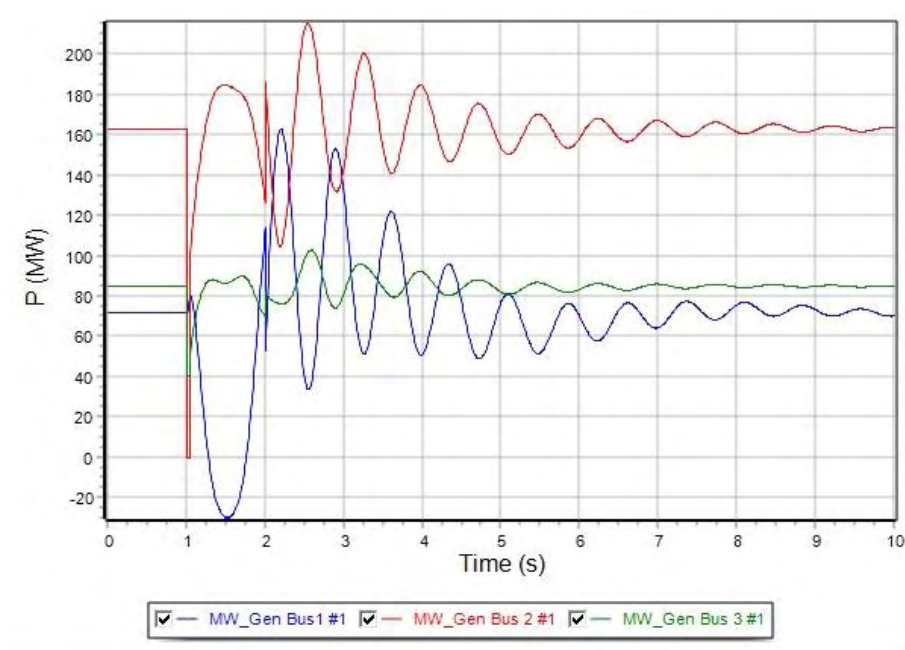
Εικόνα 45: Καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.05 sec, που είναι και ο CCT και διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος.



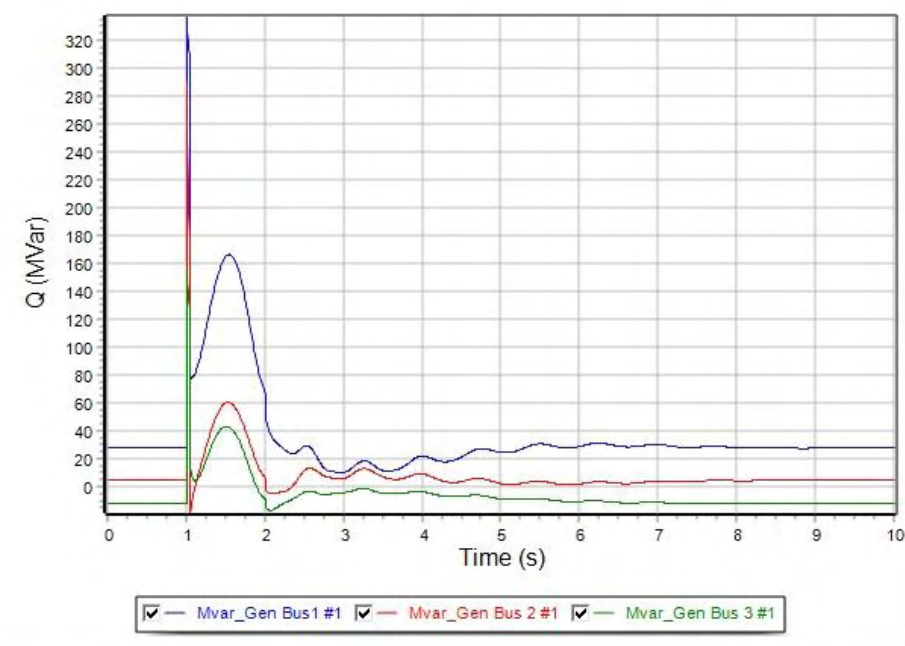
Εικόνα 46: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στα 1.05 sec.



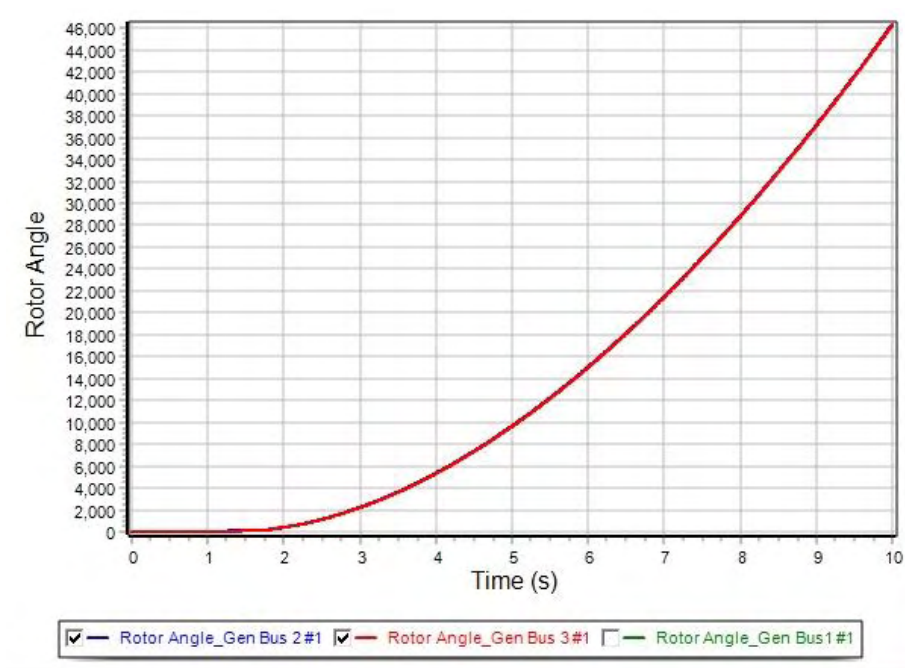
Εικόνα 47: Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στα 1.05 sec.



Εικόνα 48: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών (MW) σε συνάρτηση με τον χρόνο, όπου η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται σε χρόνο 1.05 sec.



Εικόνα 49: Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών (MVar) σε συνάρτηση με τον χρόνο, όπου η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται σε χρόνο 1.05 sec.



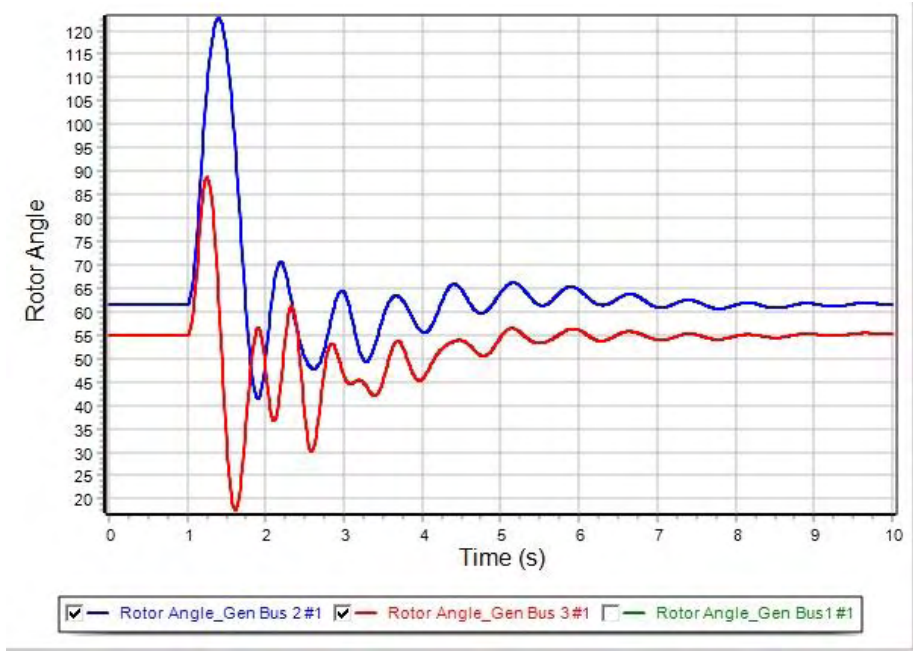
Εικόνα 50: Καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.10 sec και η ευστάθεια του συστήματος χάνεται.

Περίπτωση A4: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 8

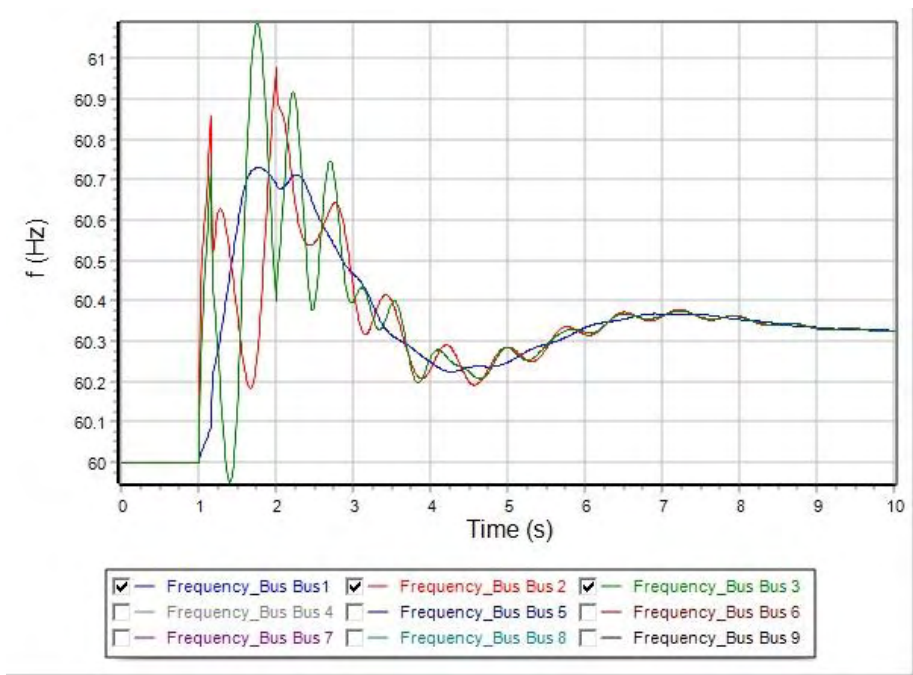
Στον Πίνακα 6 φαίνεται ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 8. Στην Εικόνα 51 απεικονίζονται οι καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.15 δευτερόλεπτα, που προσδιορίστηκε και ως κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος, με αποτέλεσμα να διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος. Στην Εικόνα 52 απεικονίζονται οι καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, ενώ στην Εικόνα 53 οι καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών του συστήματος για τον ίδιο χρόνο εκκαθάρισης. Η Εικόνα 54 και η Εικόνα 55 απεικονίζουν τις καμπύλες της πραγματικής και της άεργης ισχύος των γεννητριών του συστήματος. Τέλος, η Εικόνα 56 απεικονίζει ότι για χρόνο εκκαθάρισης 1.20 δευτερόλεπτα η ευστάθεια του συστήματος χάνεται, καθώς οι καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος δεν αποκτούν νέο σημείο ισορροπίας μετά την εκκαθάριση του σφάλματος.

Πίνακας 6: Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 8.

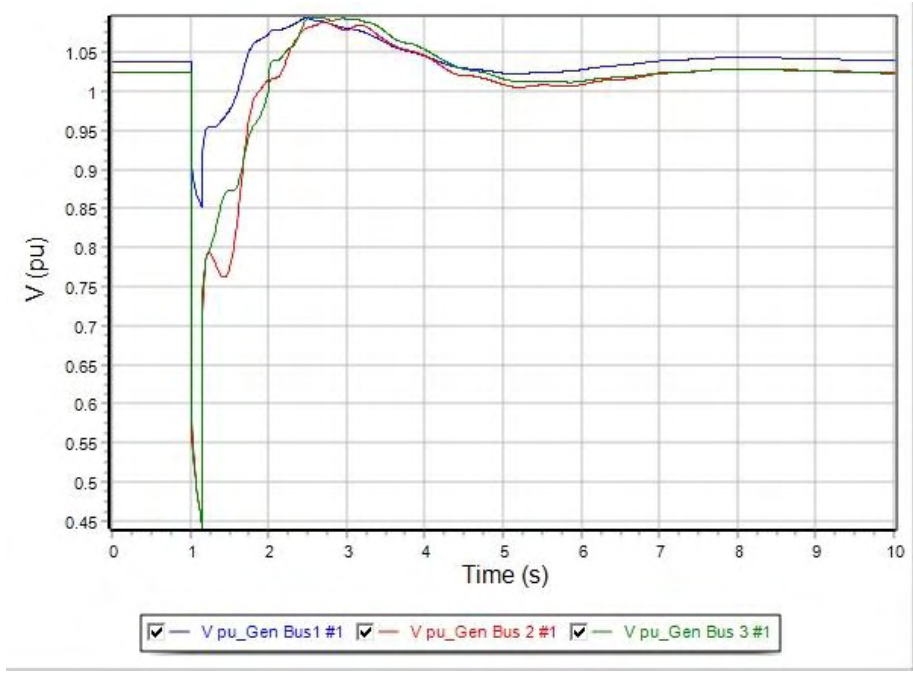
| | |
|-------------|-------|
| Διαδικασία | Bus 8 |
| Apply Fault | 1.000 |
| Clear Fault | 1.150 |
| Open Line | 1.150 |
| Close Line | 2.000 |



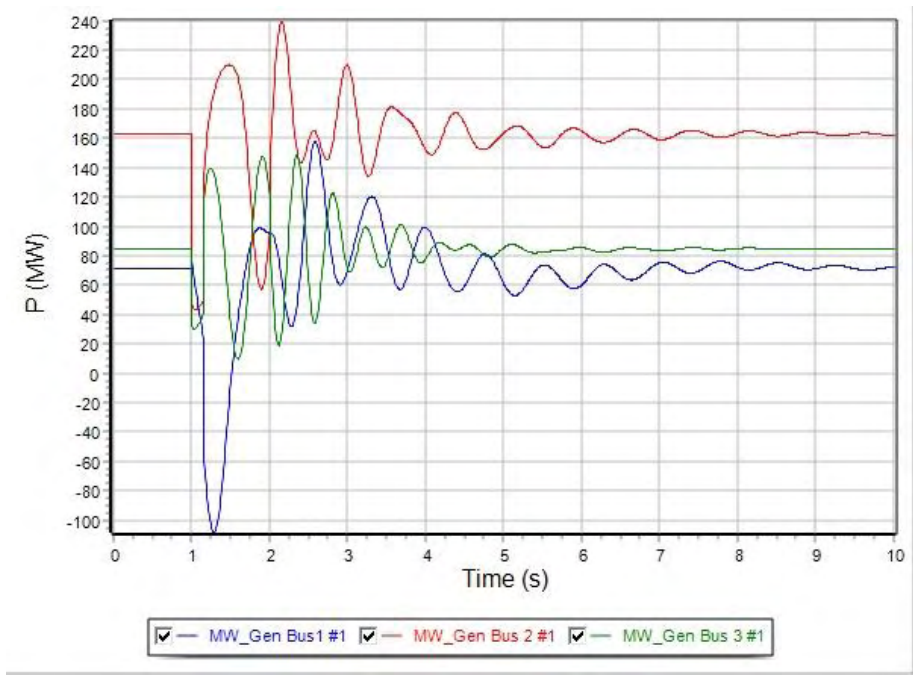
Εικόνα 51: Καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.15 sec, που είναι και ο CCT και διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος.



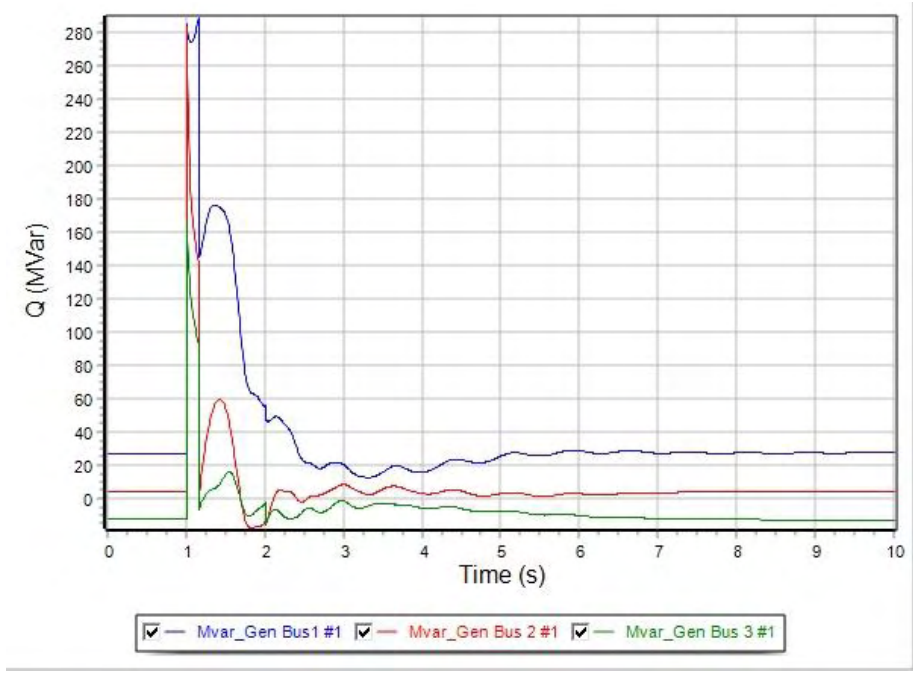
Εικόνα 52: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στα 1.15 sec.



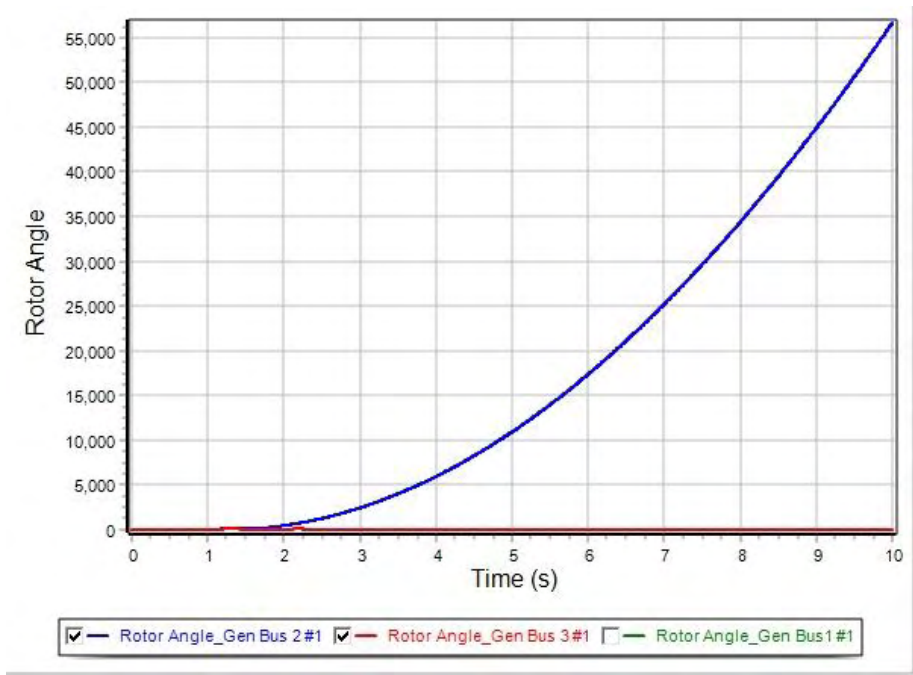
Εικόνα 53: Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στα 1.15 sec.



Εικόνα 54: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών (MW) σε συνάρτηση με τον χρόνο, όπου η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται σε χρόνο 1.15 sec.



Εικόνα 55: Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών (MVar) σε συνάρτηση με τον χρόνο, όπου η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται σε χρόνο 1.25 sec.



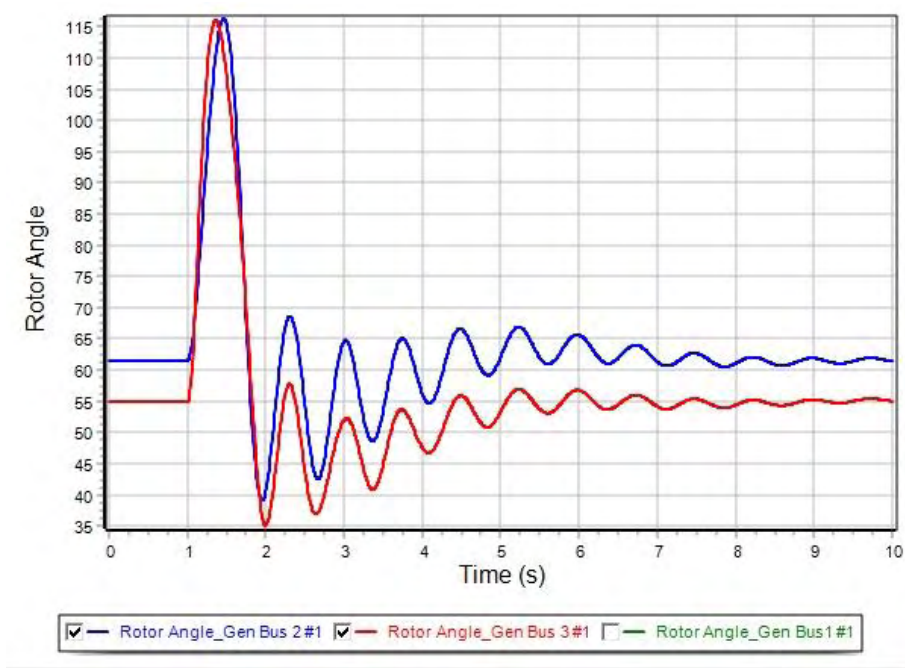
Εικόνα 56: Καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.20 sec και η ευστάθεια του συστήματος χάνεται.

Περίπτωση A5: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 9

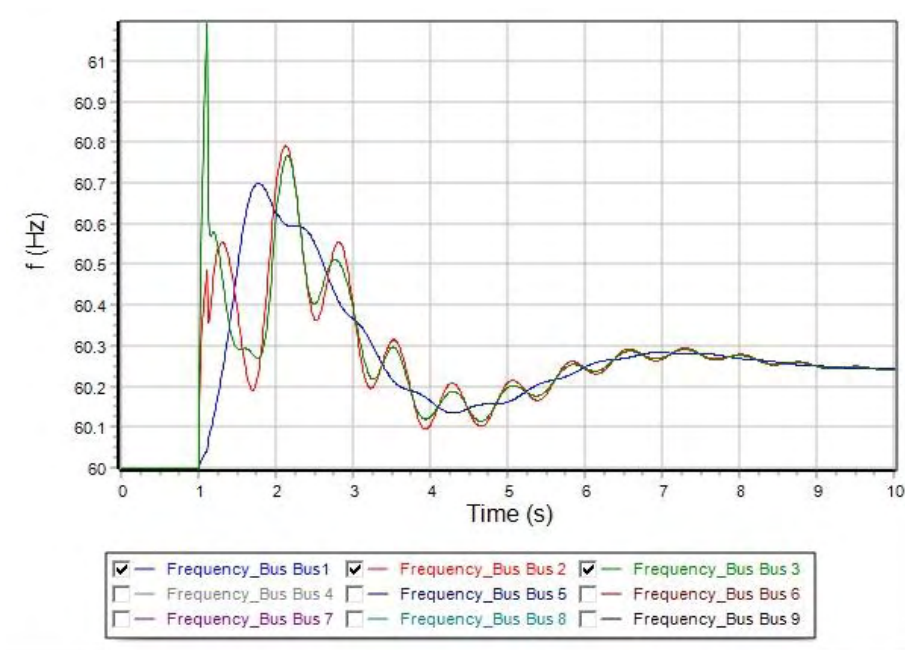
Στον Πίνακα 7 φαίνεται ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 9. Στην Εικόνα 57 απεικονίζονται οι καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.10 δευτερόλεπτα, που προσδιορίστηκε και ως κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος, με αποτέλεσμα να διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος. Στην Εικόνα 58 απεικονίζονται οι καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, ενώ στην Εικόνα 59 οι καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών του συστήματος για τον ίδιο χρόνο εκκαθάρισης. Η Εικόνα 60 και η Εικόνα 61 απεικονίζουν τις καμπύλες της πραγματικής και της άεργης ισχύος των γεννητριών του συστήματος. Τέλος, η Εικόνα 62 απεικονίζει ότι για χρόνο εκκαθάρισης 1.15 δευτερόλεπτα η ευστάθεια του συστήματος χάνεται, καθώς οι καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος δεν αποκτούν νέο σημείο ισορροπίας μετά την εκκαθάριση του σφάλματος.

Πίνακας 7: Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 9.

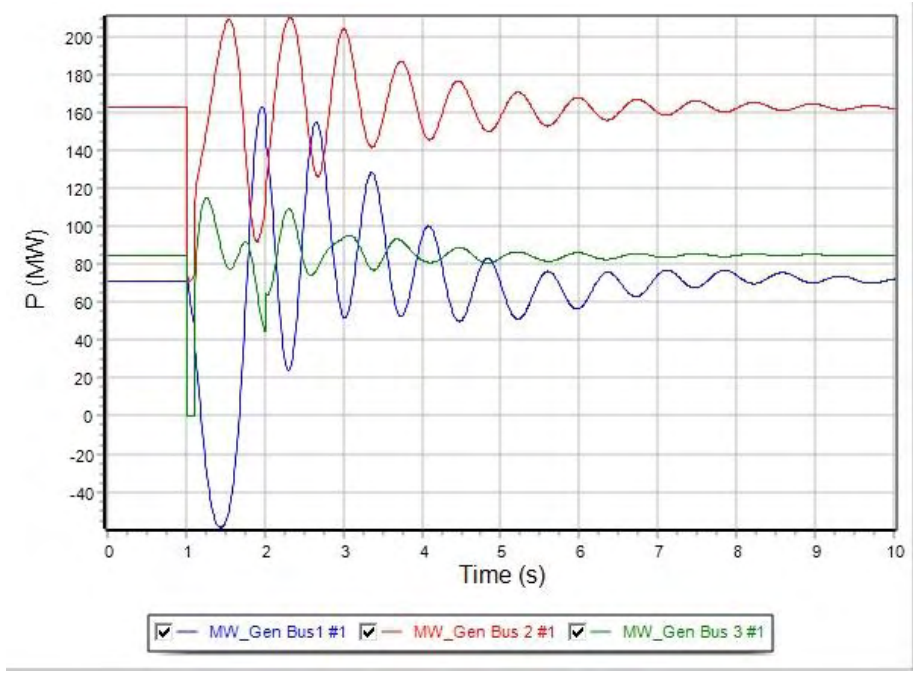
| | |
|-------------|-------|
| Διαδικασία | Bus 9 |
| Apply Fault | 1.000 |
| Clear Fault | 1.100 |
| Open Line | 1.100 |
| Close Line | 2.000 |



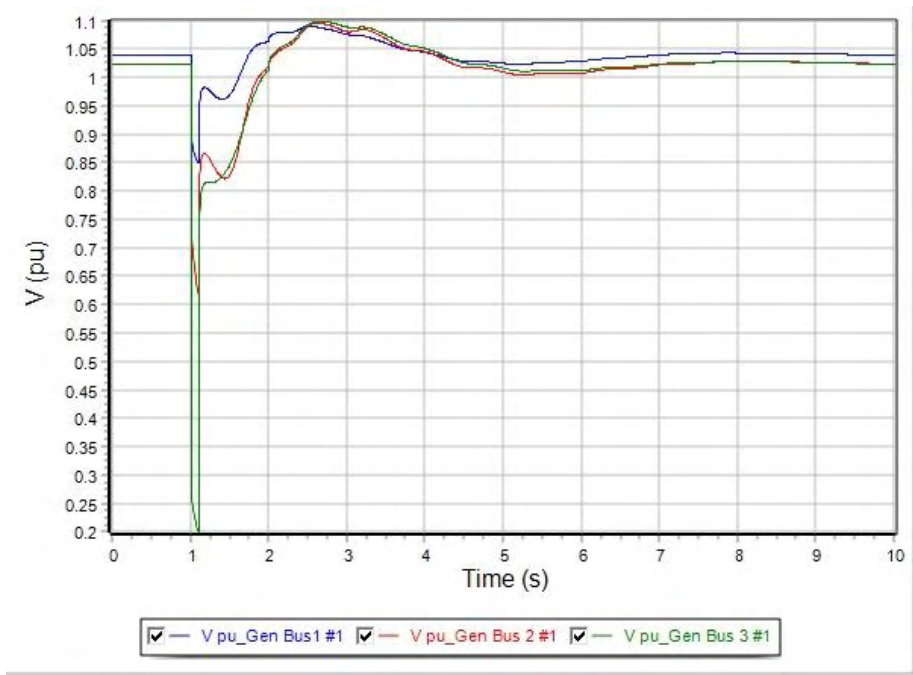
Εικόνα 57: Καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.10 sec, που είναι και ο CCT και διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος.



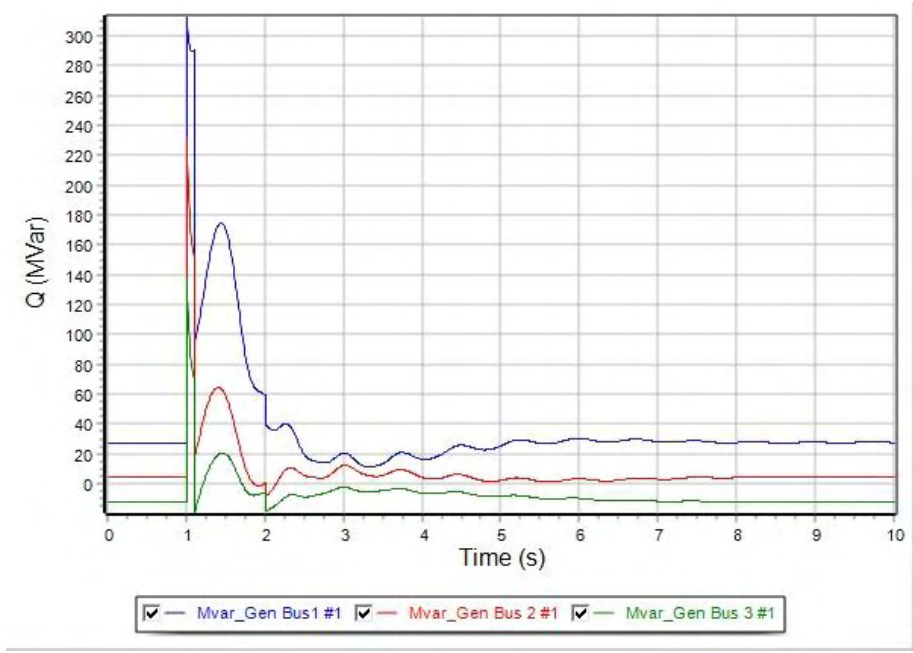
Εικόνα 58: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στα 1.10 sec.



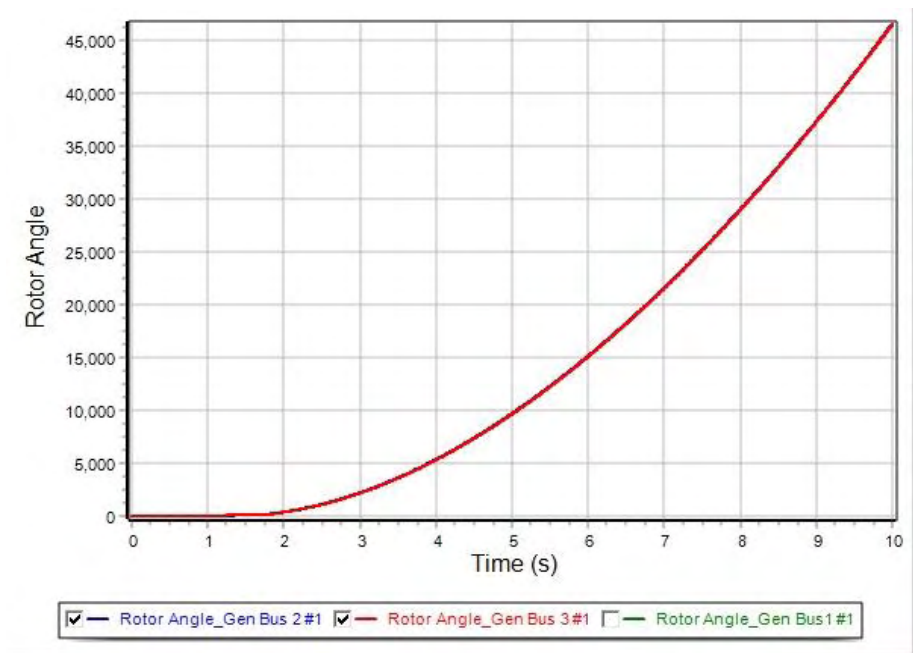
Εικόνα 59: Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στα 1.10 sec.



Εικόνα 60: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών (MW) σε συνάρτηση με τον χρόνο, όπου η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται σε χρόνο 1.10 sec.



Εικόνα 61: Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών (MVar) σε συνάρτηση με τον χρόνο, όπου η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται σε χρόνο 1.10 sec.



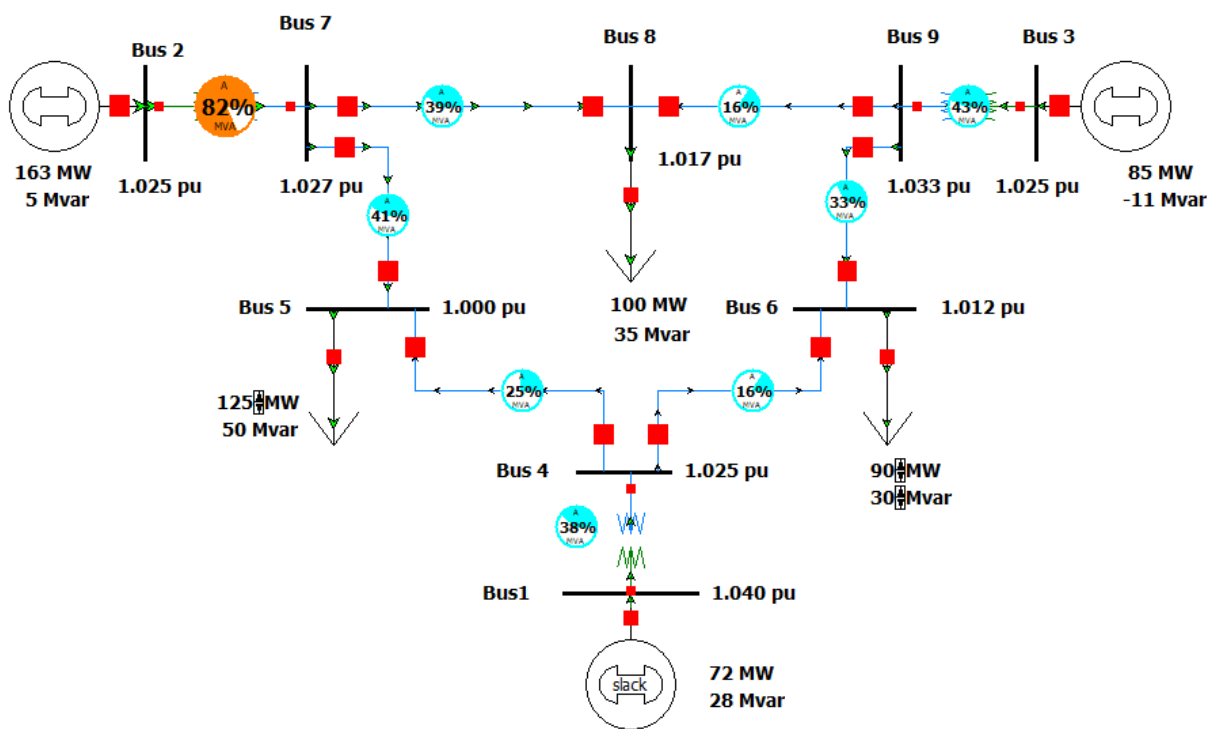
Εικόνα 62: Καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.15 sec και η ευστάθεια του συστήματος χάνεται.

Στον Πίνακα 8 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα παραπάνω αποτελέσματα:

Πίνακας 8: CCTs για το συμβατικό δίκτυο κατά την εμφάνιση στερεού τριφασικού βραχυκυκλώματος.

| Διαδικασία | Bus 5 | Bus 6 | Bus 7 | Bus 8 | Bus 9 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Apply Fault | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| Clear Fault | 1.250 | 1.300 | 1.050 | 1.150 | 1.100 |
| Open Line | 1.250 | 1.300 | 1.050 | 1.150 | 1.100 |
| Close Line | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 |

Η Εικόνα 63 απεικονίζει το συμβατικό δίκτυο της περίπτωσης A, το οποίο χρησιμοποιήσαμε για τον προσδιορισμό των κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης:



Εικόνα 63: Το συμβατικό δίκτυο της περίπτωσης A.

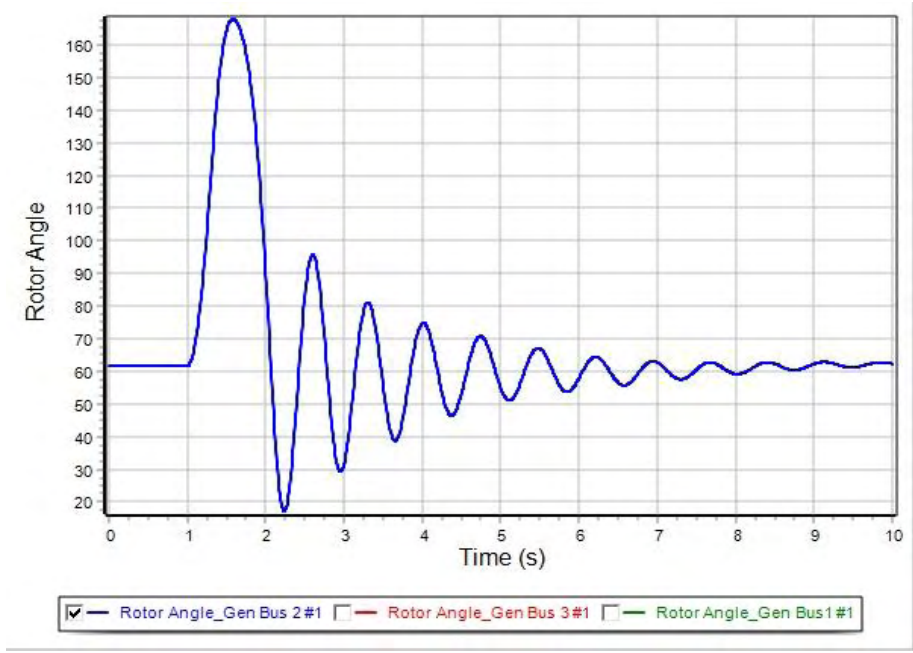
Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η μελέτη για την περίπτωση B του υβριδικού δικτύου. Υπενθυμίζεται ότι στο ζυγό 3 του συστήματος η συμβατική γεννήτρια αντικαθίσταται από μια ανεμογεννήτρια τύπου 3. Για την μελέτη της ευστάθειας και τον προσδιορισμό του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης ακολουθείται η προηγούμενη διαδικασία.

Περίπτωση B1: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 5

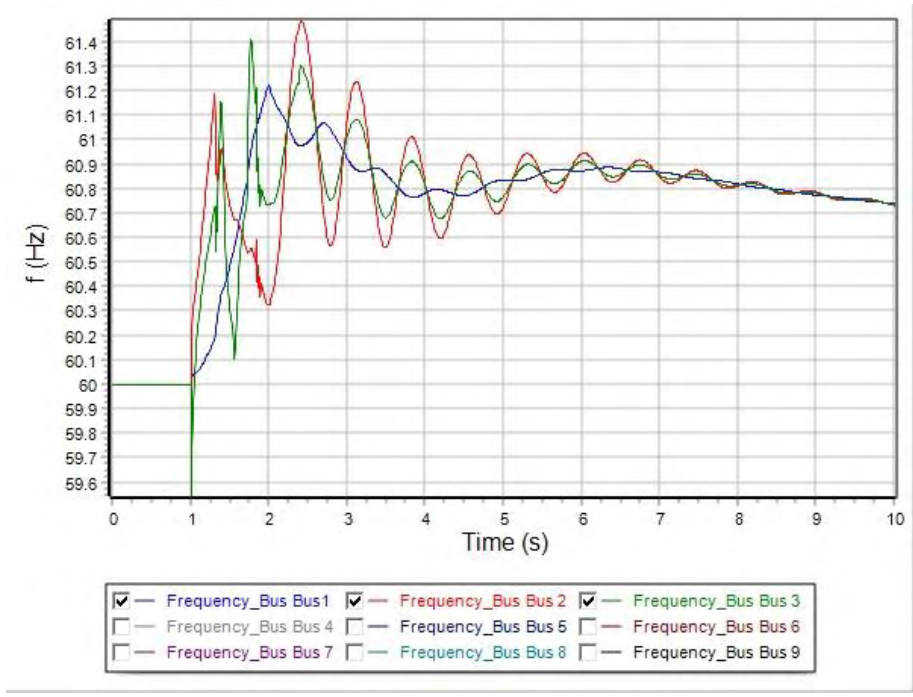
Στον Πίνακα 9 φαίνεται ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 5. Στην Εικόνα 64 απεικονίζεται η καμπύλη της γωνίας δ της συμβατικής γεννήτριας του ζυγού 2 του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.30 δευτερόλεπτα, που προσδιορίστηκε και ως κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος, με αποτέλεσμα να διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος. Στην Εικόνα 65 απεικονίζονται οι καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, ενώ στην Εικόνα 66 οι καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών του συστήματος για τον ίδιο χρόνο εκκαθάρισης. Η Εικόνα 67 και η Εικόνα 68 απεικονίζουν τις καμπύλες της πραγματικής και της άεργης ισχύος των γεννητριών του συστήματος αντίστοιχα. Τέλος, η Εικόνα 69 απεικονίζει ότι για χρόνο εκκαθάρισης 1.35 δευτερόλεπτα η ευστάθεια του συστήματος χάνεται, καθώς οι καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος δεν αποκτούν νέο σημείο ισορροπίας μετά την εκκαθάριση του σφάλματος.

Πίνακας 9: Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 5.

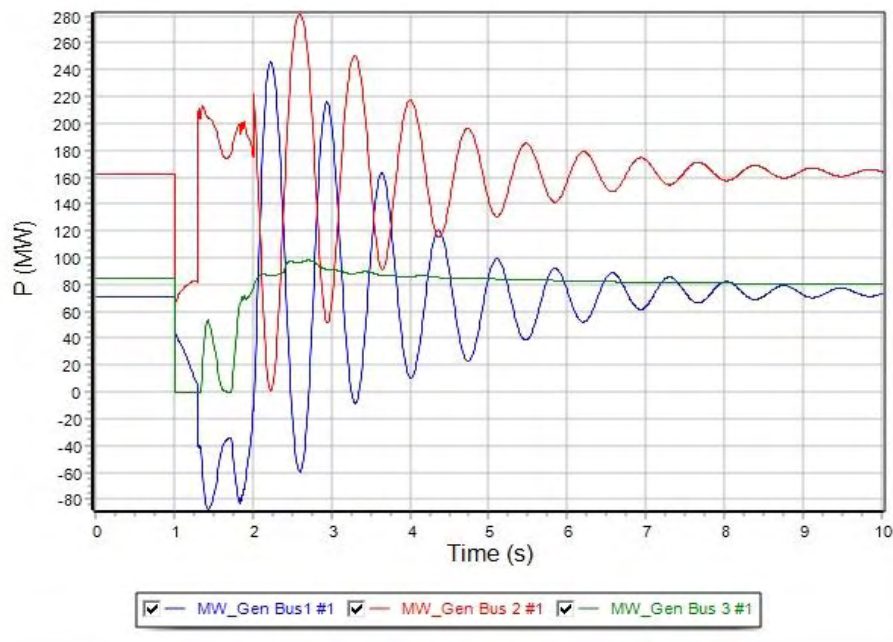
| | |
|-------------|-------|
| Διαδικασία | Bus 5 |
| Apply Fault | 1.000 |
| Clear Fault | 1.300 |
| Open Line | 1.300 |
| Close Line | 2.000 |



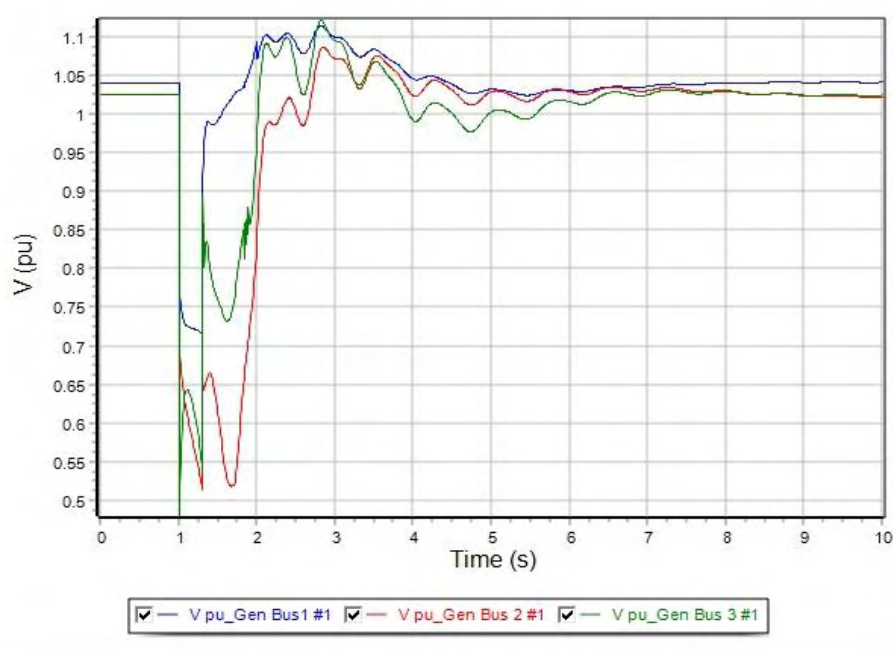
Εικόνα 64: Καμπύλη της γωνίας δ της συμβατικής γεννήτριας του ζυγού 2 του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.30 sec, που είναι και ο CCT και διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος.



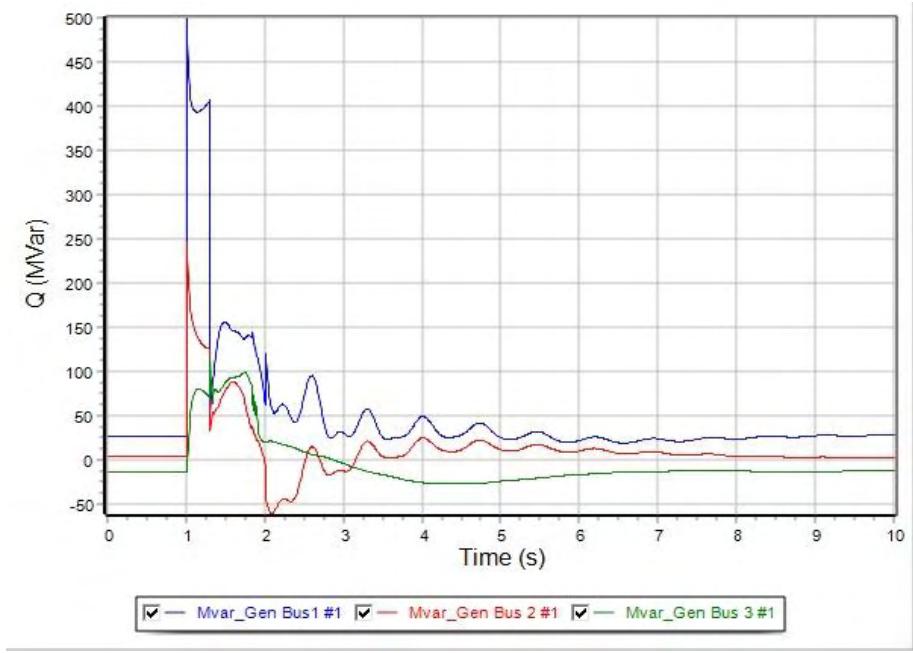
Εικόνα 65: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στα 1.30 sec.



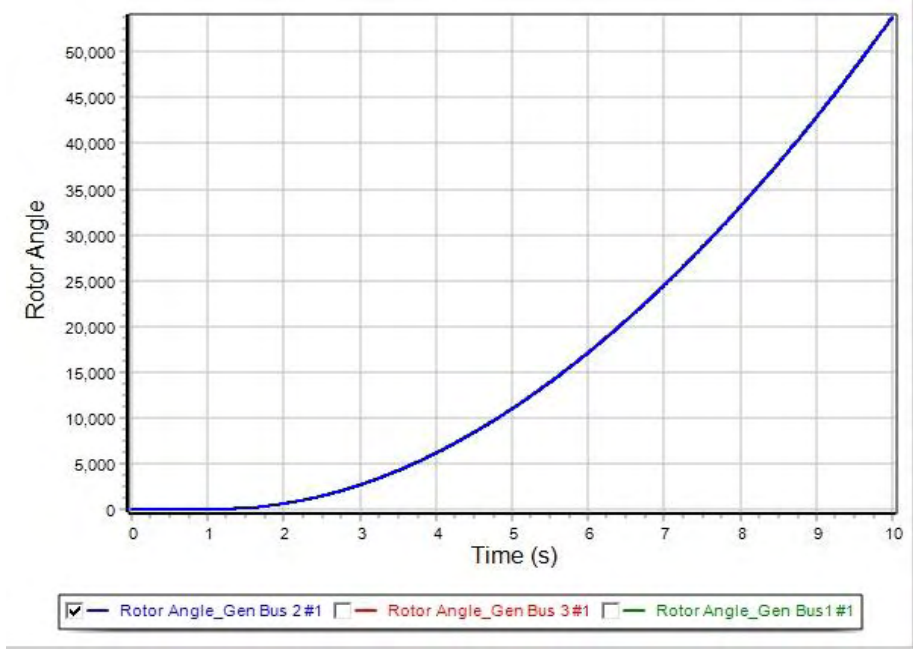
Εικόνα 66: Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στα 1.30 sec.



Εικόνα 67: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών (MW) σε συνάρτηση με τον χρόνο, όπου η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται σε χρόνο 1.30 sec.



Εικόνα 68: Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών (MVar) σε συνάρτηση με τον χρόνο, όπου η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται σε χρόνο 1.30 sec.



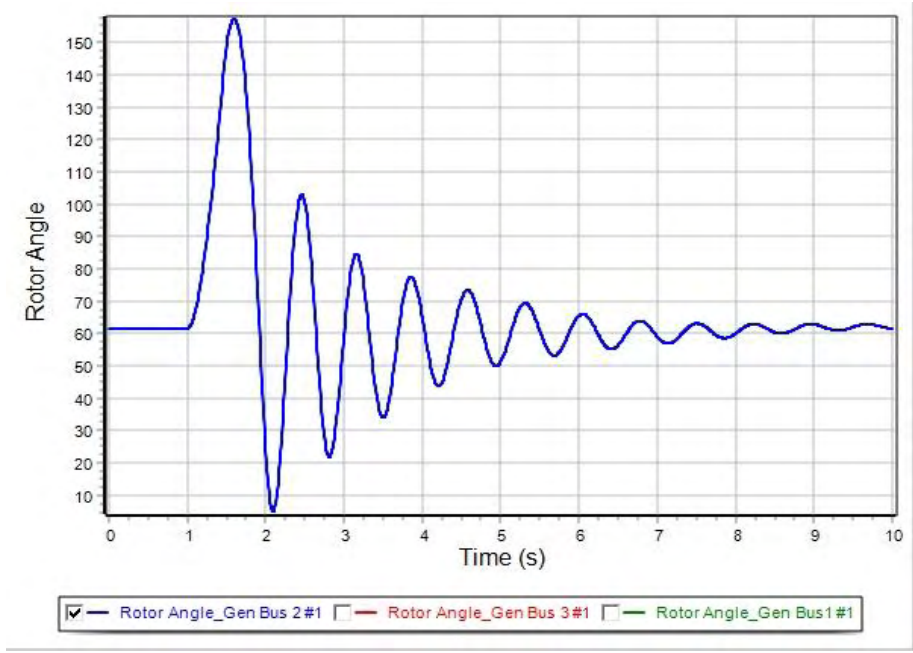
Εικόνα 69: Καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.35 sec και η ευστάθεια του συστήματος χάνεται.

Περίπτωση B2: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 6

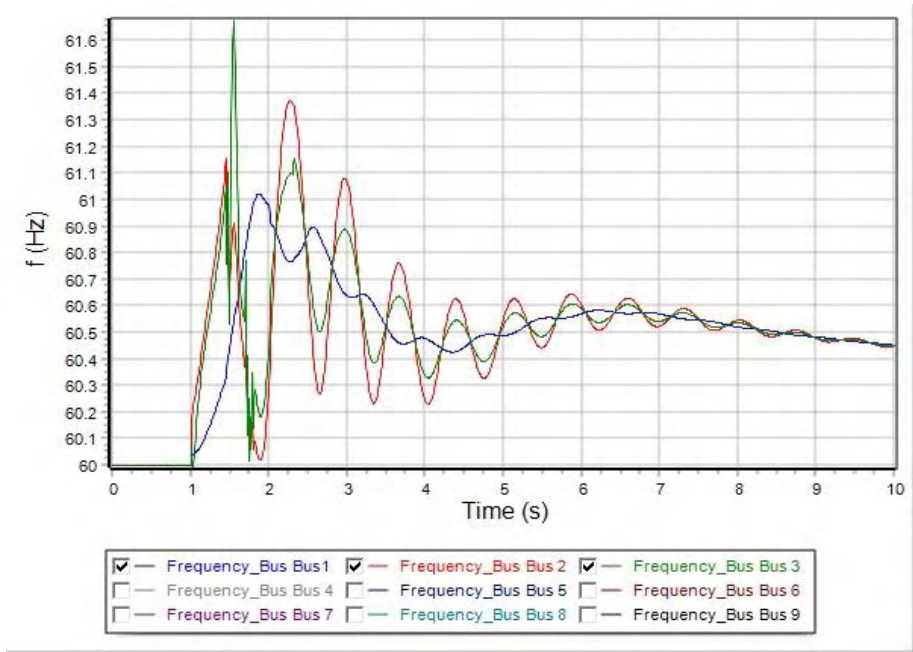
Στον Πίνακα 10 φαίνεται ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 6. Στην Εικόνα 70 απεικονίζεται η καμπύλη της γωνίας δ της συμβατικής γεννήτριας του ζυγού 2 του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.45 δευτερόλεπτα, που προσδιορίστηκε και ως κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος, με αποτέλεσμα να διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος. Στην Εικόνα 71 απεικονίζονται οι καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, ενώ στην Εικόνα 72 οι καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών του συστήματος για τον ίδιο χρόνο εκκαθάρισης. Η Εικόνα 73 και η Εικόνα 74 απεικονίζουν τις καμπύλες της πραγματικής και της άεργης ισχύος των γεννητριών του συστήματος αντίστοιχα. Τέλος, η Εικόνα 75 απεικονίζει ότι για χρόνο εκκαθάρισης 1.50 δευτερόλεπτα η ευστάθεια του συστήματος χάνεται, καθώς οι καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος δεν αποκτούν νέο σημείο ισορροπίας μετά την εκκαθάριση του σφάλματος.

Πίνακας 10: Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 6.

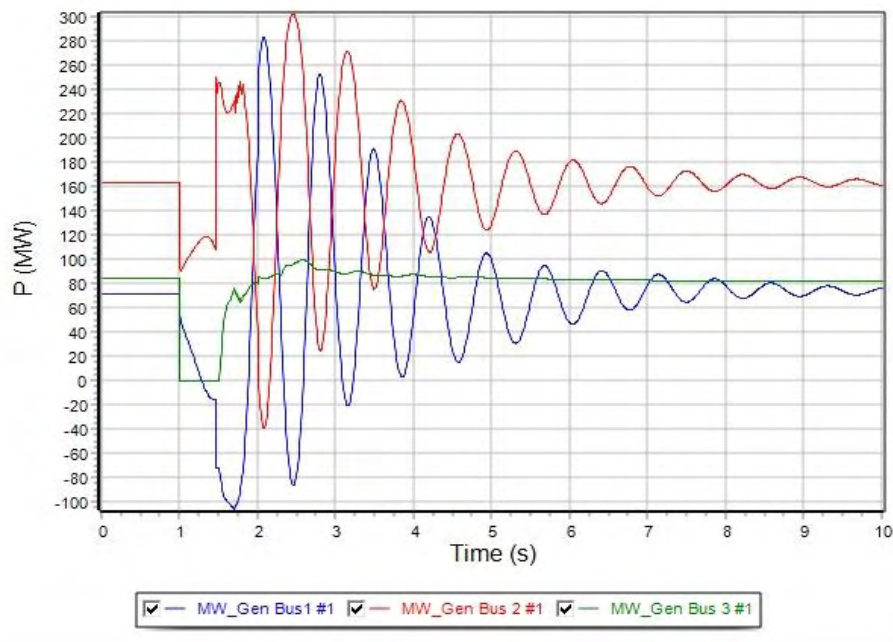
| Διαδικασία | Bus 6 |
|-------------|-------|
| Apply Fault | 1.000 |
| Clear Fault | 1.450 |
| Open Line | 1.450 |
| Close Line | 2.000 |



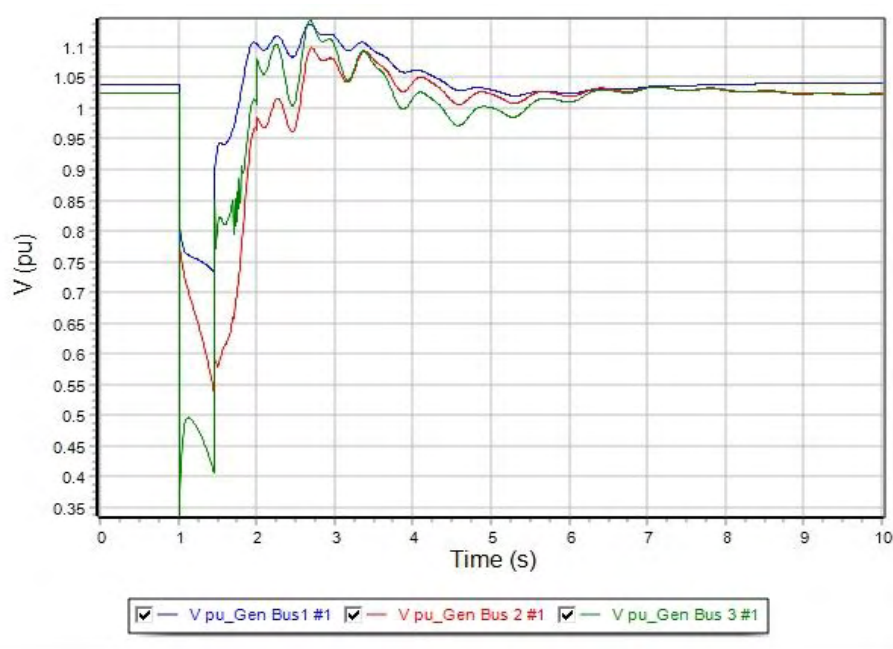
Εικόνα 70: Καμπύλη της γωνίας δ της συμβατικής γεννήτριας του ζυγού 2 του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.45 sec, που είναι και ο CCT και διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος.



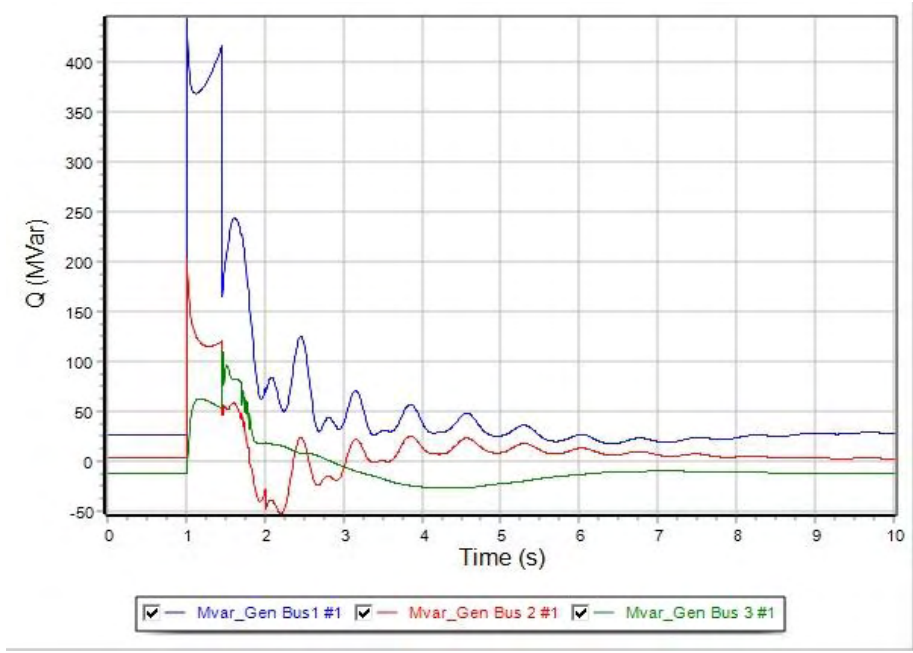
Εικόνα 71: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στα 1.45 sec



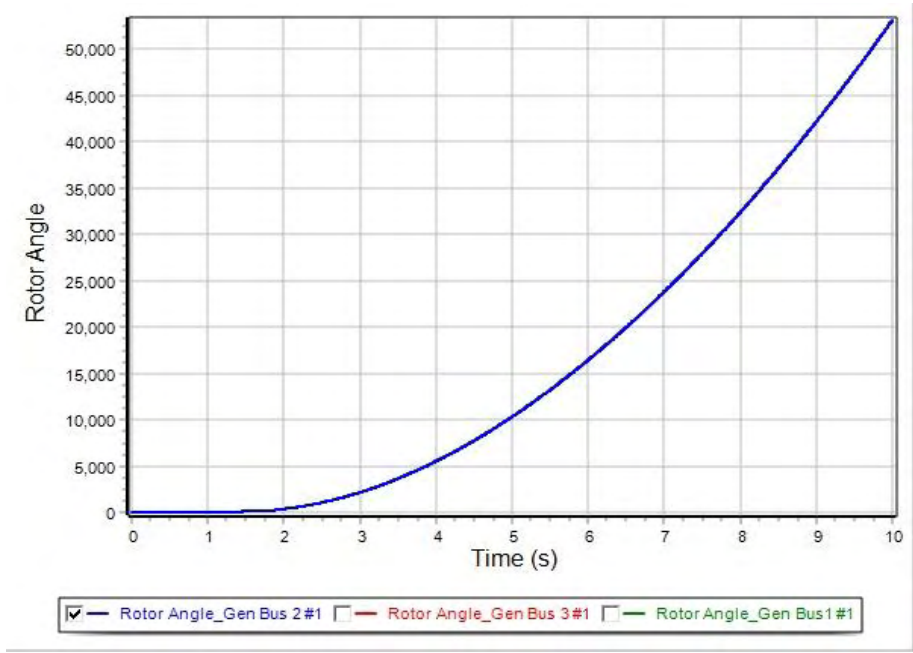
Εικόνα 72: Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στα 1.45 sec.



Εικόνα 73: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών (MW) σε συνάρτηση με τον χρόνο, όπου η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται σε χρόνο 1.45 sec.



Εικόνα 74: Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών (MVar) σε συνάρτηση με τον χρόνο, όπου η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται σε χρόνο 1.45 sec.



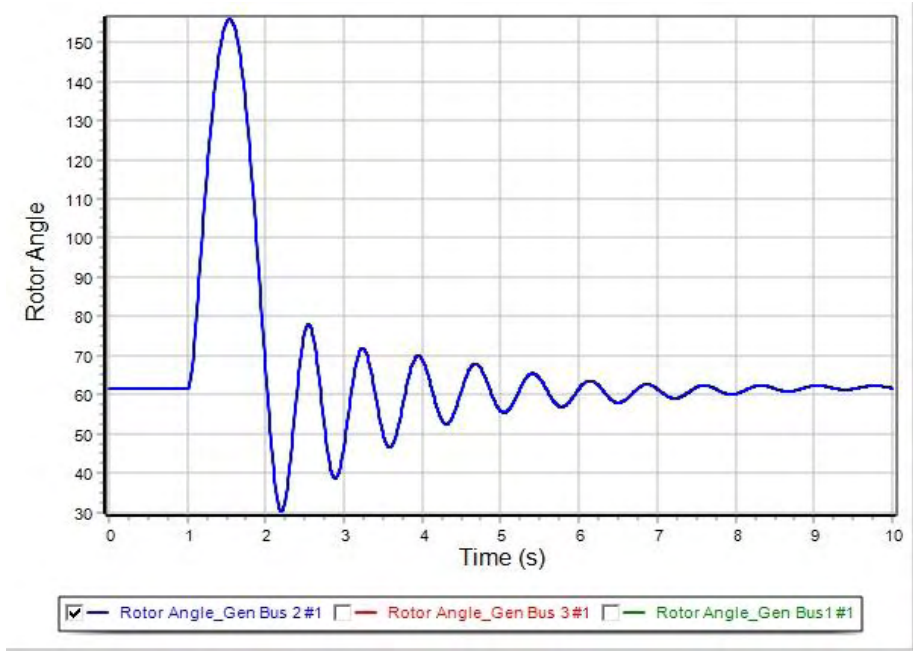
Εικόνα 75: Καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.50 sec και η ευστάθεια του συστήματος χάνεται.

Περίπτωση B3: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 7

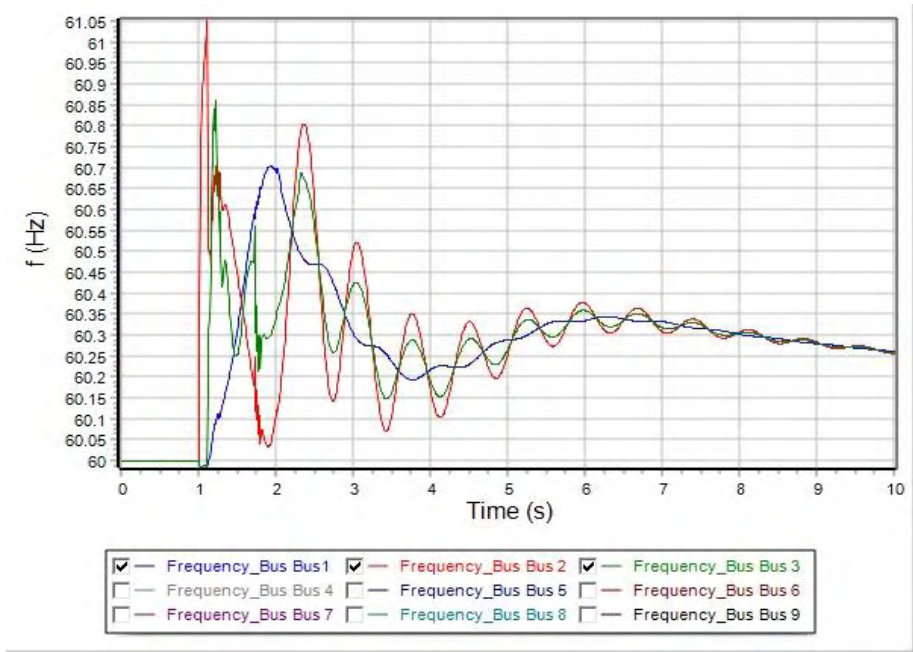
Στον Πίνακα 11 φαίνεται ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 7. Στην Εικόνα 76 απεικονίζεται η καμπύλη της γωνίας δ της συμβατικής γεννήτριας του ζυγού 2 του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.10 δευτερόλεπτα, που προσδιορίστηκε και ως κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος, με αποτέλεσμα να διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος. Στην Εικόνα 77 απεικονίζονται οι καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, ενώ στην Εικόνα 78 οι καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών του συστήματος για τον ίδιο χρόνο εκκαθάρισης. Η Εικόνα 79 και η Εικόνα 80 απεικονίζουν τις καμπύλες της πραγματικής και της άεργης ισχύος των γεννητριών του συστήματος αντίστοιχα. Τέλος, η Εικόνα 81 απεικονίζει ότι για χρόνο εκκαθάρισης 1.15 δευτερόλεπτα η ευστάθεια του συστήματος χάνεται, καθώς οι καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος δεν αποκτούν νέο σημείο ισορροπίας μετά την εκκαθάριση του σφάλματος.

Πίνακας 11: Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 6.

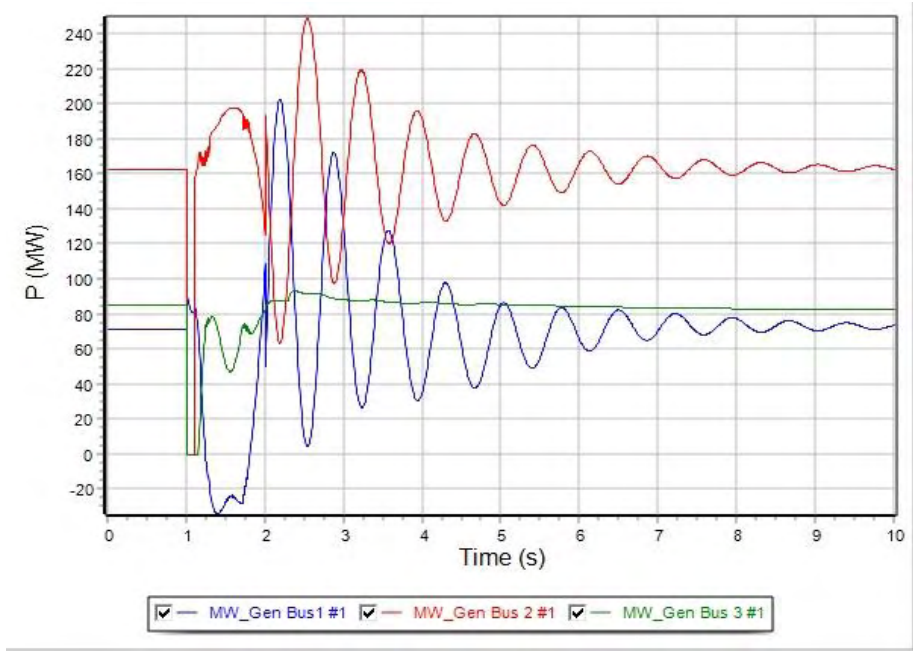
| Διαδικασία | Bus 7 |
|-------------|-------|
| Apply Fault | 1.000 |
| Clear Fault | 1.100 |
| Open Line | 1.100 |
| Close Line | 2.000 |



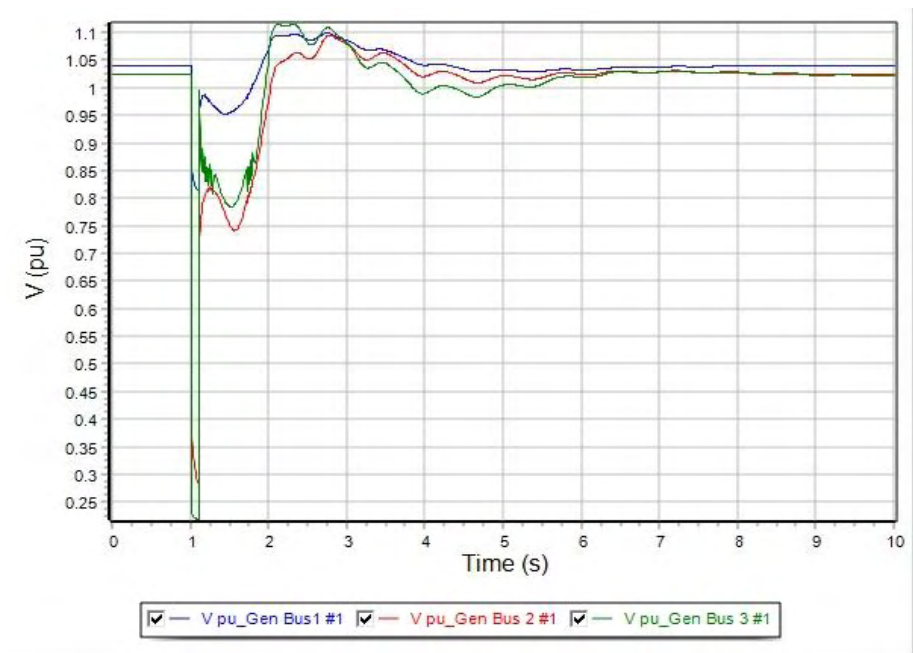
Εικόνα 76: Καμπύλη της γωνίας δ της συμβατικής γεννήτριας του ζυγού 2 του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.10 sec, που είναι και ο CCT και διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος.



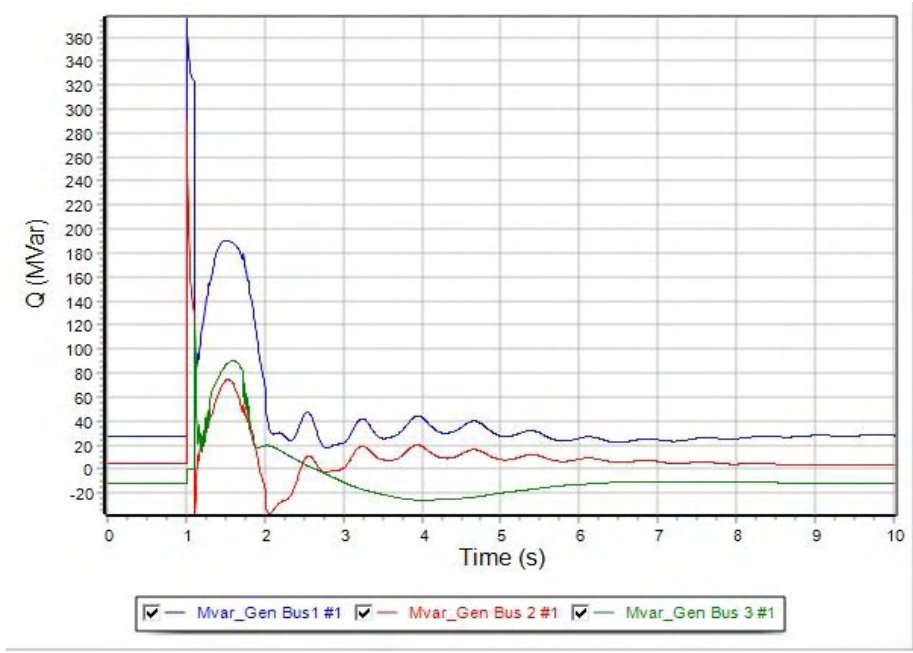
Εικόνα 77: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στα 1.10 sec.



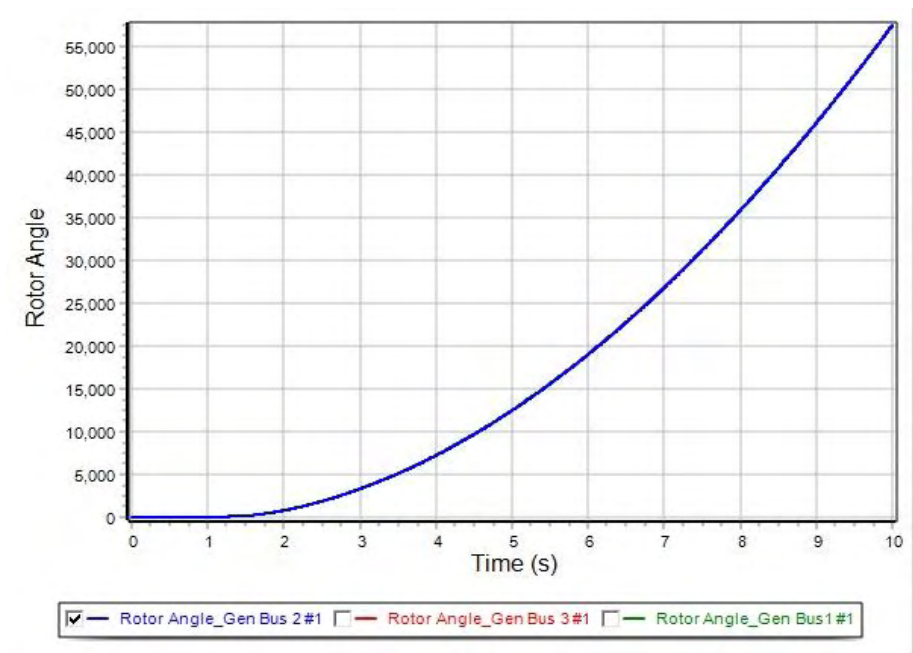
Εικόνα 78: Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στα 1.10 sec.



Εικόνα 79: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών (MW) σε συνάρτηση με τον χρόνο, όπου η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται σε χρόνο 1.10 sec.



Εικόνα 80: Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών (MVar) σε συνάρτηση με τον χρόνο, όπου η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται σε χρόνο 1.10 sec.



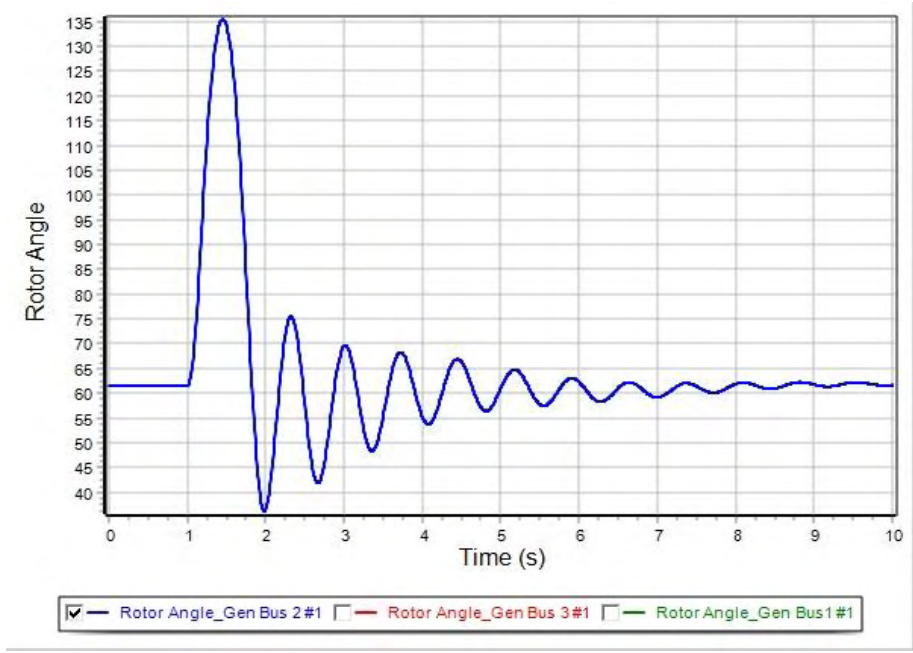
Εικόνα 81: Καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.15 sec και η ευστάθεια του συστήματος χάνεται.

Περίπτωση B4: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 8

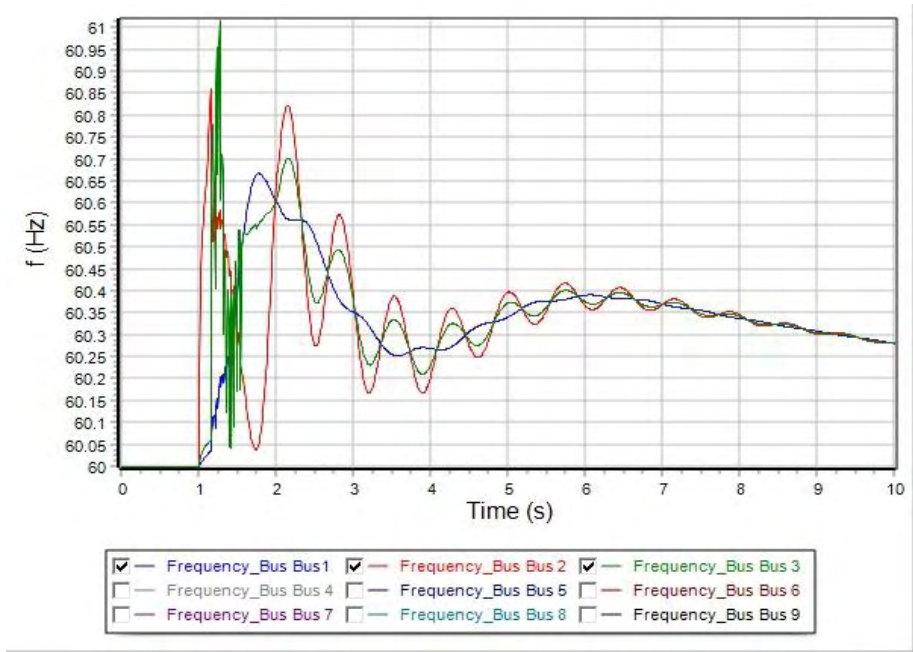
Στον Πίνακα 12 φαίνεται ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 8. Στην Εικόνα 82 απεικονίζεται η καμπύλη της γωνίας δ της συμβατικής γεννήτριας του ζυγού 2 του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.15 δευτερόλεπτα, που προσδιορίστηκε και ως κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος, με αποτέλεσμα να διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος. Στην Εικόνα 83 απεικονίζονται οι καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, ενώ στην Εικόνα 84 οι καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών του συστήματος για τον ίδιο χρόνο εκκαθάρισης. Η Εικόνα 85 και η Εικόνα 86 απεικονίζουν τις καμπύλες της πραγματικής και της άεργης ισχύος των γεννητριών του συστήματος αντίστοιχα. Τέλος, η Εικόνα 87 απεικονίζει ότι για χρόνο εκκαθάρισης 1.20 δευτερόλεπτα η ευστάθεια του συστήματος χάνεται, καθώς οι καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος δεν αποκτούν νέο σημείο ισορροπίας μετά την εκκαθάριση του σφάλματος.

Πίνακας 12: Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 8.

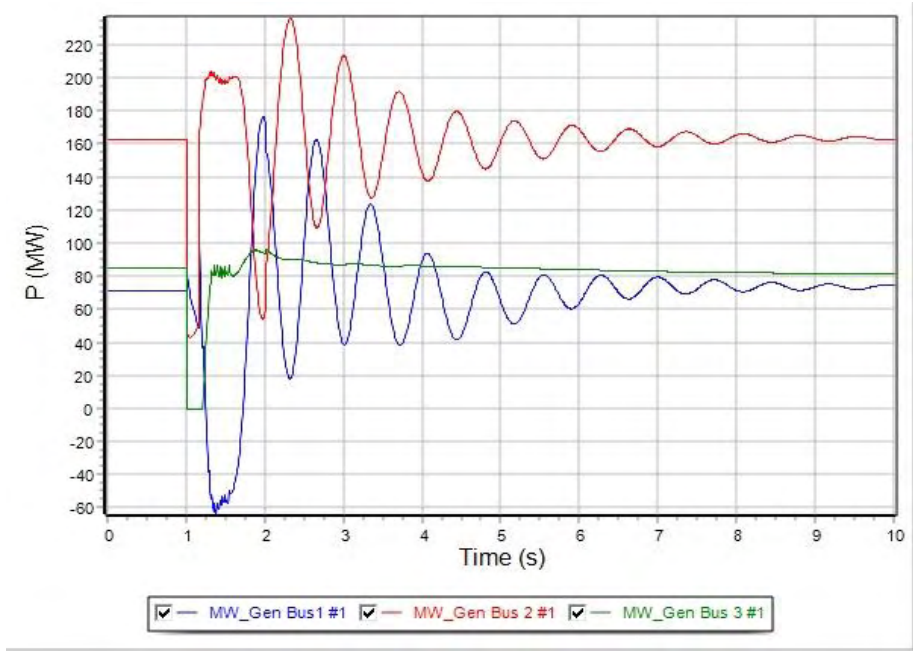
| | |
|-------------|-------|
| Διαδικασία | Bus 8 |
| Apply Fault | 1.000 |
| Clear Fault | 1.150 |
| Open Line | 1.150 |
| Close Line | 2.000 |



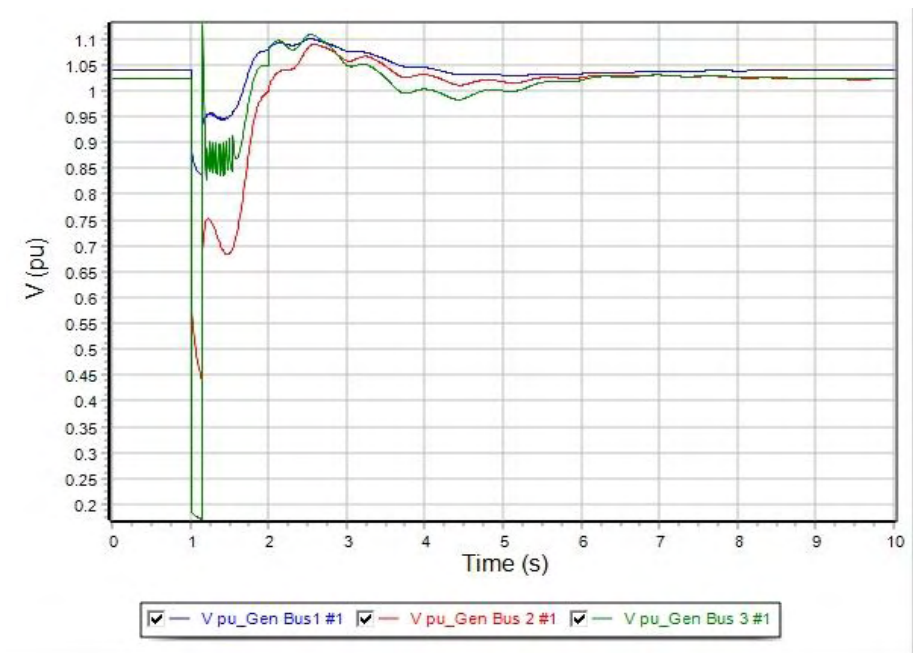
Εικόνα 82: Καμπύλη της γωνίας δ της συμβατικής γεννήτριας του ζυγού 2 του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.15 sec, που είναι και ο CCT και διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος.



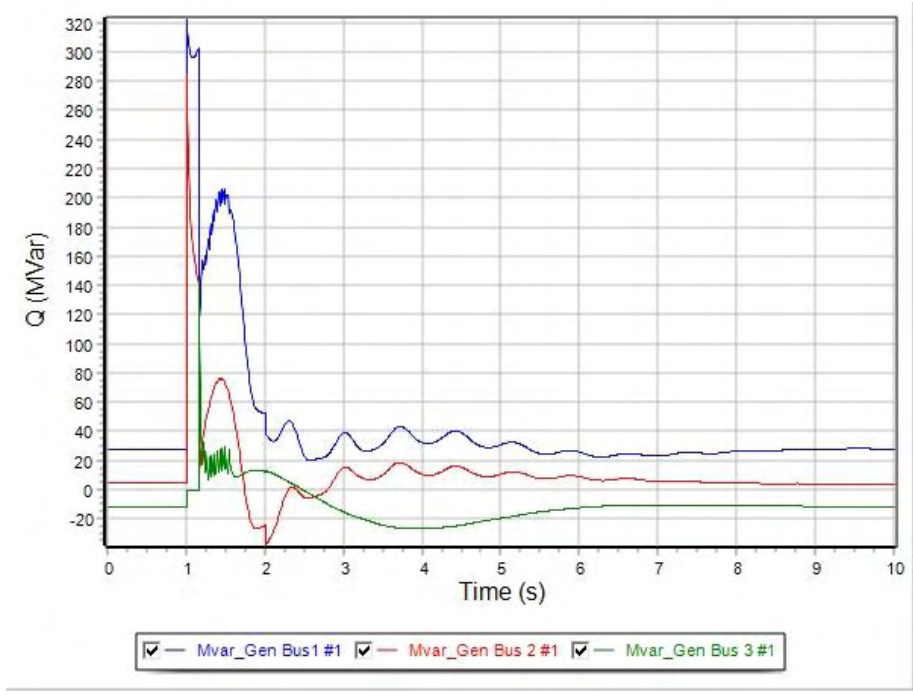
Εικόνα 83: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στα 1.15 sec.



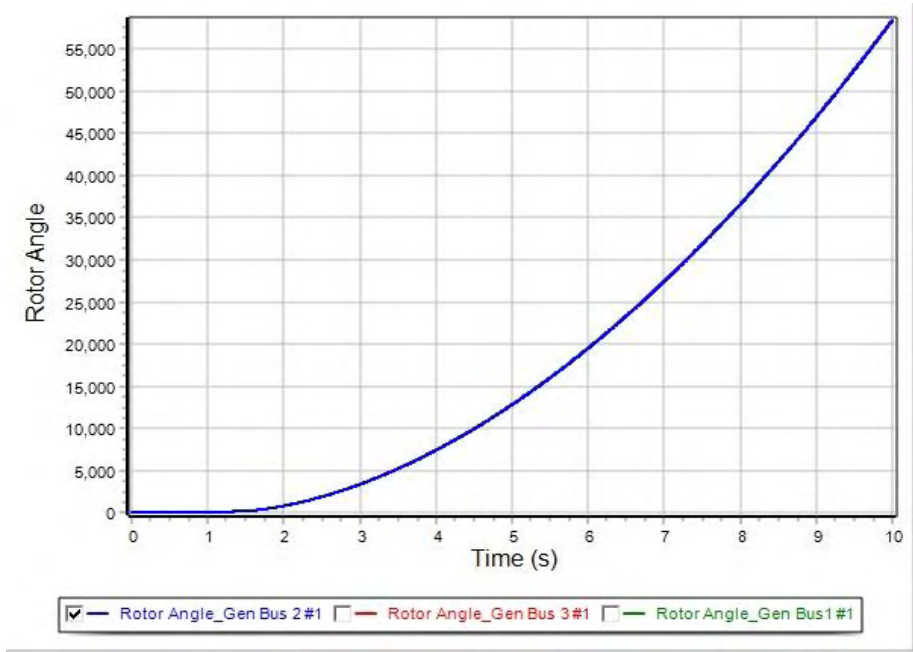
Εικόνα 84: Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στα 1.15 sec.



Εικόνα 85: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών (MW) σε συνάρτηση με τον χρόνο, όπου η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται σε χρόνο 1.15 sec.



Εικόνα 86: Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών (MVar) σε συνάρτηση με τον χρόνο, όπου η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται σε χρόνο 1.15 sec.



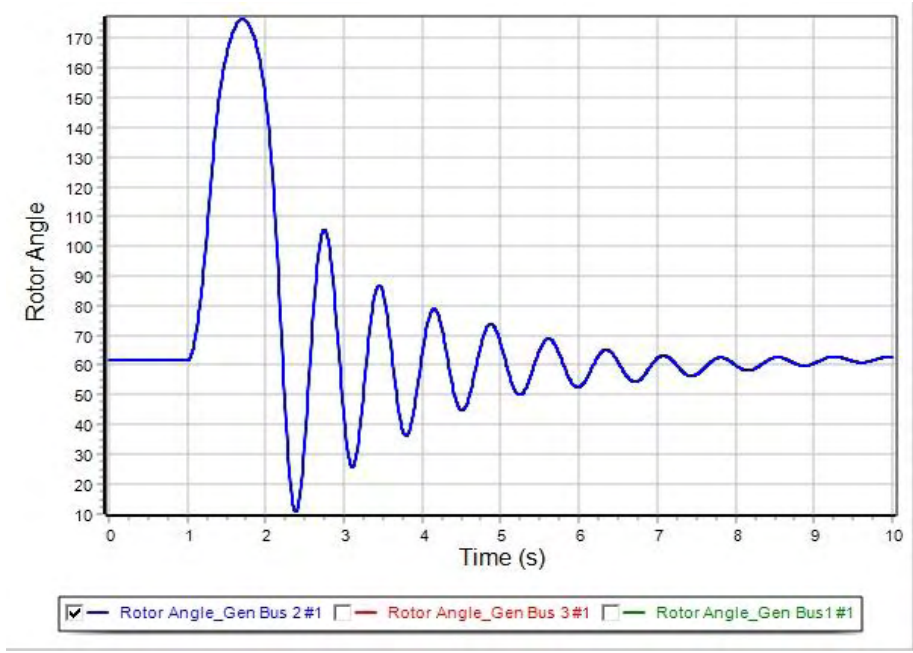
Εικόνα 87: Καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.20 sec και η ευστάθεια του συστήματος χάνεται.

Περίπτωση B5: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 9

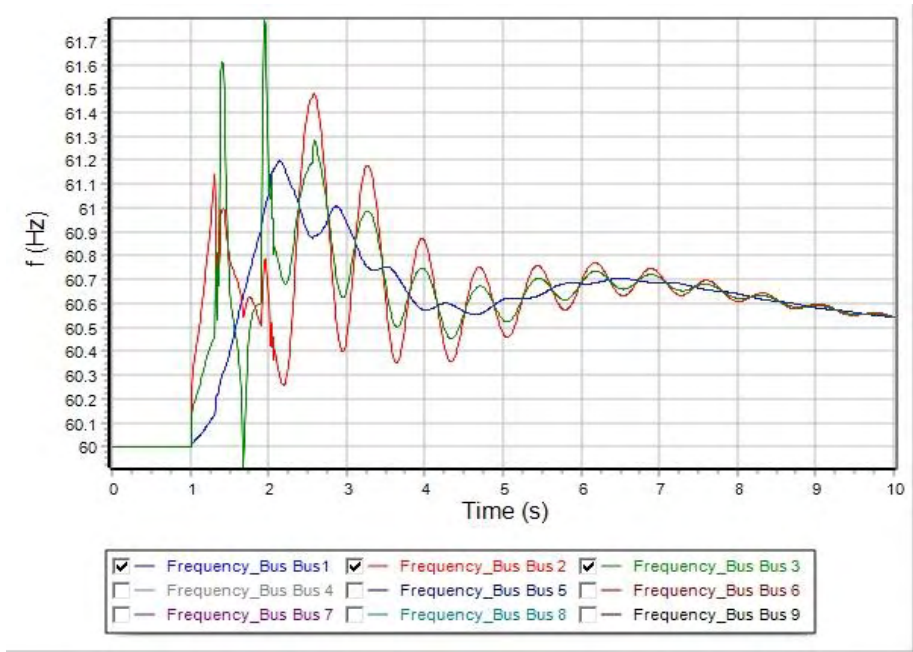
Στον Πίνακα 13 φαίνεται ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 9. Στην Εικόνα 88 απεικονίζεται η καμπύλη της γωνίας δ της συμβατικής γεννήτριας του ζυγού 2 του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.30 δευτερόλεπτα, που προσδιορίστηκε και ως κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος, με αποτέλεσμα να διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος. Στην Εικόνα 89 απεικονίζονται οι καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, ενώ στην Εικόνα 90 οι καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών του συστήματος για τον ίδιο χρόνο εκκαθάρισης. Η Εικόνα 91 και η Εικόνα 92 απεικονίζουν τις καμπύλες της πραγματικής και της άεργης ισχύος των γεννητριών του συστήματος αντίστοιχα. Τέλος, η Εικόνα 93 απεικονίζει ότι για χρόνο εκκαθάρισης 1.35 δευτερόλεπτα η ευστάθεια του συστήματος χάνεται, καθώς οι καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος δεν αποκτούν νέο σημείο ισορροπίας μετά την εκκαθάριση του σφάλματος.

Πίνακας 13: Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 9.

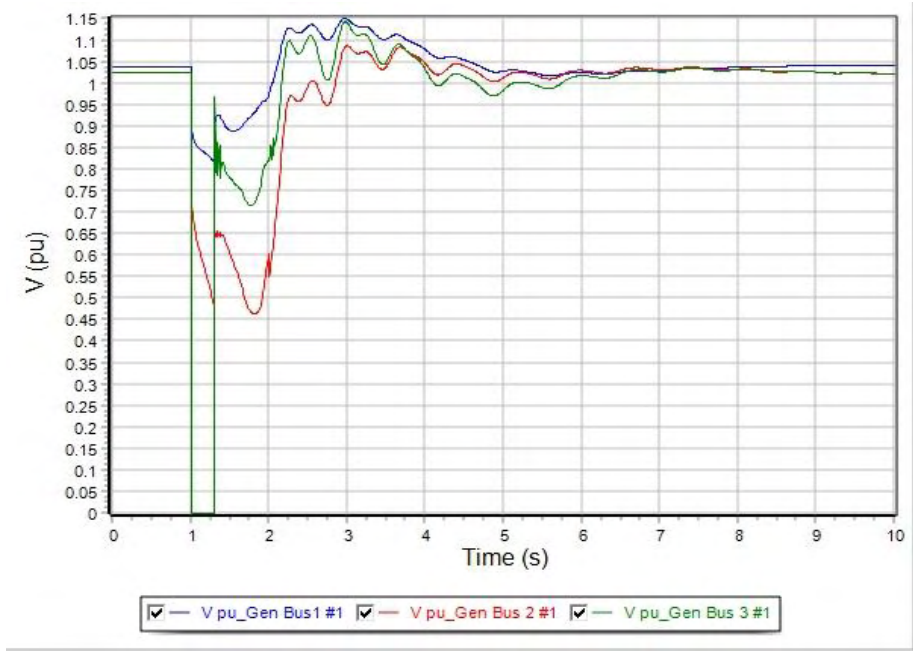
| | |
|-------------|-------|
| Διαδικασία | Bus 9 |
| Apply Fault | 1.000 |
| Clear Fault | 1.300 |
| Open Line | 1.300 |
| Close Line | 2.000 |



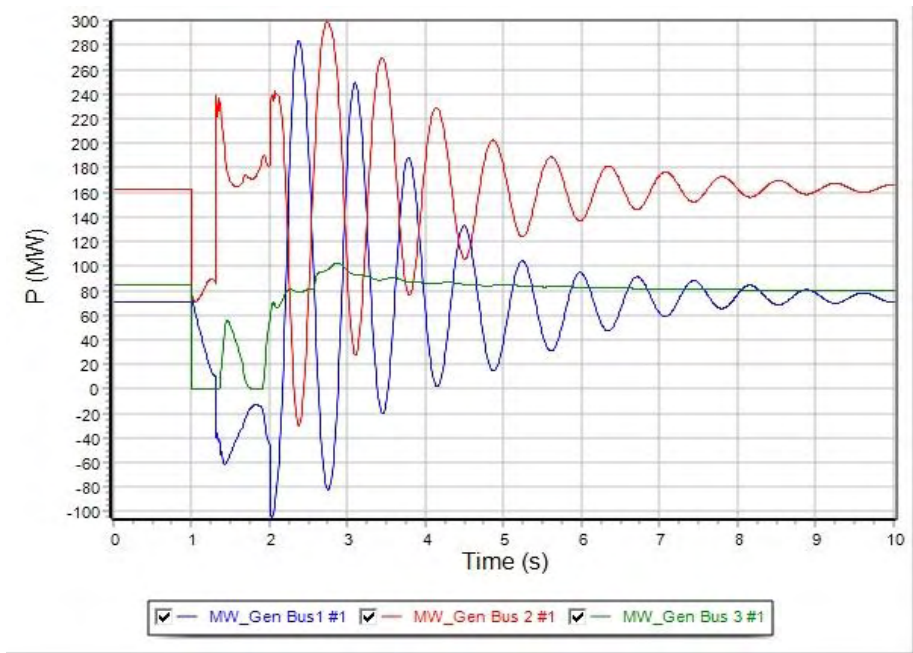
Εικόνα 88: Καμπύλη της γωνίας δ της συμβατικής γεννήτριας του ζυγού 2 του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.30 sec, που είναι και ο CCT και διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος.



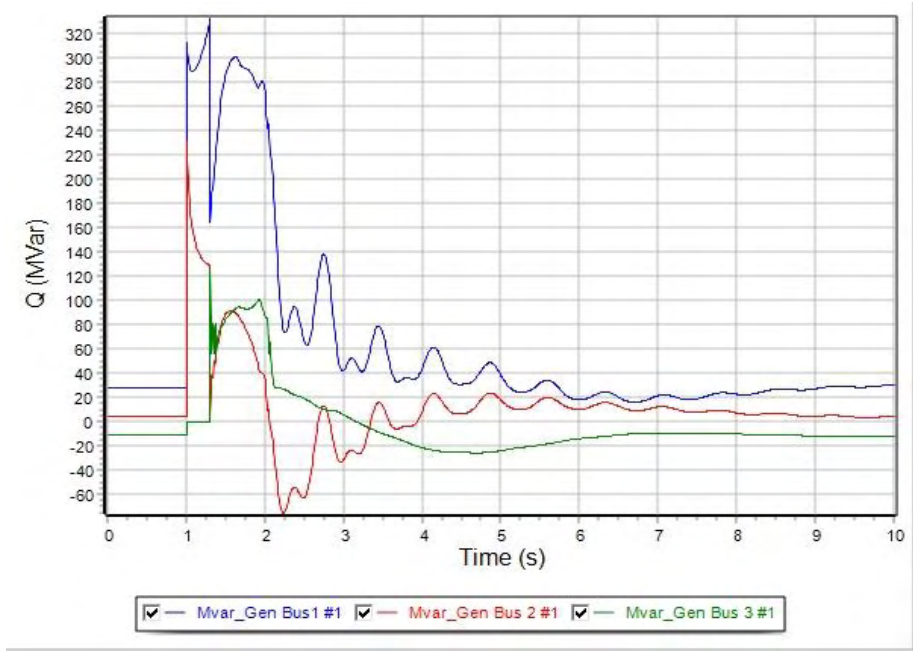
Εικόνα 89: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στα 1.30 sec.



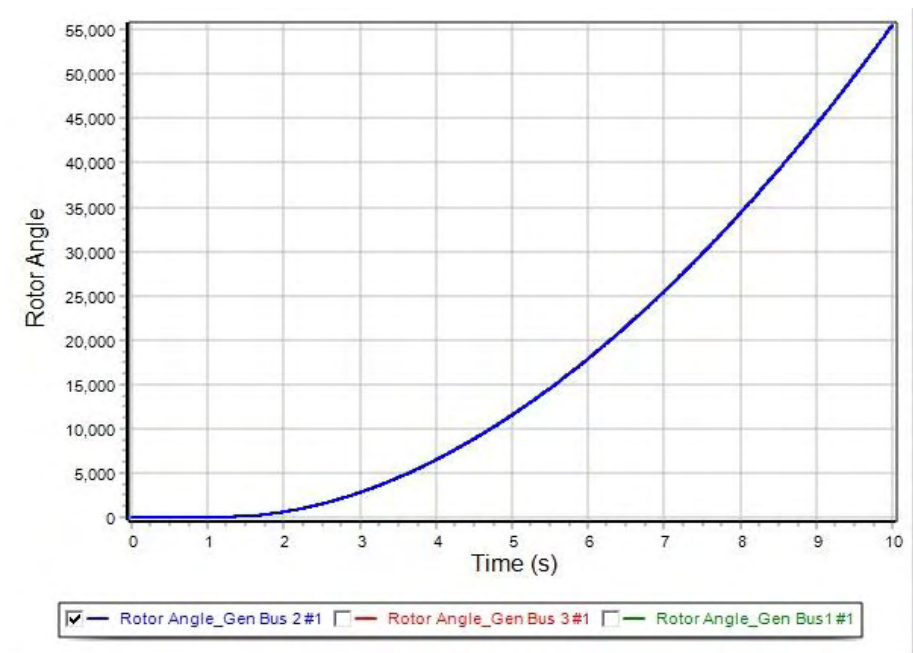
Εικόνα 90: Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στα 1.30 sec.



Εικόνα 91: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών (MW) σε συνάρτηση με τον χρόνο, όπου η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται σε χρόνο 1.30 sec.



Εικόνα 92: Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών (MVar) σε συνάρτηση με τον χρόνο, όπου η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται σε χρόνο 1.30 sec.



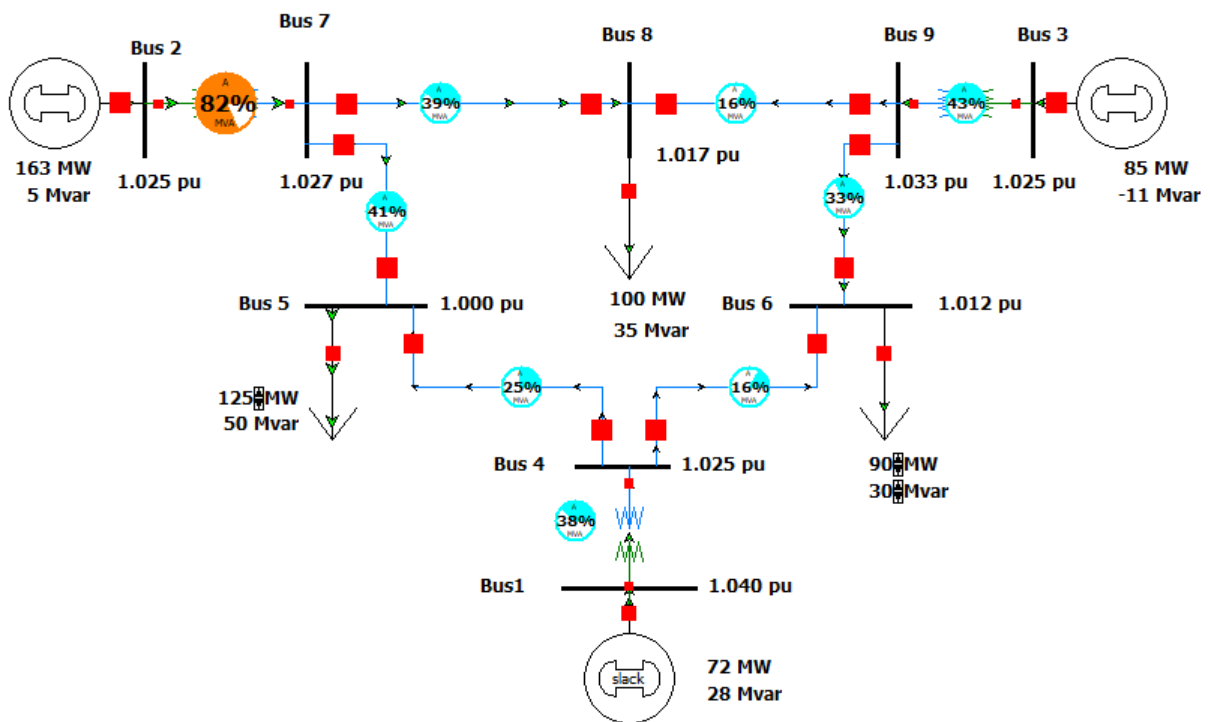
Εικόνα 93: Καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.35 sec και η ευστάθεια του συστήματος χάνεται.

Στον Πίνακα 14 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα παραπάνω αποτελέσματα:

Πίνακας 14: CCTs για το υβριδικό δίκτυο της περίπτωσης B κατά την εμφάνιση στερεών τριφασικών βραχυκυκλωμάτων.

| Διαδικασία | Bus 5 | Bus 6 | Bus 7 | Bus 8 | Bus 9 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Apply Fault | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| Clear Fault | 1.300 | 1.450 | 1.100 | 1.150 | 1.300 |
| Open Line | 1.300 | 1.450 | 1.100 | 1.150 | 1.300 |
| Close Line | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 |

Στην Εικόνα 94 απεικονίζεται το υβριδικό δίκτυο της περίπτωσης B. Υπενθυμίζεται ότι στο ζυγό 3 αντικαθιστάται πλήρως την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος της συμβατικής γεννήτριας με ανεμογεννήτρια και προσδιορίζεται ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης.



Εικόνα 94: Το υβριδικό δίκτυο της περίπτωσης B.

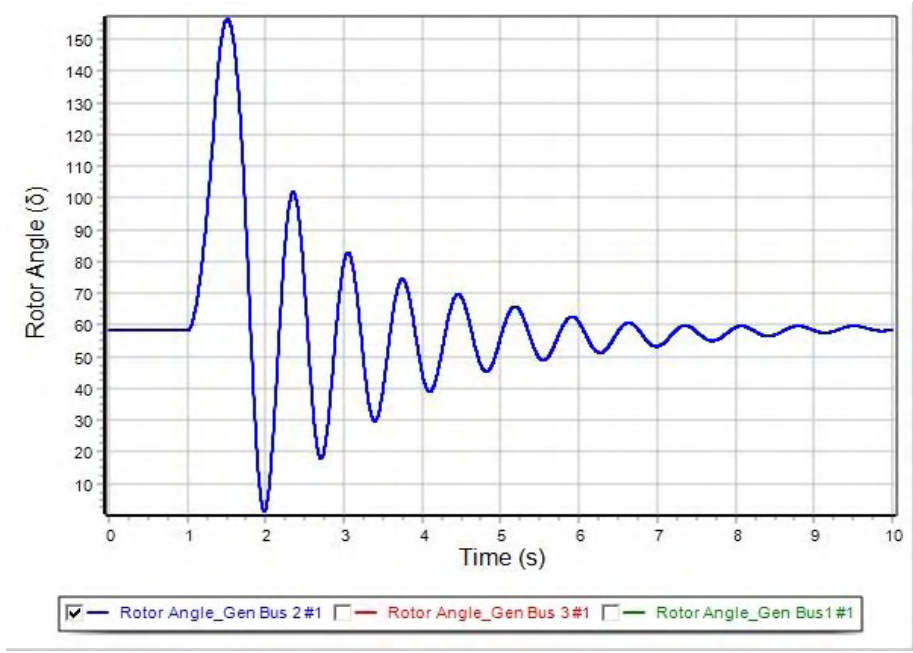
Έπειτα, ακολουθεί η μελέτη της περίπτωσης C, όπου η παραγωγή της ανεμογεννήτριας στο ζυγό 3 του υβριδικού συστήματος ελαττώνεται στο 50% της προηγούμενης περίπτωσης B.

Περίπτωση C1: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 5

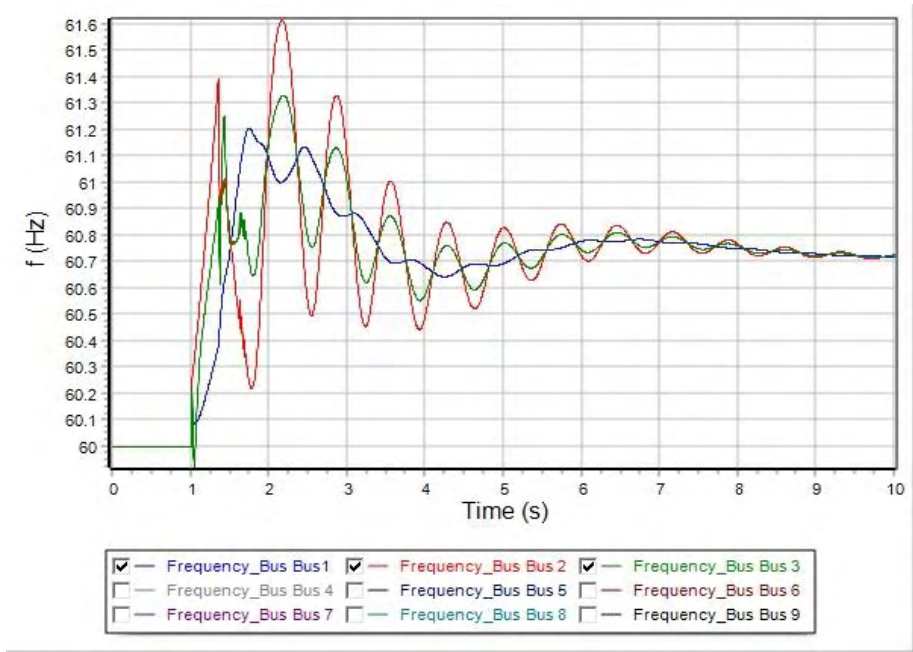
Στον Πίνακα 15 φαίνεται ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 5. Στην Εικόνα 95 απεικονίζεται η καμπύλη της γωνίας δ της συμβατικής γεννήτριας του ζυγού 2 του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.35 δευτερόλεπτα, που προσδιορίστηκε και ως κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος, με αποτέλεσμα να διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος. Στην Εικόνα 96 απεικονίζονται οι καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, ενώ στην Εικόνα 97 οι καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών του συστήματος για τον ίδιο χρόνο εκκαθάρισης. Η Εικόνα 98 και η Εικόνα 99 απεικονίζουν τις καμπύλες της πραγματικής και της άεργης ισχύος των γεννητριών του συστήματος αντίστοιχα. Τέλος, η Εικόνα 100 απεικονίζει ότι για χρόνο εκκαθάρισης 1.40 δευτερόλεπτα η ευστάθεια του συστήματος χάνεται, καθώς οι καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος δεν αποκτούν νέο σημείο ισορροπίας μετά την εκκαθάριση του σφάλματος.

Πίνακας 15: Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 5. Η παραγωγή της ανεμογεννήτριας στο ζυγό 3 του υβριδικού συστήματος έχει ελαττωθεί στο 50% της αρχικής.

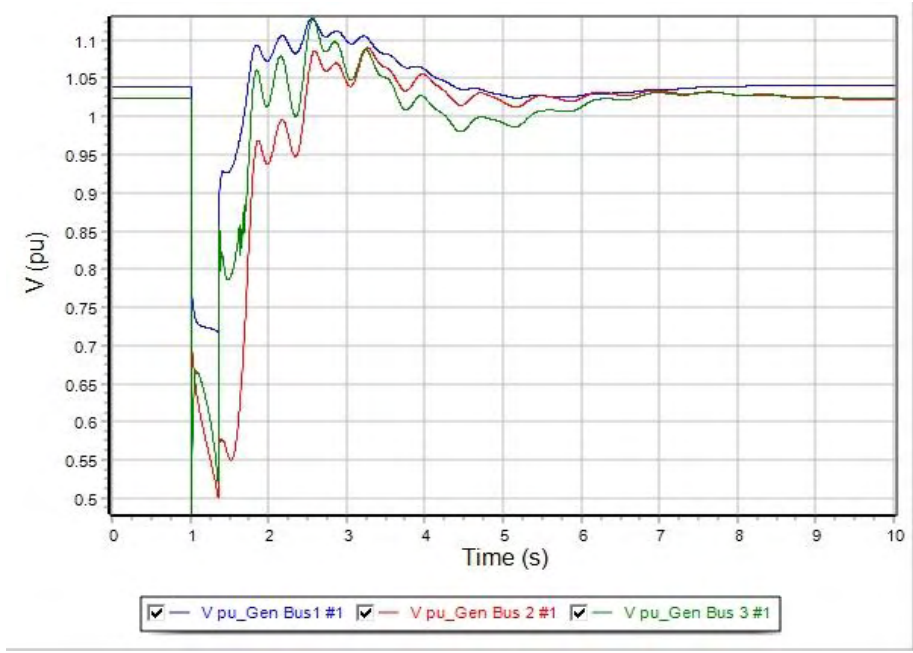
| Διαδικασία | Bus 5 |
|-------------|-------|
| Apply Fault | 1.000 |
| Clear Fault | 1.350 |
| Open Line | 1.350 |
| Close Line | 2.000 |



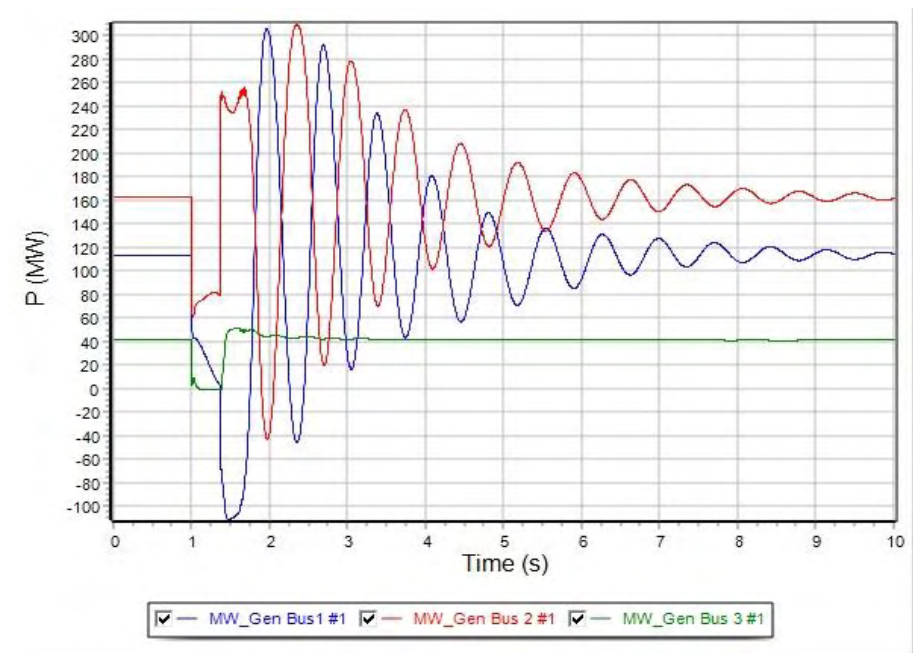
Εικόνα 95: Καμπύλη της γωνίας δ της συμβατικής γεννήτριας του ζυγού 2 του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.35 sec, που είναι και ο CCT και διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος.



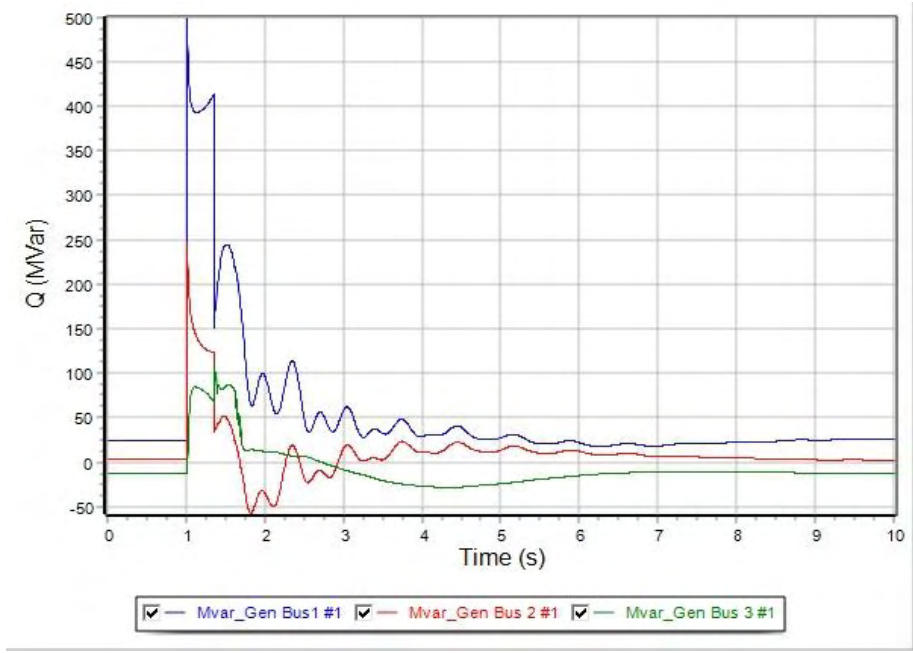
Εικόνα 96: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στα 1.35 sec.



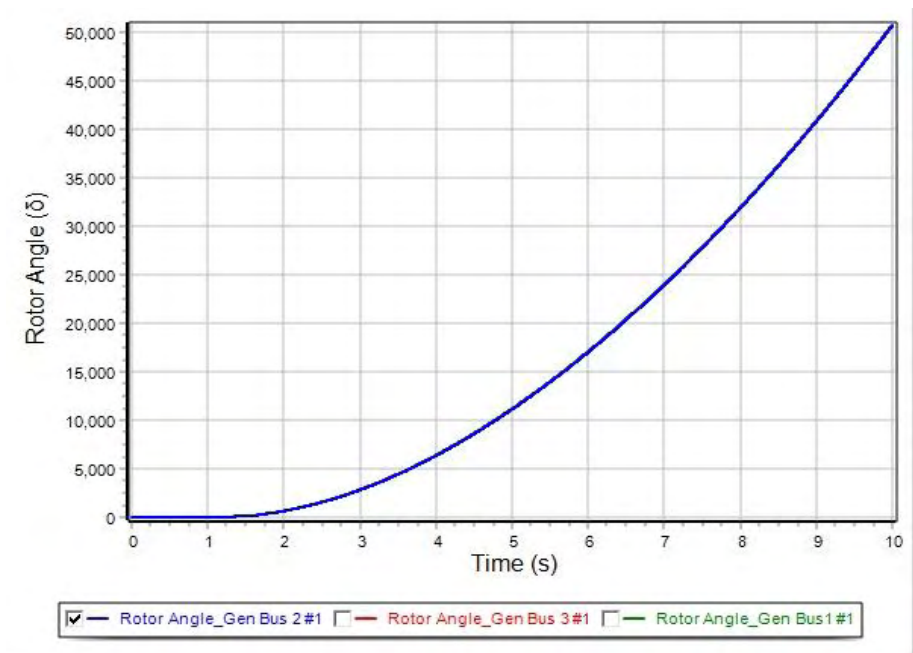
Εικόνα 97: Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στα 1.35 sec.



Εικόνα 98: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών (MW) σε συνάρτηση με τον χρόνο, όπου η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται σε χρόνο 1.35 sec.



Εικόνα 99: Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών (MVar) σε συνάρτηση με τον χρόνο, όπου η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται σε χρόνο 1.35 sec.



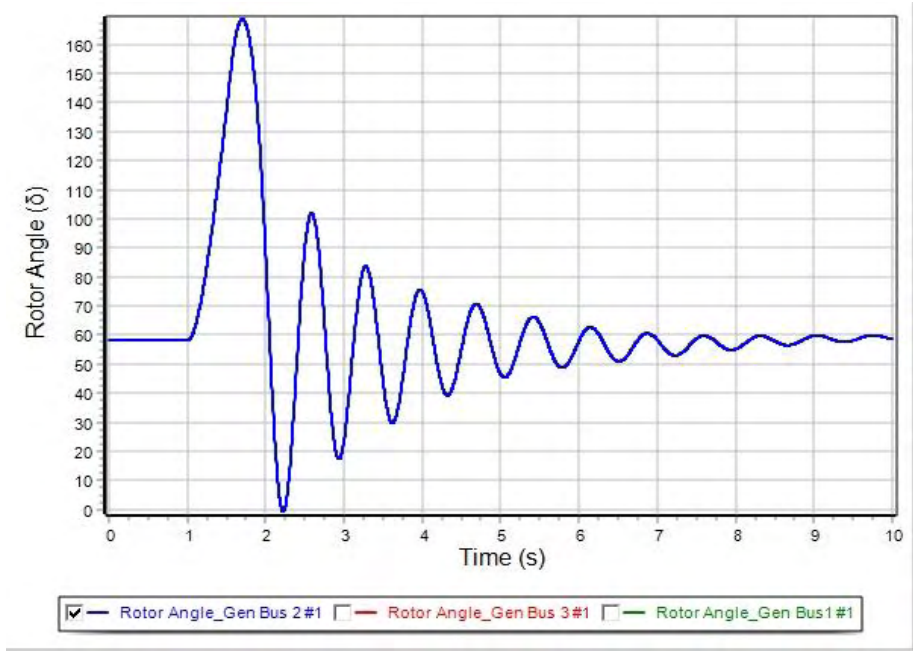
Εικόνα 100: Καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.40 sec και η ευστάθεια του συστήματος χάνεται.

Περίπτωση C2: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 6

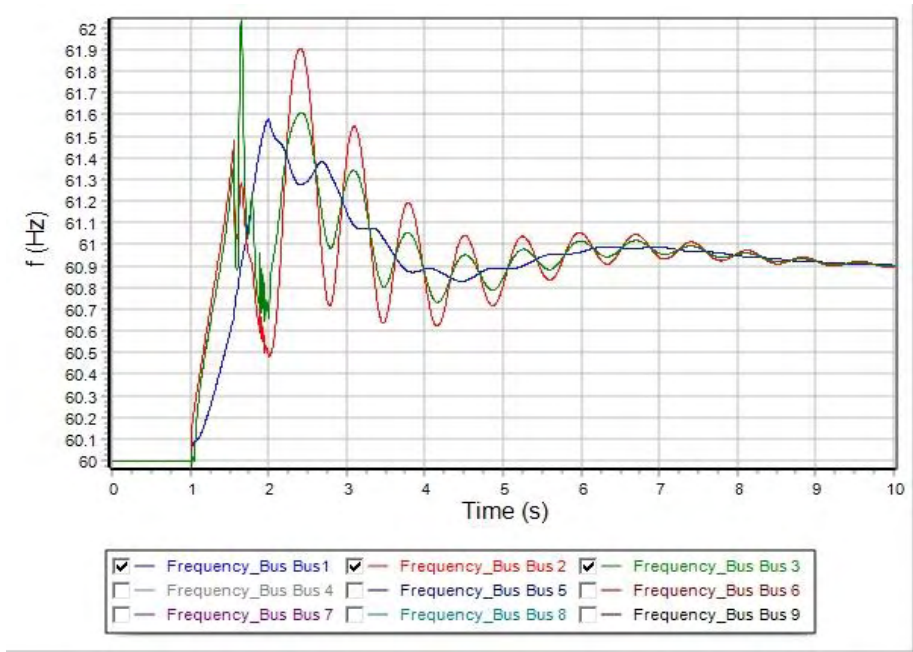
Στον Πίνακα 16 φαίνεται ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 6. Στην Εικόνα 101 απεικονίζεται η καμπύλη της γωνίας δ της συμβατικής γεννήτριας του ζυγού 2 του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.55 δευτερόλεπτα, που προσδιορίστηκε και ως κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος, με αποτέλεσμα να διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος. Στην Εικόνα 102 απεικονίζονται οι καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, ενώ στην Εικόνα 103 οι καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών του συστήματος για τον ίδιο χρόνο εκκαθάρισης. Η Εικόνα 104 και η Εικόνα 105 απεικονίζουν τις καμπύλες της πραγματικής και της άεργης ισχύος των γεννητριών του συστήματος αντίστοιχα. Τέλος, η Εικόνα 106 απεικονίζει ότι για χρόνο εκκαθάρισης 1.60 δευτερόλεπτα η ευστάθεια του συστήματος χάνεται, καθώς οι καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος δεν αποκτούν νέο σημείο ισορροπίας μετά την εκκαθάριση του σφάλματος.

Πίνακας 16: Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 6. Η παραγωγή της ανεμογεννήτριας στο ζυγό 3 του υβριδικού συστήματος έχει ελαττωθεί στο 50% της αρχικής.

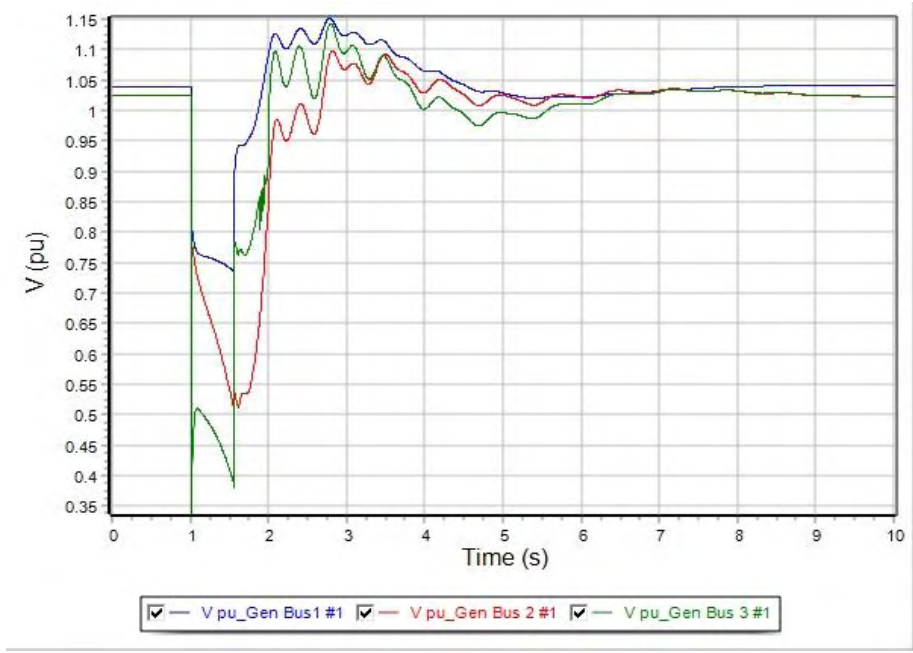
| Διαδικασία | Bus 6 |
|-------------|-------|
| Apply Fault | 1.000 |
| Clear Fault | 1.550 |
| Open Line | 1.550 |
| Close Line | 2.000 |



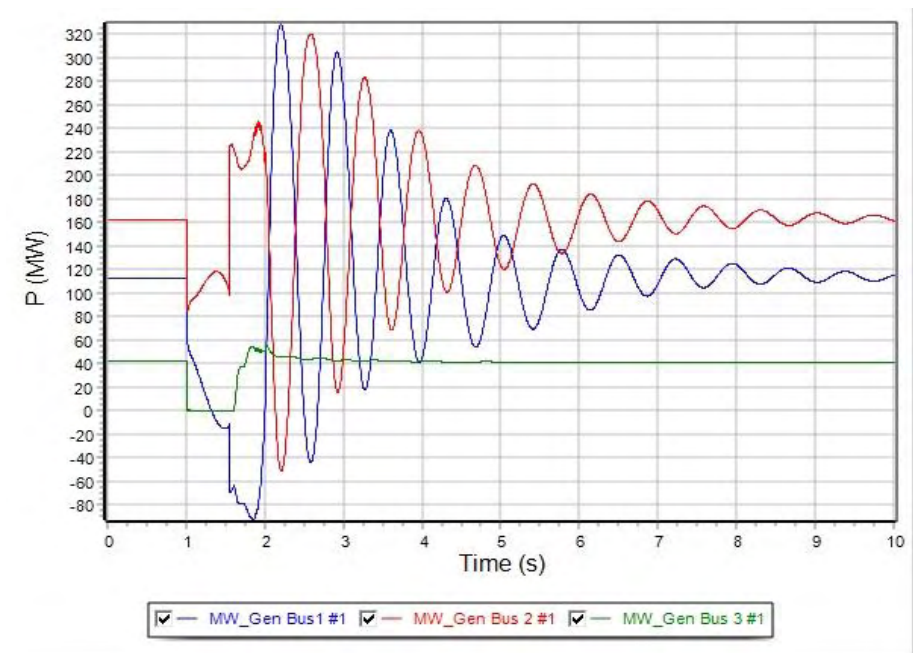
Εικόνα 101: Καμπύλη της γωνίας δ της συμβατικής γεννήτριας του ζυγού 2 του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.55 sec, που είναι και ο CCT και διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος.



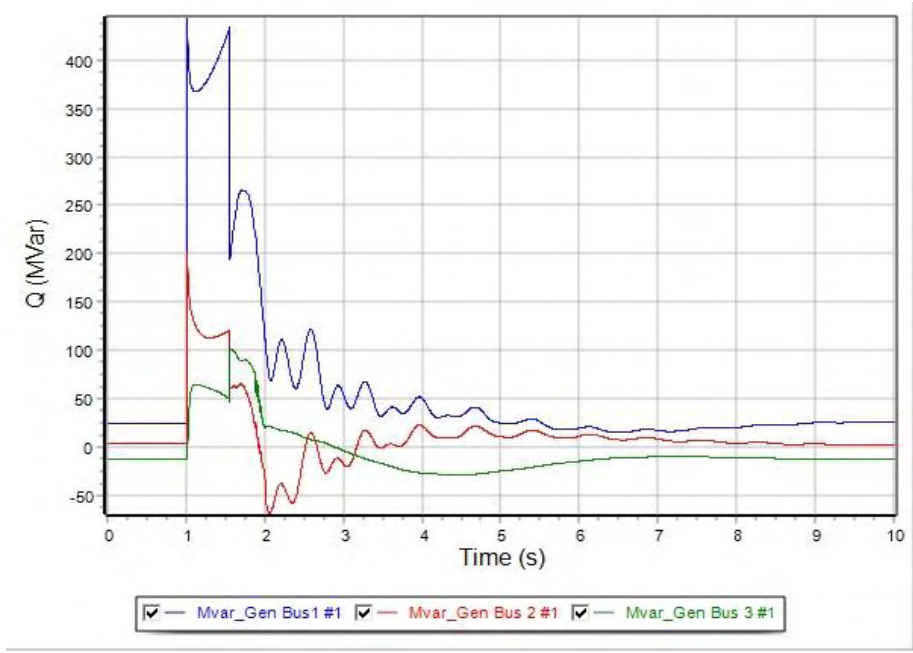
Εικόνα 102: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στα 1.55 sec.



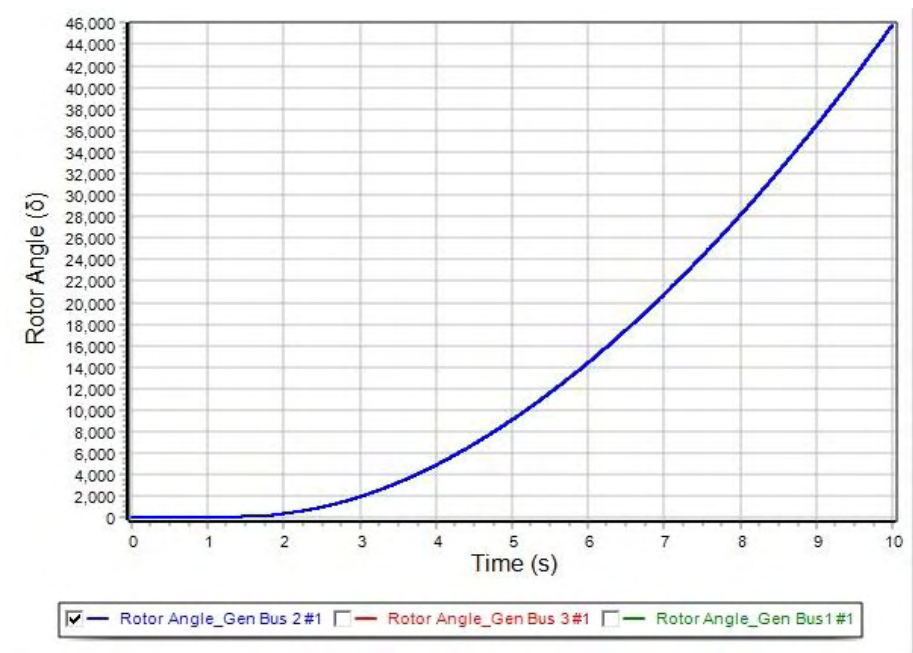
Εικόνα 103: Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στα 1.55 sec.



Εικόνα 104: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών (MW) σε συνάρτηση με τον χρόνο, όπου η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται σε χρόνο 1.55 sec.



Εικόνα 105: Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών (MVar) σε συνάρτηση με τον χρόνο, όπου η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται σε χρόνο 1.55 sec.



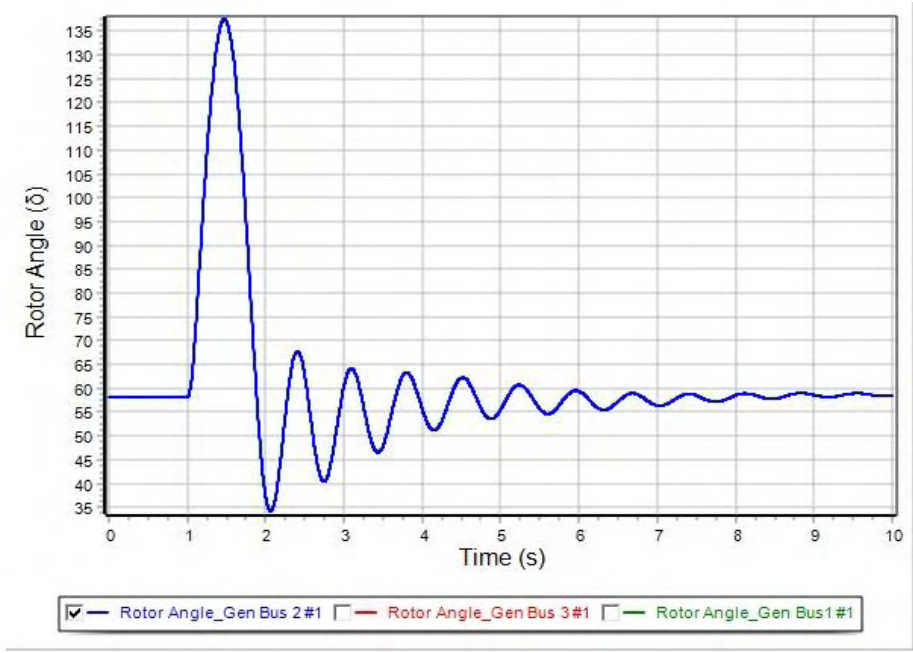
Εικόνα 106: Καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.60 sec και η ευστάθεια του συστήματος χάνεται.

Περίπτωση C3: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 7

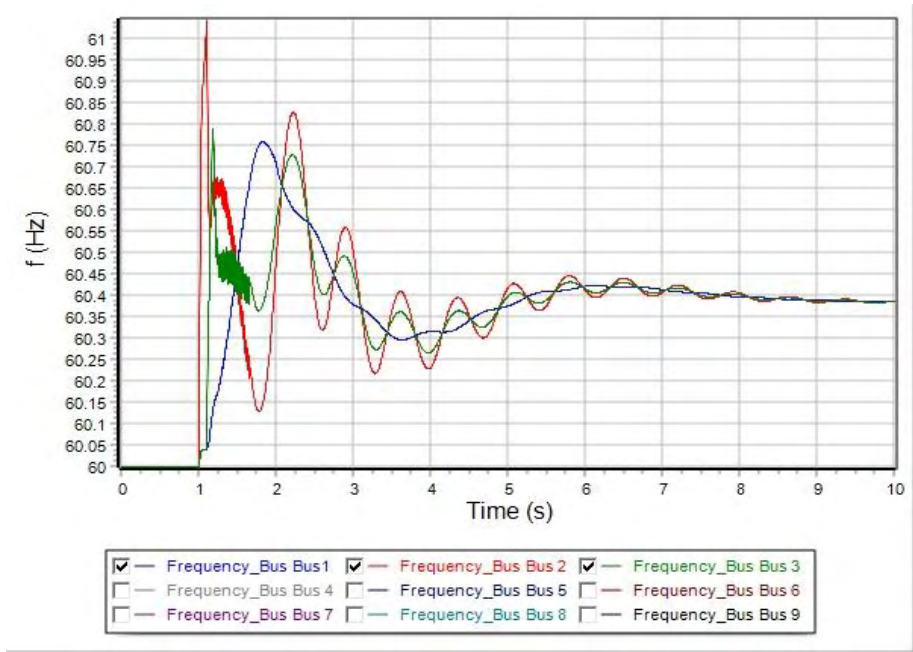
Στον Πίνακα 17 φαίνεται ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 7. Στην Εικόνα 107 απεικονίζεται η καμπύλη της γωνίας δ της συμβατικής γεννήτριας του ζυγού 2 του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.10 δευτερόλεπτα, που προσδιορίστηκε και ως κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος, με αποτέλεσμα να διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος. Στην Εικόνα 108 απεικονίζονται οι καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, ενώ στην Εικόνα 109 οι καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών του συστήματος για τον ίδιο χρόνο εκκαθάρισης. Η Εικόνα 110 και η Εικόνα 111 απεικονίζουν τις καμπύλες της πραγματικής και της άεργης ισχύος των γεννητριών του συστήματος αντίστοιχα. Τέλος, η Εικόνα 112 απεικονίζει ότι για χρόνο εκκαθάρισης 1.15 δευτερόλεπτα η ευστάθεια του συστήματος χάνεται, καθώς οι καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος δεν αποκτούν νέο σημείο ισορροπίας μετά την εκκαθάριση του σφάλματος.

Πίνακας 17: Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 7. Η παραγωγή της ανεμογεννήτριας στο ζυγό 3 του υβριδικού συστήματος έχει ελαττωθεί στο 50% της αρχικής.

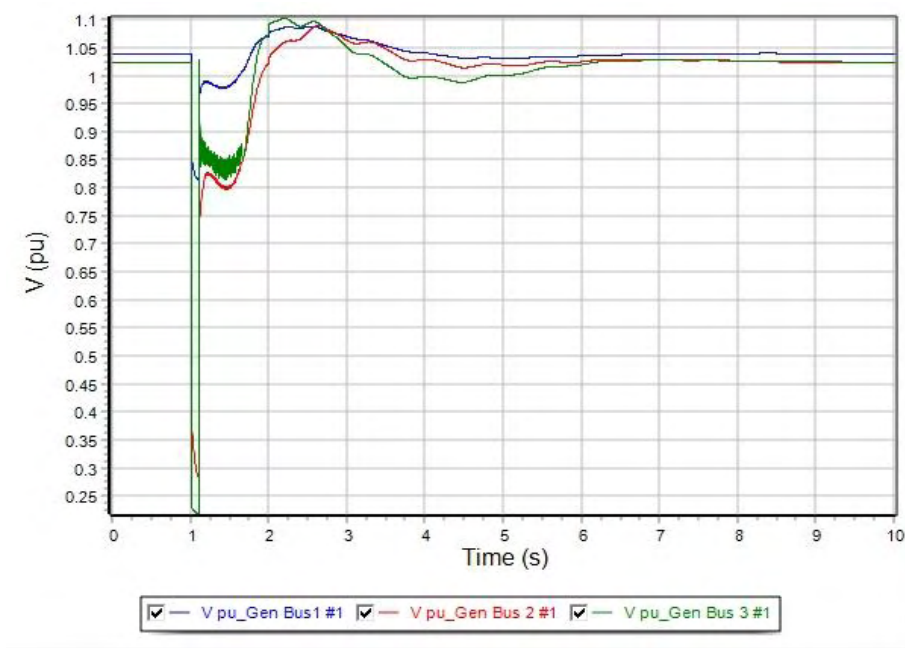
| Διαδικασία | Bus 7 |
|-------------|-------|
| Apply Fault | 1.000 |
| Clear Fault | 1.100 |
| Open Line | 1.100 |
| Close Line | 2.000 |



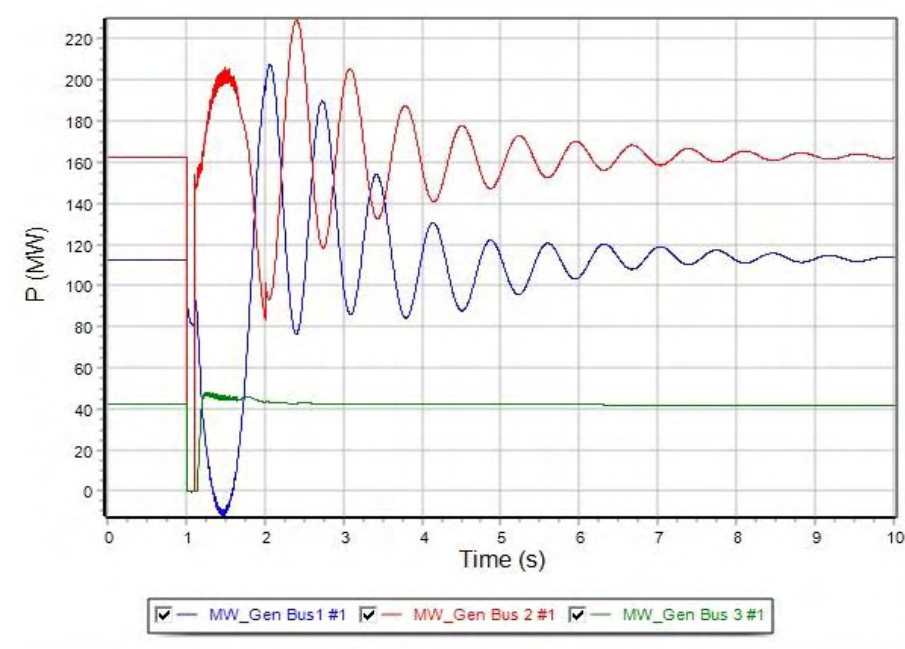
Εικόνα 107: Καμπύλη της γωνίας δ της συμβατικής γεννήτριας του ζυγού 2 του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.10 sec, που είναι και ο CCT και διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος.



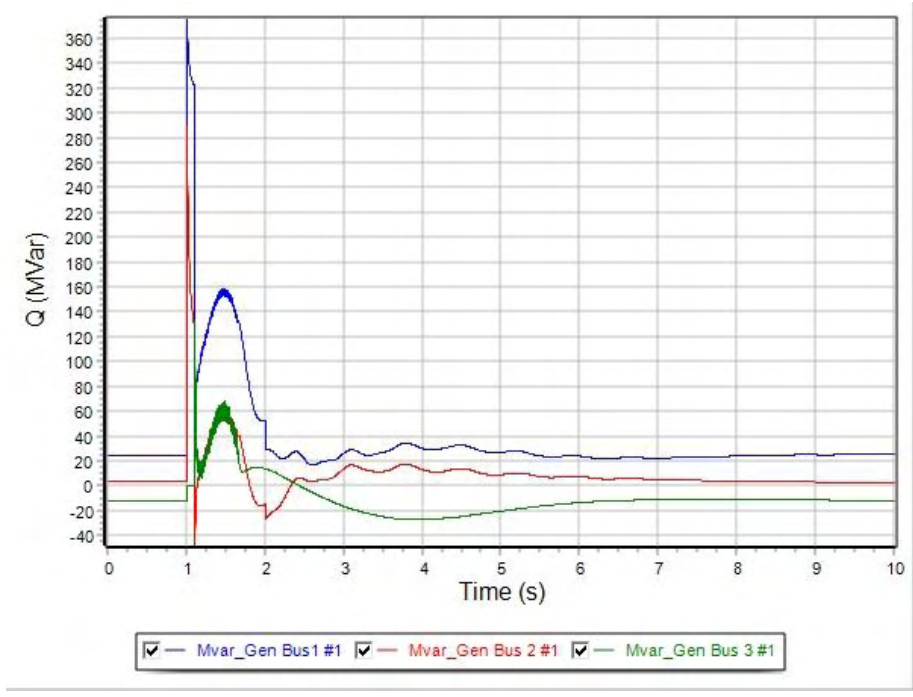
Εικόνα 108: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στα 1.10 sec.



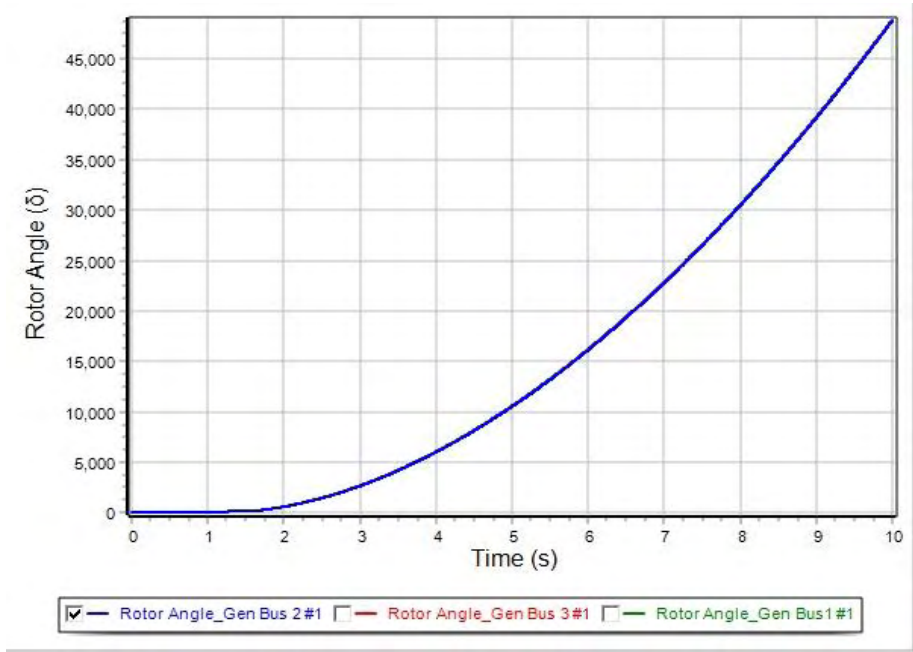
Εικόνα 109: Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στα 1.10 sec.



Εικόνα 110: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών (MW) σε συνάρτηση με τον χρόνο, όπου η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται σε χρόνο 1.10 sec.



Εικόνα 111: Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών (MVar) σε συνάρτηση με τον χρόνο, όπου η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται σε χρόνο 1.10 sec.



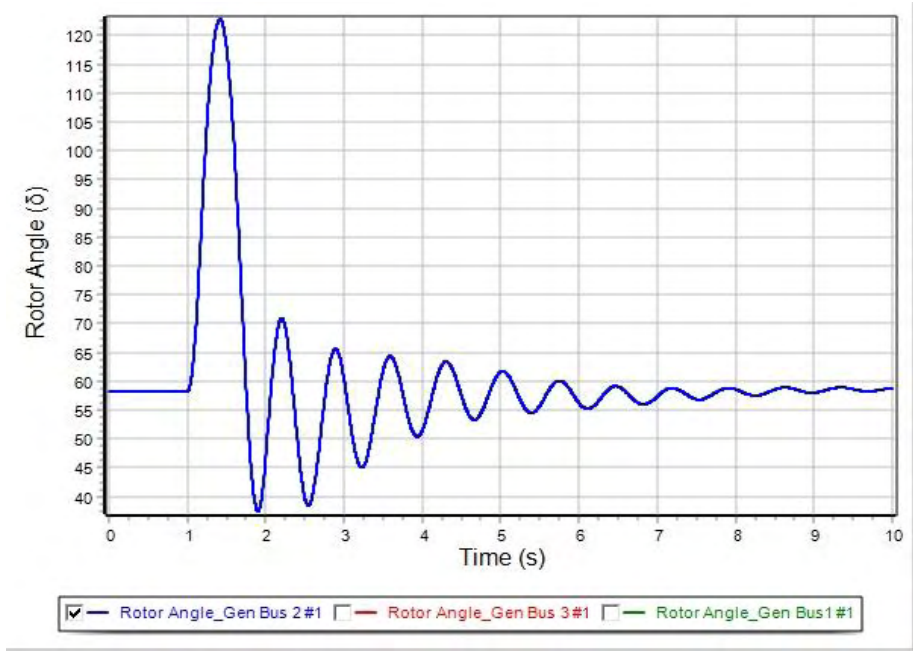
Εικόνα 112: Καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.15 sec και η ευστάθεια του συστήματος χάνεται.

Περίπτωση C4: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 8

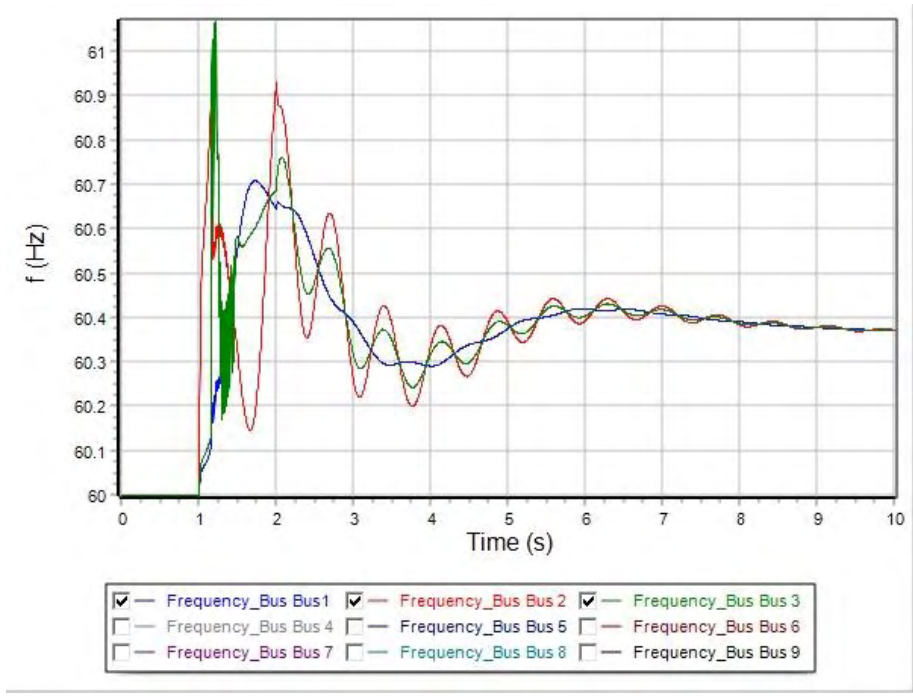
Στον Πίνακα 18 φαίνεται ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 8. Στην Εικόνα 113 απεικονίζεται η καμπύλη της γωνίας δ της συμβατικής γεννήτριας του ζυγού 2 του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.15 δευτερόλεπτα, που προσδιορίστηκε και ως κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος, με αποτέλεσμα να διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος. Στην Εικόνα 114 απεικονίζονται οι καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, ενώ στην Εικόνα 115 οι καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών του συστήματος για τον ίδιο χρόνο εκκαθάρισης. Η Εικόνα 116 και η Εικόνα 117 απεικονίζουν τις καμπύλες της πραγματικής και της άεργης ισχύος των γεννητριών του συστήματος αντίστοιχα. Τέλος, η Εικόνα 118 απεικονίζει ότι για χρόνο εκκαθάρισης 1.20 δευτερόλεπτα η ευστάθεια του συστήματος χάνεται, καθώς οι καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος δεν αποκτούν νέο σημείο ισορροπίας μετά την εκκαθάριση του σφάλματος.

Πίνακας 18: Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 8. Η παραγωγή της ανεμογεννήτριας στο ζυγό 3 του υβριδικού συστήματος έχει ελαττωθεί στο 50% της αρχικής.

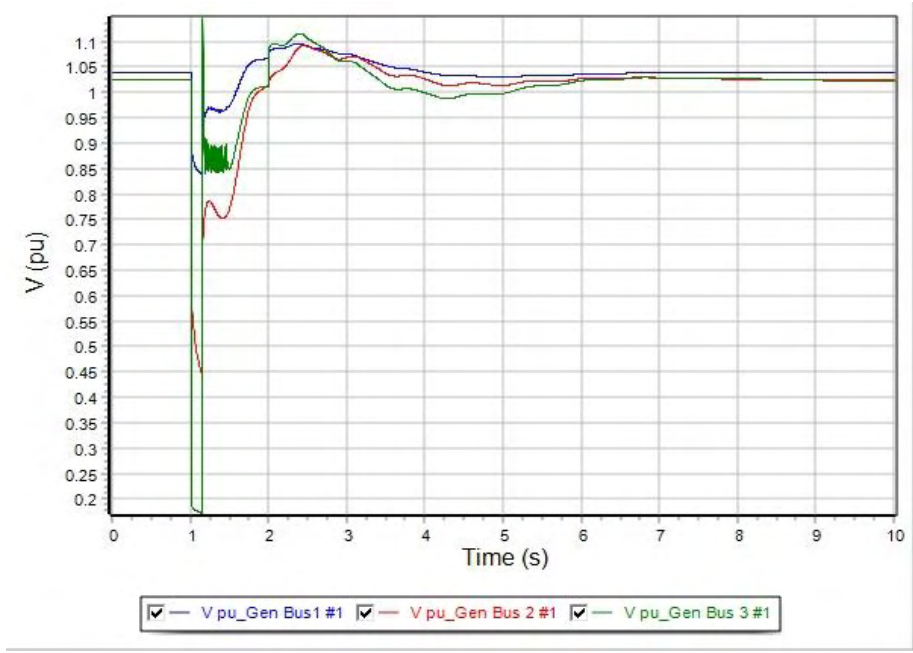
| Διαδικασία | Bus 8 |
|-------------|-------|
| Apply Fault | 1.000 |
| Clear Fault | 1.150 |
| Open Line | 1.150 |
| Close Line | 2.000 |



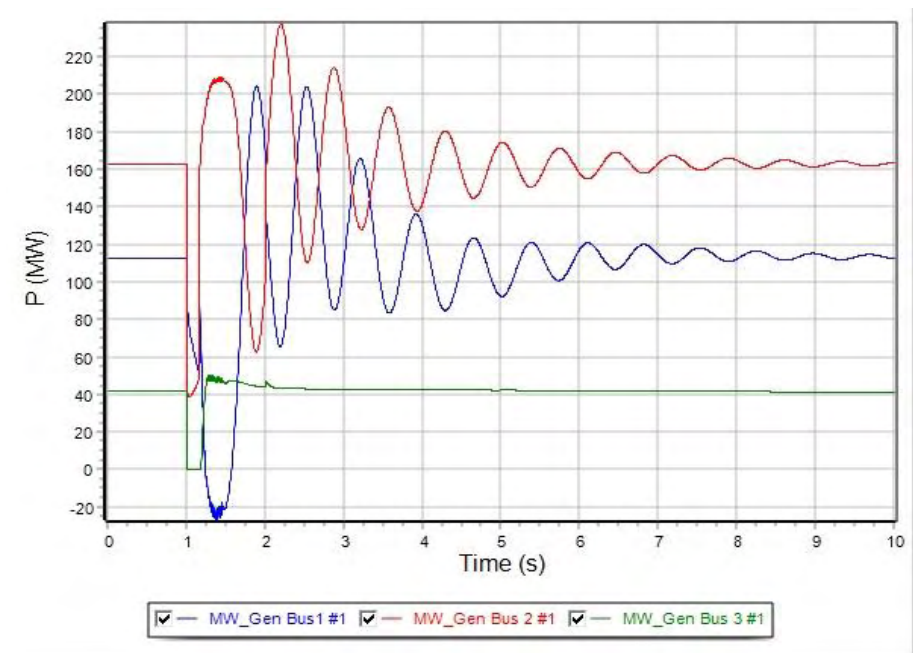
Εικόνα 113: Καμπύλη της γωνίας δ της συμβατικής γεννήτριας του ζυγού 2 του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.15 sec, που είναι και ο CCT και διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος.



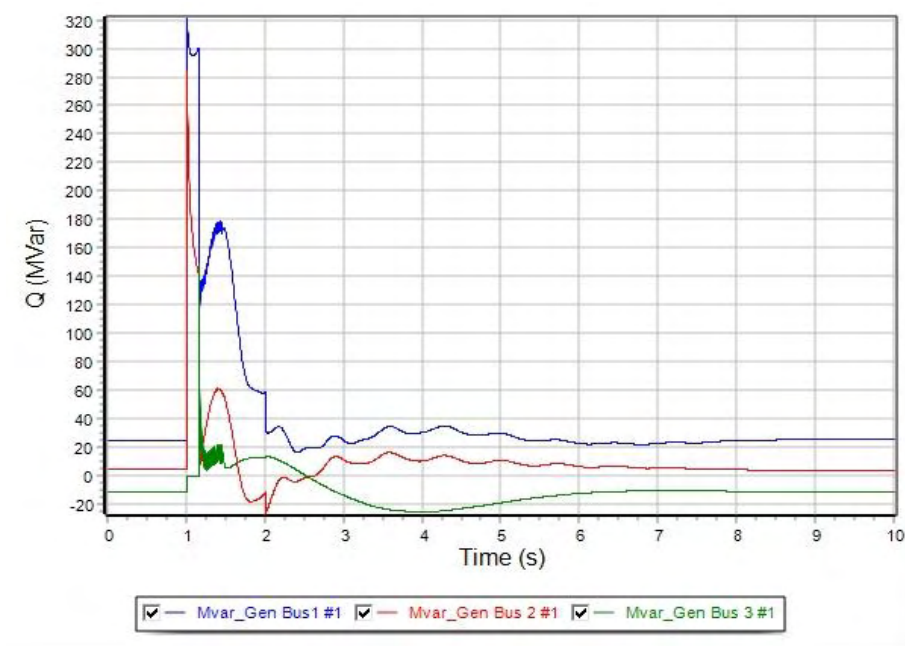
Εικόνα 114: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στα 1.15 sec.



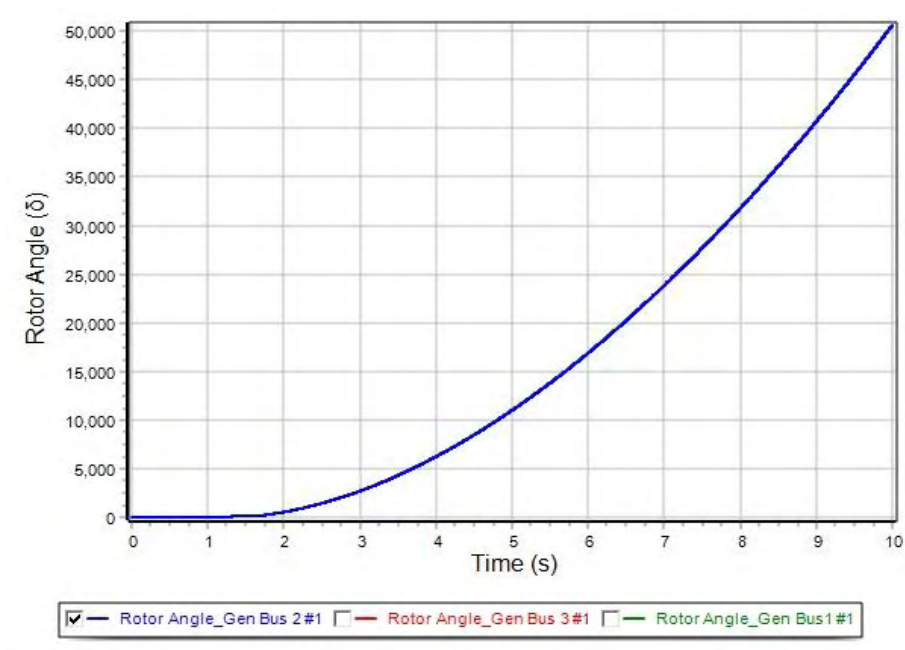
Εικόνα 115: Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στα 1.15 sec.



Εικόνα 116: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών (MW) σε συνάρτηση με τον χρόνο, όπου η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται σε χρόνο 1.15 sec.



Εικόνα 117: Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών (MVar) σε συνάρτηση με τον χρόνο, όπου η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται σε χρόνο 1.15 sec.



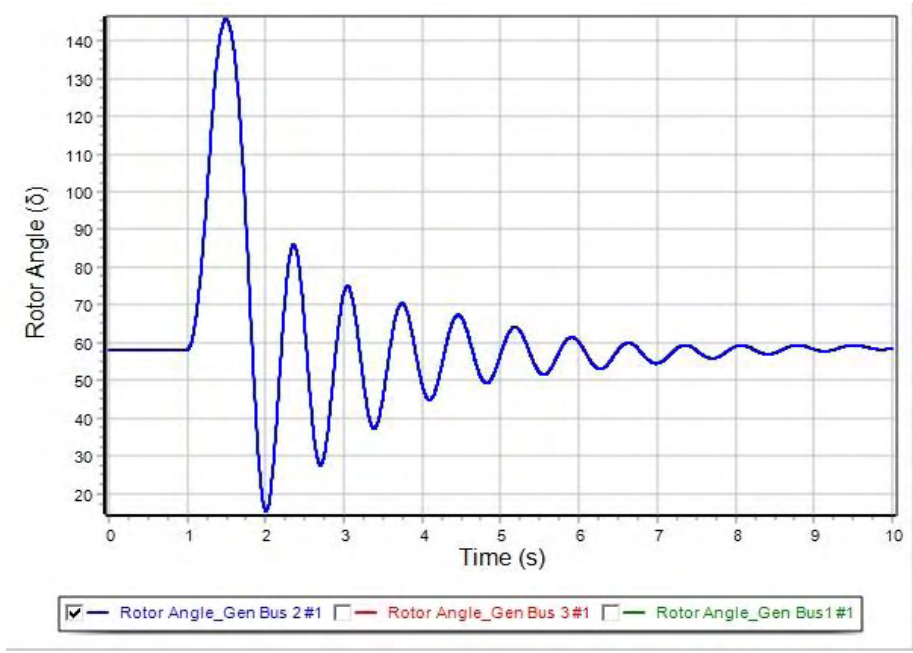
Εικόνα 118: Καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.20 sec και η ευστάθεια του συστήματος χάνεται.

Περίπτωση C5: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 9

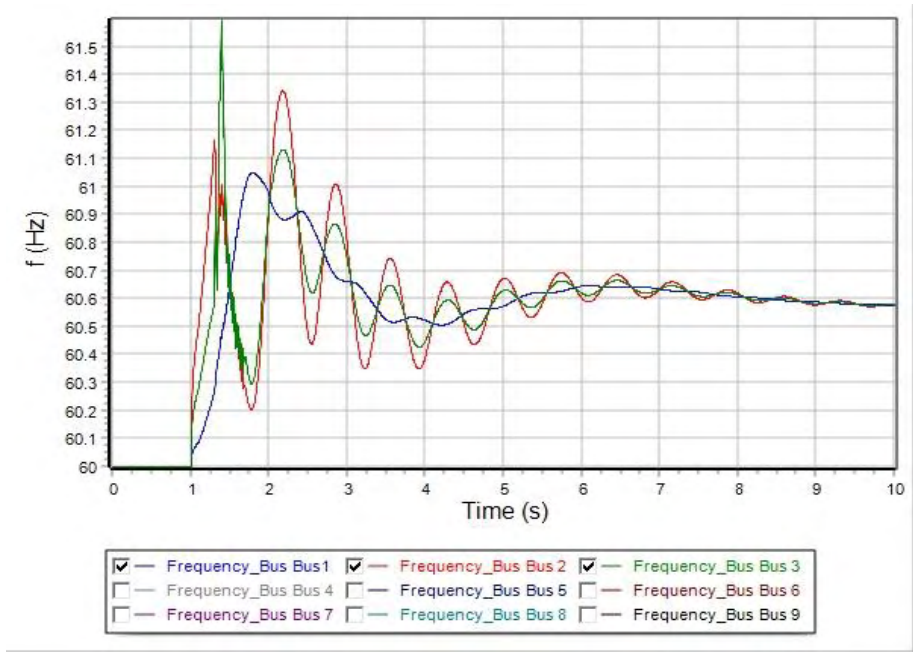
Στον Πίνακα 19 φαίνεται ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 9. Στην Εικόνα 119 απεικονίζεται η καμπύλη της γωνίας δ της συμβατικής γεννήτριας του ζυγού 2 του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.30 δευτερόλεπτα, που προσδιορίστηκε και ως κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος, με αποτέλεσμα να διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος. Στην Εικόνα 120 απεικονίζονται οι καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, ενώ στην Εικόνα 121 οι καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών του συστήματος για τον ίδιο χρόνο εκκαθάρισης. Η Εικόνα 122 και η Εικόνα 123 απεικονίζουν τις καμπύλες της πραγματικής και της άεργης ισχύος των γεννητριών του συστήματος αντίστοιχα. Τέλος, η Εικόνα 124 απεικονίζει ότι για χρόνο εκκαθάρισης 1.35 δευτερόλεπτα η ευστάθεια του συστήματος χάνεται, καθώς οι καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος δεν αποκτούν νέο σημείο ισοροπίας μετά την εκκαθάριση του σφάλματος.

Πίνακας 19: Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 9. Η παραγωγή της ανεμογεννήτριας στο ζυγό 3 του υβριδικού συστήματος έχει ελαττωθεί στο 50% της αρχικής.

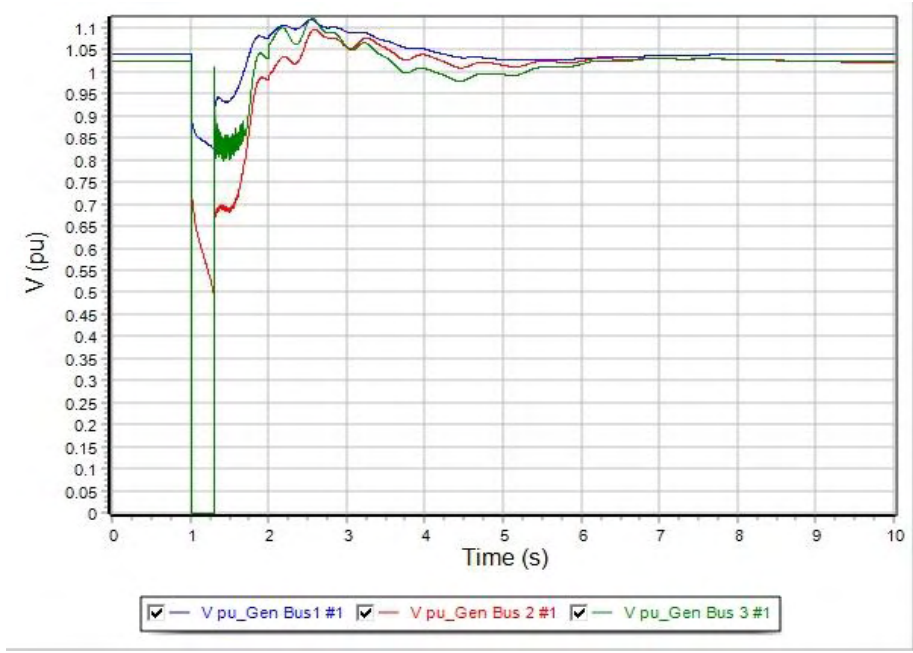
| Διαδικασία | Bus 9 |
|-------------|-------|
| Apply Fault | 1.000 |
| Clear Fault | 1.300 |
| Open Line | 1.300 |
| Close Line | 2.000 |



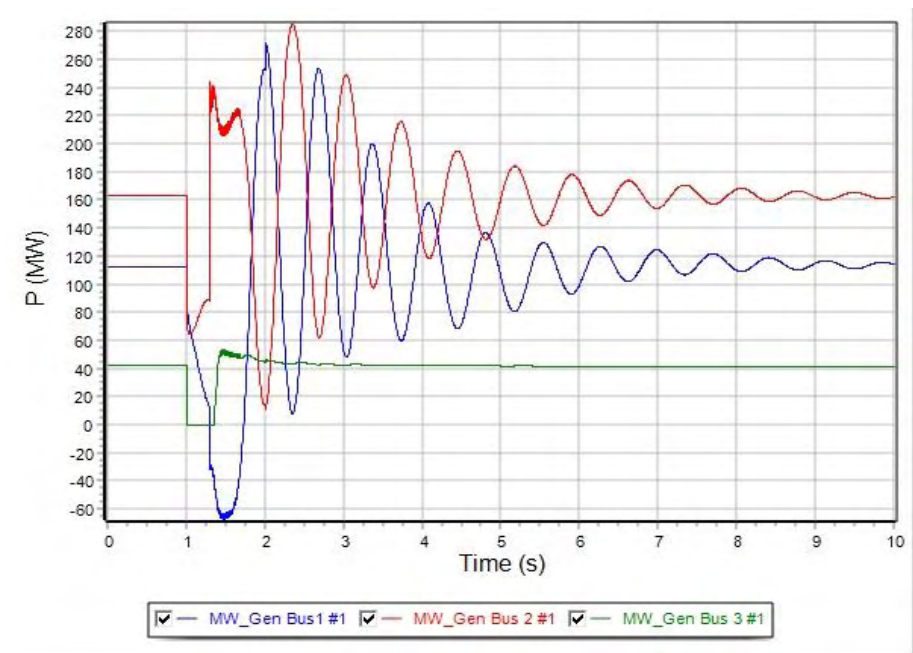
Εικόνα 119: Καμπύλη της γωνίας δ της συμβατικής γεννήτριας του ζυγού 2 του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.30 sec, που είναι και ο CCT και διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος.



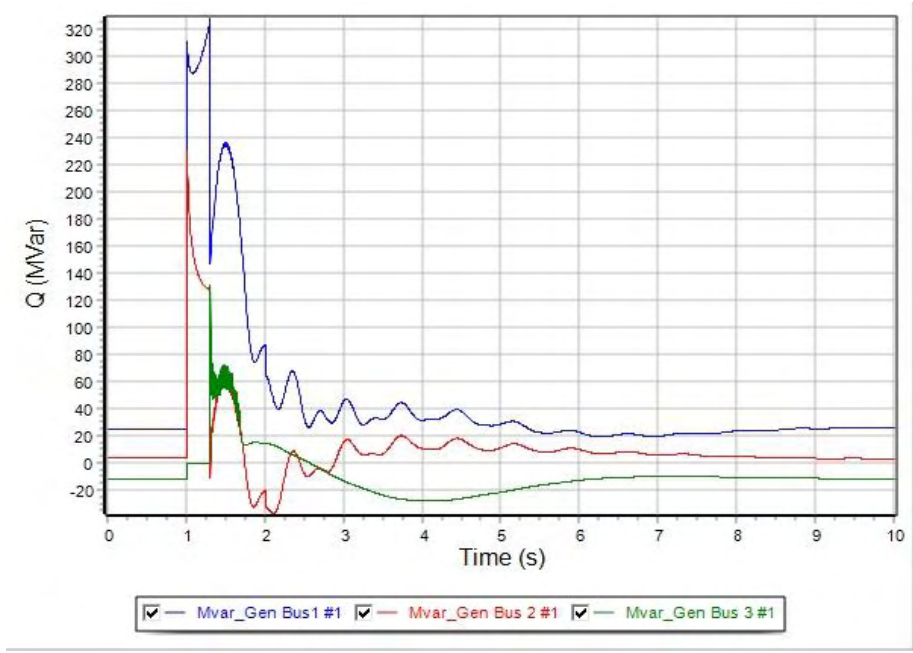
Εικόνα 120: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στα 1.30 sec.



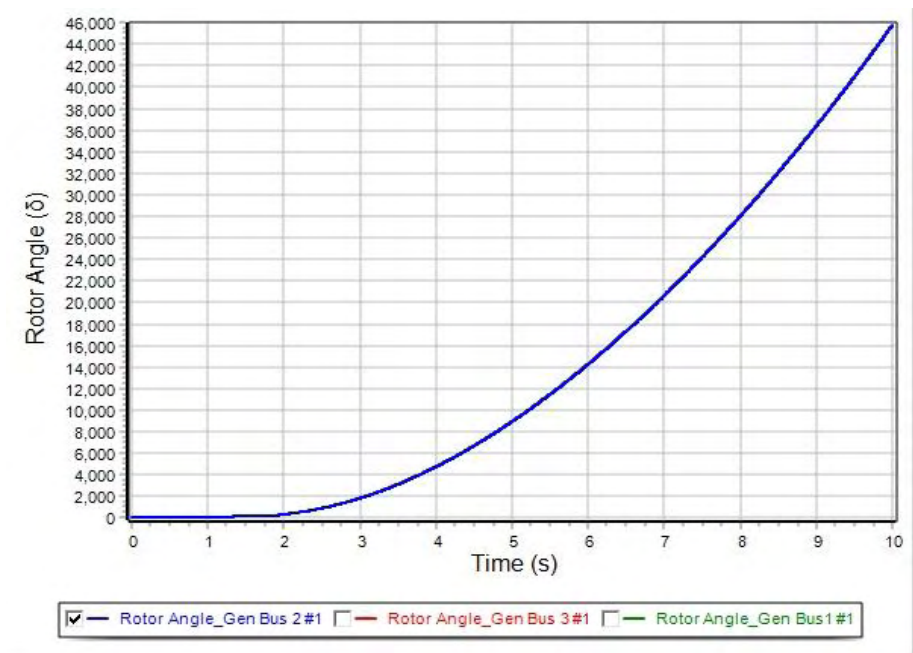
Εικόνα 121: Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στα 1.30 sec.



Εικόνα 122: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών (MW) σε συνάρτηση με τον χρόνο, όπου η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται σε χρόνο 1.30 sec.



Εικόνα 123: Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών (MVar) σε συνάρτηση με τον χρόνο, όπου η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται σε χρόνο 1.30 sec.



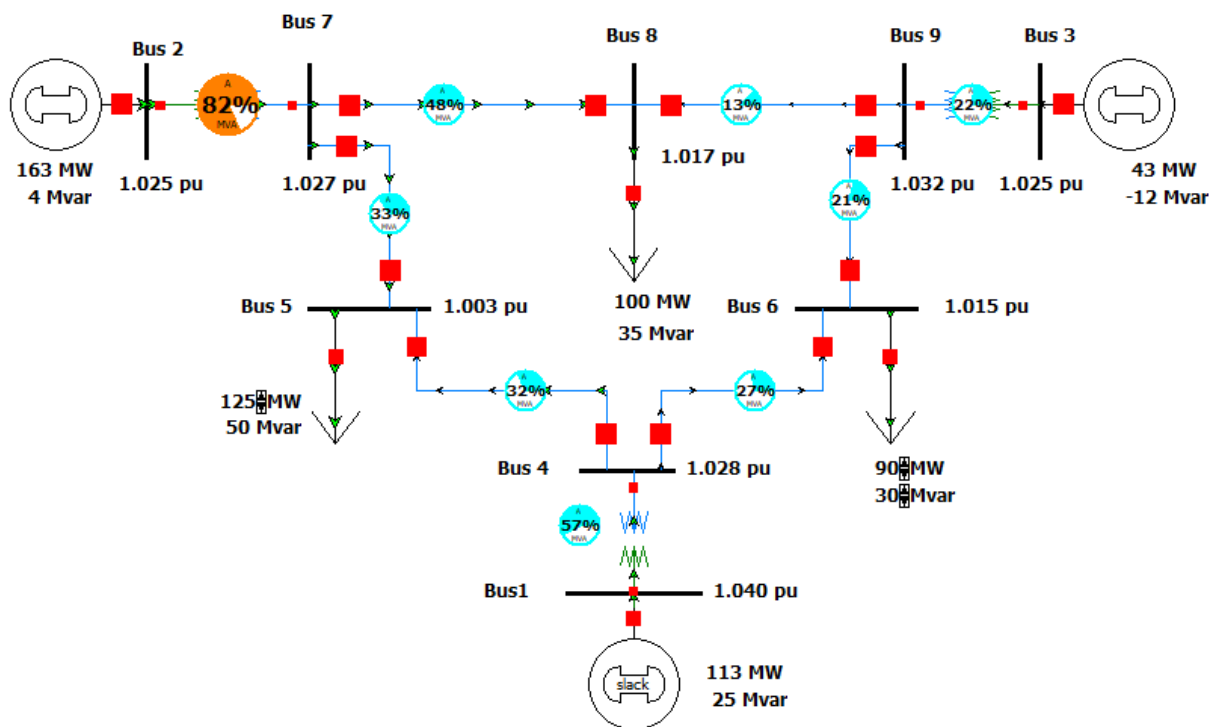
Εικόνα 124: Καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται στα 1.35 sec και η ευστάθεια του συστήματος χάνεται.

Ο Πίνακας 20 συγκεντρώνει τα προηγούμενα αποτελέσματα:

Πίνακας 20: CCTs για το υβριδικό δίκτυο της περίπτωσης C κατά την εμφάνιση στερεών τριφασικών βραχυκυκλωμάτων.

| Διαδικασία | Bus 5 | Bus 6 | Bus 7 | Bus 8 | Bus 9 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Apply Fault | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| Clear Fault | 1.350 | 1.550 | 1.100 | 1.150 | 1.300 |
| Open Line | 1.350 | 1.550 | 1.100 | 1.150 | 1.300 |
| Close Line | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 |

Στην Εικόνα 125 απεικονίζεται το υβριδικό δίκτυο της περίπτωσης C. Η παραγωγή της ανεμογεννήτριας στο ζυγό 3 έχει μειωθεί στο 50% της προηγούμενης περίπτωσης B. Αυτό το υβριδικό σύστημα χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης που συγκεντρώνονται στον Πίνακα 20.



Εικόνα 125: Το υβριδικό δίκτυο της περίπτωσης C.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα

Στις περισσότερες χώρες, το ποσοστό παραγωγής αιολικής ενέργειας που ενσωματώνεται στα ήδη υπάρχοντα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας ευρείας κλίμακας καλύπτει μόνο ένα μικρό μέρος του συνολικού φορτίου του συστήματος ισχύος. Ωστόσο, η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανεμογεννήτριες αυξάνεται συνεχώς. Ως εκ τούτου, η διείσδυση αιολικής ενέργειας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας θα αυξηθεί στο μέλλον και θα αρχίσει να αντικαθιστά την παραγωγή των συμβατικών σύγχρονων γεννητριών. Ως αποτέλεσμα, επηρεάζεται και η συνολική συμπεριφορά του συστήματος ισχύος.

Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και από τους Πίνακες 8, 14 και 20 η διείσδυση της αιολικής ενέργειας επιδρά θετικά στη βελτίωση της συμπεριφοράς του συστήματος για τη διατήρηση της μεταβατικής του ευστάθειας. Ωστόσο, από τους Πίνακες 14 και 20 παρατηρούμε πως ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης έχει μεγαλύτερες τιμές για μερική αντικατάσταση της συμβατικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έναντι της ολικής αντικατάστασης. Η αύξηση του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης δίνει τη δυνατότητα στο σύστημα ισχύος να κατορθώσει να αντιδράσει σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα κατά την εμφάνιση μιας ορισμένης διαταραχής αυξάνοντας, με αυτόν τον τρόπο, άμεσα την αξιοπιστία του.

Η αιολική ενέργεια μπορεί να φτάσει σε σημαντικό επίπεδο διείσδυσης στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, όπως έχουν δείξει τα παραδείγματα της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Ο καθορισμός του βέλτιστου επιπέδου διείσδυσης της αιολικής ενέργειας δεν αποτελεί τεχνικό πρόβλημα, αλλά είναι μάλλον ένα οικονομικό ζήτημα. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το σύστημα ισχύος στις περισσότερες χώρες σχεδιάστηκε γύρω από συμβατικές πηγές παραγωγής (άνθρακας, φυσικό αέριο, πυρηνική ή υδροηλεκτρική παραγωγή), η είσοδος της αιολικής ενέργειας μπορεί να απαιτεί επανασχεδιασμό του συστήματος ισχύος ή και αλλαγή στη λειτουργία του. Και οι δύο αυτές ενέργειες θα επηρεάσουν άμεσα το κόστος της συνολικής τροφοδοσίας. Το κόστος σχετίζεται με το κόστος διασύνδεσης και αναβάθμισης του δικτύου, καθώς και τις αυξανόμενες απαιτήσεις για εξισορρόπηση του συστήματος. Γενικά, το κόστος ενσωμάτωσης της αιολικής

ενέργειας στο σύστημα ισχύος εξαρτάται από την ποσότητα της αιολικής ενέργειας σε σχέση με τη συνολική ζήτηση στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας.

Στις μέρες μας, όλο και πιο εξελιγμένα ηλεκτρονικά ισχύος σε αιολικά πάρκα, καθώς και οι ακριβέστερες προβλέψεις στον άνεμο, οδηγούν σε βελτιώσεις στην ικανότητα ελέγχου της αιολικής ενέργειας. Τα αιολικά πάρκα οφείλουν να παραμένουν συνδεδεμένα στο σύστημα κατά την εμφάνιση σφαλμάτων και αναμένεται να αντέχουν σε αυτά χωρίς να αντιμετωπίζουν προβλήματα στην παραγωγή ισχύος κατά τη διάρκεια των διαταραχών. Έτσι, παρέχουν υποστήριξη άεργου ισχύος στο σύστημα κατά τη διάρκεια του σφάλματος.

Τέλος, η αιολική ενέργεια συμβάλει στη μείωση της χρήσης των ορυκτών καυσίμων και των βλαβερών για την υγεία εκπομπών που παράγονται από τις συμβατικές γεννήτριες. Η τάση αύξησης της κατανεμημένης παραγωγής από ανεμογεννήτριες είναι επωφελής για την ενσωμάτωση της αιολικής ενέργειας, αλλά και για την αύξηση της διαχείρισης των φορτίων. Η μεγαλύτερη διασύνδεση του συστήματος είναι επίσης πολύ ωφέλιμη, καθώς η αιολική ενέργεια είναι μια αξιόπιστη και φιλική προς το περιβάλλον πηγή.

Βιβλιογραφία

- [1] Δ. Λαμπρίδης, Π. Ντοκόπουλος, Γ. Παπαγιάννης. *Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Εκδόσεις Ζήτη, Αύγουστος 2006, Θεσσαλονίκη.
- [2] Βοβός, Νικόλαος & Γιαννακόπουλος, Γαβριήλ. (2008). *Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας*.
- [3] J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma, Thomas J. Overbye. *Power System Analysis and Design*, Fifth Edition. 2012, 2008 Cengage Learning.
- [4] Leonard Lee Grigsby. *Power system stability and control*. 2007 by Taylor & Francis Group, LLC.
- [5] Kundur P. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, New York, 1994.
- [6] Thomas Ackermann. *Wind Power in Power Systems*. John Wiley & Sons, Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, 2005.
- [7] WindEurope Business Intelligence. *Wind energy in Europe in 2018. Trends and statistics*. Published in February 2019.
- [8] Akhmatov, Vladislav. (2006). System stability of large wind power networks: A Danish study case. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*.
- [9] ABB. *Technical Application Papers No.13, Wind power plants*. Copyright 2011 ABB. All rights reserved.
- [10] Western Electricity Coordinating Council (WECC). *Specification of the Second-Generation Generic Models for Wind Turbine Generators*. 2013 Electric Power Research Institute, Inc. All rights reserved.